ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL D
TESE DEFENDIDA POR JORGE NEI BRITO
E APROVADA PEL
COMISSÃO JULGADORA EM 21 / 02 / 2002
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos

Autor: **Jorge Nei Brito**
Orientador: **Robson Pederiva**

02/02

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos

Autor: **Jorge Nei Brito**
Orientador: **Robson Pederiva**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Tese de doutorado apresentada à Comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2002
SP - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B777d

Brito, Jorge Nei
Desenvolvimento de um sistema inteligente híbrido para diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos / Jorge Nei Brito. --Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Robson Pederiva.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Motores elétricos de corrente alternada. 2. Inteligência artificial. 3. Redes neurais (Computação). 4. Sistemas especialistas (Computação). 5. Software – Manutenção. I. Pederiva, Robson. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

TESE DE DOUTORADO

Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos

Autor: **Jorge Nei Brito**
Orientador: **Robson Pederiva**

Prof. Dr. Robson Pederiva, Presidente
UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Francisco Paulo Lépore Neto
UFU - Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Walmir Matos Caminhas
UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Eurípedes Guilherme de Oliveira Nóbrega
UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dra. Kátia Lucchesi Cavalca Dedini
UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 21 de fevereiro de 2002

2234/43

À minha esposa Cláudia
aos meus filhos Júlia e Lucas,
por tudo que significam para mim.

Agradecimentos

Aos meus pais José (Sabiá) e Namir (sempre viva em meu coração), meus irmãos Cláudio e Nanci, meu sogro e sogra (Dr. Sílvio e Dona Madalena), pelo exemplo, carinho e incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Robson Pederiva, pela orientação, amizade, confiança e oportunidade de trabalharmos juntos.

A amiga e companheira de pesquisa Profa. Lane Maria Rabelo Baccarini, pela colaboração.

Aos alunos de Iniciação Científica, Paulo Cézar Monteiro Lamim Filho da FUNREI (hoje Mestrando na UNICAMP), Eder Merlim Garcia e Roberto Roriz Brito, pela colaboração.

Aos professores, funcionários e colegas de pós-graduação da UNICAMP, pelo convívio, amizade e aprendizado.

A equipe do Laboratório de Inteligência Artificial da UFC, pelo consentimento do uso da *shell* Expert SINTA, e ao Prof. Juarez do CEFET-MG pela indicação da mesma.

À Cláudia, Péricles e Cláudio pela revisão ortográfica e ao Prof. Robson pela revisão final.

A *Família Santana* de São João del Rei, especialmente ao *Brother Gilberto*, pela amizade e aos amigos de Campinas (primo Gilson e família) pelos momentos felizes.

À Vitek Consultoria Ltda., pelas valiosas discussões e sugestões.

À Flender do Brasil Ltda., WEG, Tecém Tecnologia Empresarial e CREA-MG, pelo apoio.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da FUNREI pela liberação para realização do Programa de Doutorado, aos professores Geraldo, Marcos e Lincoln e ao Luiz, pelo apoio.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da FUNREI pela liberação do Laboratório onde foram realizados os testes experimentais e ao Sr. Júlio Vieira pelo apoio técnico.

Ao PICD/FUNREI/CAPES pelo auxílio financeiro e à FAPEMIG pela aprovação do Projeto TEC1008/96.

Ao *Plano Espiritual*, especialmente a *Dr. Bezerra de Menezes*, *Dr. Humberto de Campos* e *Caboclo dos Estudantes*, pela assistência espiritual.

Conclusões da Vida

Deus fornece o material
O Homem trabalha

Deus concede o ensinamento
O Homem realiza

Deus cria a paz
O Homem forja o conflito

Deus promove a união
O Homem estabelece o privilégio

Deus recomenda o perdão
O Homem faz o ressentimento

Deus ergue a fé
O Homem cultiva a insegurança

Deus traçou a justiça
O Homem armou a violência

Deus consolidou a coragem
O Homem perpetuou a audácia

Deus abençoa a todos
O Homem faz concessões

Deus garante a liberdade
O Homem usa o livre arbítrio e responde pelas próprias obras.

"A Semente de Mostarda"
Chico Xavier - Emmanuel

Resumo

BRITO, Jorge Nei, *Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 214 p. Tese (Doutorado)

A aplicação de motores elétricos na indústria é extensa, sendo expostos a uma ampla variedade de ambientes e condições, onde o tempo de uso os tornam sujeitos à diversas falhas incipientes. Tais falhas, se não forem detectadas rapidamente, contribuem para a degradação e eventual quebra dos mesmos. Neste trabalho apresenta-se o sistema híbrido *HY_NES*, uma abordagem baseada em técnicas de inteligência artificial (redes neurais artificiais e sistemas especialistas) para diagnosticar falhas de origem mecânica (desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica), elétrica (desequilíbrio de fase e barras quebradas) e a condição normal de funcionamento do motor (assinatura da máquina). Os sinais de vibração foram coletados, aleatoriamente, nas direções vertical, axial e horizontal, lado do acoplamento e lado da ventoinha, formando um banco de dados de 50 testes para cada condição de falha. Um filtro seletivo foi aplicado para reduzir o número de parâmetros representativos dos sinais das excitações durante o treinamento das 72 redes neurais artificiais. Foram implementadas 199 regras no sistema especialista que contemplam o conteúdo heurístico para a saída dessas redes. Os resultados do sistema híbrido *HY_NES* confirmam sua eficiência e o credencia como uma abordagem promissora no diagnóstico *on-line* de falhas em motores de indução trifásicos, podendo também ser incluído em programas de Manutenção Centrada em Confiabilidade.

Palavras Chave

Redes Neurais Artificiais, Sistemas Especialistas, Motores Elétricos, Detecção de Falhas

Abstract

BRITO, Jorge Nei, *Development of a Hybrid Neural/Expert System to Diagnose Faults in Induction Motors*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 214 p. Tese (Doutorado)

The use of electric motors in industry is extensive. These motors are exposed to wide variety of environments and conditions which age the motor and make it subject to incipient faults. These incipient faults, if left undetected, contribute to the degradation and eventual failure of the motors. This investigation introduces the *HY_NES*, a new approach behind a novel hybrid neural/expert system technologies to solve fault detection from mechanical (unbalance, misalignment and mechanical looseness) and electrical (phase unbalances and broken bars) sources beyond the normal condition (motor signature). Those excitations were obtained through experimental tests repeated fifty times randomly for the same conditions for each condition of failure. The signals were acquired in the both sides of the motor on the vertical, horizontal and axial directions. It will be also employed a selective filter used to reduce the number of parameters to represent the signals of excitations during the 72 artificial neural networks training. It was implemented 199 rules in the expert system that can easily provide heuristics reasoning for the artificial neural network outputs. The results obtained confirmed the efficiency of the hybrid system *HY_NES* and its relevance as a promising approach to diagnose faults in induction motors on-line as well as included it in Reliability Based Maintenance programs.

Key Words

Artificial Neural Network, Expert System, Induction Motors, Fault Detection

Índice

Lista de Figuras v

Lista de Tabelas xi

Nomenclatura xiii

1 Introdução 1

2 Principais Fontes de Defeitos nos Motores Elétricos 7

2.1 Síntese das pesquisas realizadas pelo *EPRI* e *IEEE* 7

2.2 Principais falhas de origem elétrica 12

2.2.1 Falhas no estator 14

2.2.2 Falha no rotor 18

2.2.3 Micro soldagem ou flauteamento na pista externa do rolamento 18

2.3 Falhas de origem mecânica 19

2.3.1 Desbalanceamento 19

2.3.2 Desalinhamento 20

2.3.3 Eixo torto ou empenado 21

2.3.4 Folga mecânica 21

2.3.5 Truncamento 21

2.3.6 Mancais 22

2.3.7 Ventilação 23

2.4 Comentários 24

3 Ferramentas e Tecnologias para Análise de Falhas em Motores Elétricos 25

3.1 Identificação da origem da falha 25

3.2 Multímetro 26

3.3 Megômetro ou *Megger* 27

3.4 Teste de índice de polarização 27
3.5 Teste de alto potencial (*Hipot Test*) 28
3.6 Teste da voltagem escalonada (*Step Voltage Test*) 29
3.7 Teste de impulso aplicado em motores (*Surge Test*) 29
3.8 Analisadores modernos de sinais 30
3.9 *MotorStatus* 33
3.10 Analisador *UltraSpec 8000* 34
3.11 Análise de vibração 36
3.12 Análise de corrente 36
3.13 Análise de fluxo magnético 37
3.14 Análise de corrente/voltagem de eixo 37
3.15 Análise térmica normalizada 38
3.16 Termometria 39
3.17 Termografia 40
3.18 Resultados 41
4 Bancada Experimental e Fontes de Excitação 42
4.1 Apresentação da bancada experimental 42
4.2 Detecção das excitações de origem mecânica através da análise de vibração 45
4.2.1 Condição normal de funcionamento 46
4.2.2 Desbalanceamento 47
4.2.3 Desalinhamento 49
4.2.4 Folga mecânica 50
4.3 Detecção de barras quebradas 51
4.3.1 Detecção de barras quebradas através da análise de vibração 52
4.3.2 Detecção de barras quebradas através da análise de corrente 61
4.3.3 Detecção de barras quebradas através da análise de fluxo magnético 62
4.3.4 Resultados da detecção de barras quebradas 65
4.4 Detecção do desequilíbrio de fase 67
4.4.1 Detecção do desequilíbrio de fase através da análise de vibração 68
4.4.2 Detecção do desequilíbrio de fase através da análise de fluxo magnético 72
4.4.3 Resultados da detecção do desequilíbrio de fase 74

5 Sistema Especialista *SE_MIT* 77

5.1 Introdução 77

5.2 Desenvolvimento do *SE_MIT* a partir do *Expert SINTA* 82

5.2.1 Arquitetura de um sistema especialista no *Expert SINTA* 83

5.2.2 Definição da estratégia de diagnóstico 83

5.3 Aplicação do *SE_MIT* 89

5.3.1 Aplicação do *SE_MIT* para diagnóstico de desbalanceamento de 35,1g 90

5.3.2 Aplicação do *SE_MIT* para diagnóstico de 7 barras quebradas 95

5.3.3 Aplicação do *SE_MIT* para diagnóstico do *single phase* 99

5.4 Comentários 103

6 Sistema Híbrido *HY_NES* 104

6.1 Introdução 104

6.2 Desenvolvimento do Sistema Híbrido *HY_NES* 110

6.2.1 Arquitetura do sistema *HY_NES* 110

6.2.2 Módulo *Pré processamento* 112

6.2.3 Módulo *Rede Neural* 117

6.2.4 Módulo *Sistema Especialista* 120

6.3 Resultados do Sistema Híbrido *HY_NES* 122

6.3.1 Resposta do Sistema *HY_NES* para os dados de validação intermediária 127

6.3.1.1 Resposta para identificação da condição normal de funcionamento 127

6.3.1.2 Resposta para identificação da excitação devido à folga mecânica 130

6.3.1.3 Resposta para identificação da excitação devido ao Desb_35,1g 132

6.3.1.4 Resposta para identificação da excitação devido ao Desb_21g 135

6.3.1.5 Resposta para identificação da excitação devido ao desalinhamento 137

6.3.1.6 Resposta para identificação da excitação devido ao *single phase* 140

6.3.1.7 Resposta para identificação da excitação devido ao DF_2 (200 V) 142

6.3.1.8 Resposta para identificação da excitação devido ao DF_1 (200 V) 144

6.3.1.9 Resposta para identificação da excitação devido à 2 BQ 146

6.3.1.10 Resposta para identificação da excitação devido à 3 BQ 149

6.3.1.11 Resposta para identificação da excitação devido à 5 BQ 151

6.3.1.12 Resposta para identificação da excitação devido à 7 BQ 153

6.3.1.13 Avaliação global dos dados da avaliação intermediária 155
6.3.2 Resposta do Sistema *HY_NES* para os dados de validação final 156
6.3.2.1 Resposta para identificação da condição normal de final 157
6.3.2.2 Resposta para identificação da excitação devido à folga mecânica 158
6.3.2.3 Resposta para identificação da excitação devido ao Desb_35,1g 159
6.3.2.4 Resposta para identificação da excitação devido ao Desb_21g 161
6.3.2.5 Resposta para identificação da excitação devido ao desalinhamento 162
6.3.2.6 Resposta para identificação da excitação devido ao *single phase* 163
6.3.2.7 Resposta para identificação da excitação devido ao DF_2 (200 V) 164
6.3.2.8 Resposta para identificação da excitação devido ao DF_1 (200 V) 166
6.3.2.9 Resposta para identificação da excitação devido à 2 BQ 167
6.3.2.10 Resposta para identificação da excitação devido à 3 BQ 168
6.3.2.11 Resposta para identificação da excitação devido à 5 BQ 170
6.3.2.12 Resposta para identificação da excitação devido à 7 BQ 171
6.3.2.13 Avaliação global dos dados da avaliação final 172
7 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros 173
Referências Bibliográficas 176
Anexo I Fundamentos Básicos dos Motores de Indução Trifásicos (MIT) 184
I.1 A natureza do campo magnético girante 184
I.2 Velocidade síncrona e número de pólos 194
I.3 Escorregamento 195
Anexo II Regras do Sistema Especialista *SE_MIT* 196
Anexo III Especificações Técnicas das Tecnologias *CSI* 213

Lista de Figuras

2.1 Vida esperada dos motores elétricos 8

2.2 Falhas nos motores de indução trifásicos (*EPRI*) 9

2.3 Curto-circuito de espiras 14

2.4 Bobina curto-circuitada 14

2.5 Curto-circuito contra massa 15

2.6 Curto-circuito na conexão 15

2.7 Curto-circuito entre fases 16

2.8 Queima por sobrecarga 16

2.9 Queima por rotor bloqueado 16

2.10 Queima por pico de tensão 16

2.11 Falta de fase 17

2.12 Fase danificada por desbalanceamento da tensão da rede 17

2.13 Barras trincadas e quebradas do motor Toshiba d 500 CV 18

2.14 Flauteamento na pista externa do rolamento 18

2.15 Representação do desequilíbrio de massa 19

2.16 Desalinhamento 20

2.17 Tipos de desalinhamento 20

2.18 Forma de onda de um batimento truncado 22

2.19 Elementos do rolamento 22

3.1 Formas de onda gerada pelo *Surge Test* 30

3.2 Pontos de medição 31

3.3 Processamento do sinal 31

3.4 Faixas de freqüência 32
3.5 Freqüência máxima 33
3.6 Número de linhas 33
3.7 *MotorStatus* 34
3.8 Analisador *UltraSpec 8000* 35
3.9 *UltraSpec 8000* e *shaft proble CSI 348SP* 37
3.10 Localização dos pontos de medição 39
3.11 Termograma: desequilíbrio de fase 40
3.12 Termograma: mau contato nas conecções 40
4.1 Bancada experimental 42
4.2 Alinhamento a laser da bancada experimental 44
4.3 Balanceamento e estrutura da bancada experimental 44
4.4 Espectros de vibração para a condição normal de funcionamento 46
4.5 Espectros de vibração para desbalanceamento de 21g 47
4.6 Espectros de vibração para desbalanceamento de 35,1g 48
4.7 Espectros de vibração para desalinhamento 49
4.8 Espectros de vibração para desalinhamento 50
4.9 Detalhes da barra do rotor 51
4.10 Vista do rotor e estator 52
4.11 Rotor com sete barras rompidas 52
4.12 Espectros de vibração para duas barras quebradas, amplitudes em mm/s 53
4.13 Espectros de vibração para duas barras quebradas, amplitudes em dB 54
4.14 Espectros de vibração para três barras quebradas, amplitudes em mm/s 55
4.15 Espectros de vibração para três barras quebradas, amplitudes em dB 56
4.16 Espectros de vibração para cinco barras quebradas, amplitudes em mm/s 57
4.17 Espectros de vibração para cinco barras quebradas, amplitudes em dB 58
4.18 Espectros de vibração para sete barras quebradas, amplitudes em mm/s 59
4.19 Espectros de vibração para sete barras quebradas, amplitudes em dB 60
4.20 Espectros de corrente para duas barras quebradas 61
4.21 Espectros de corrente para três barras quebradas 61
4.22 Espectros de corrente para cinco barras quebradas 62

4.23 Espectros de corrente para sete barras quebradas 62
4.24 Bobina de fluxo fixada axialmente 63
4.25 Espectros de fluxo magnético para duas barras quebradas 63
4.26 Espectros de fluxo magnético para três barras quebradas 64
4.27 Espectros de fluxo magnético para cinco barras quebradas 64
4.28 Espectros de fluxo magnético para sete barras quebradas 65
4.29 Espectros de vibração para desequilíbrio de fase DF_2 = 210V 69
4.30 Espectros de vibração para desequilíbrio de fase DF_1 = 200V 70
4.31 Espectros de vibração para *single phase* 71
4.32 Espectros de fluxo magnético para condição normal de funcionamento 72
4.33 Espectros de fluxo magnético para DF_2 = 210V 73
4.34 Espectros de fluxo magnético para DF_1 = 200V 73
4.35 Espectros de fluxo magnético para *single phase* 74
4.36 Curva de tendência do desequilíbrio de fase para o Teste 18 75
4.37 Curvas de tendência de desequilíbrio de fase - testes escolhidos aleatoriamente 76
5.1 Arquitetura simplificada 83
5.2 Fluxograma para diagnóstico através da análise de vibração (mm/s) 85
5.3 Fluxograma para diagnóstico através da análise de vibração (dB) 87
5.4 Fluxograma para diagnóstico através da análise de corrente (dB) 88
5.5 Fluxograma para diagnóstico através da análise de fluxo magnético (dB) 89
5.6 Espectro de vibração para diagnóstico de desbalanceamento de 35,1g 90
5.7 Definição do tipo de tecnologia (Desb_35,1g) 90
5.8 Definição da unidade do eixo das amplitudes (Desb_35,1g) 91
5.9 Definição da posição do sensor (Desb_35,1g) 91
5.10 Definição da freqüência determinística (Desb_35,1g) 91
5.11 Comportamento das amplitudes nas freqüências determinísticas (Desb_35,1g) 92
5.12 Comportamento das amplitudes em 1 x f_r (Desb_35,1g) 92
5.13 Comportamento das amplitudes em 2 x f_r (Desb_35,1g) 92
5,14 Comportamento das amplitudes em 3 x f_r (Desb_35,1g) 93
5.15 Comportamento das amplitudes dos harmônicos em 1 x f_r (Desb_35,1g) 93
5.16 Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico mecânico (Desb_35,1g) 93

5.17 Confirmação do diagnóstico mecânico (Desb_35,1g) 94
5.18 Presença de bandas laterais em torno de 1 x f_r (Desb_35,1g) 94
5.19 Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico elétrico 95
5.20 Confirmação do diagnóstico elétrico 95
5.21 Espectro de corrente para sete barras quebradas 96
5.22 Definição do tipo de tecnologia (7_bq) 96
5.23 Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico mecânico 97
5.24 Confirmação do diagnóstico mecânico 97
5.25 Definição da unidade do eixo das amplitudes (7_bq) 98
5.26 Definição da posição do sensor (7_bq) 98
5.27 Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico elétrico (7_bq) 98
5.28 Confirmação do diagnóstico elétrico (7_bq) 99
5.29 Espectro de corrente para *single phase* 99
5.30 Definição do tipo de tecnologia (*single phase*) 100
5.31 Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico mecânico 100
5.32 Confirmação do diagnóstico mecânico 101
5.33 Definição da unidade do eixo das amplitudes (*single phase*) 101
5.34 Comparação das amplitudes de 1 x f_l + 2 x f_r (*single phase*) 101
5.35 Verificação de barras quebradas, diferença entre f_l - 2 x f_s (*single phase*) 102
5.36 Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico elétrico (*single phase*) 102
5.37 Confirmação do diagnóstico elétrico (*single phase*) 103
6.1 Esquema representativo de um neurônio 106
6.2 Arquitetura do programa *HY_NES* 111
6.3 Tela de apresentação do programa *HY_NES* 112
6.4 Tela do módulo *Pré processamento* 113
6.5 Testes realizados no módulo *Analyze* do *UltraSpec 8000* 114
6.6 Detalhamento dos espectros do Teste 10 114
6.7 Tela do *UltraManager* com a opção *Analyze Reports* ativada 115
6.8 Exemplo de um arquivo gerado pelo *Analyze Reports* 115
6.9 Tela do módulo *Rede Neural* 117
6.10 Arquivo *Resposta.txt* da matriz resposta do diagnóstico via redes neurais 120

6.11 Tela do módulo *Sistema Especialista* 121
6.12 Tela da resposta do *Sistema Especialista* para o arquivo *7bq_v_8.txt* 121
6.13 Fluxograma do processo de diagnóstico 124
6.14 Arquitetura da *RNA 8x5x3* para condição normal de funcionamento 125
6.15 Arquitetura da *RNA 8x5x3* para as excitações de origem mecânica 126
6.16 Arquitetura da *RNA 8x5x3* para 3, 5 e 7 barras quebradas 126
6.17 Arquitetura da *RNA 3x3x3* para 2 barras quebradas, *single phase*, DF_1 e DF_2 127
6.18 Resultados do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_SemDef_V2* 129
6.19 Resultados do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_FolMec_V7* 131
6.20 Resultados do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_Desb35,1g_V7* 134
6.21 Resultados do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_Desb21g_V5* 136
6.22 Resultados do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_Desali_V7* 139
6.23 Resultados do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_SP_V7* 141
6.24 Resultados do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ DF_2_V4* 143
6.25 Resultados do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ DF_1_V4* 146
6.26 Resultados do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ 2BQ_V1* 148
6.27 Resultados do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ 3BQ_V3* 150
6.28 Resultados do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ 5BQ_V3* 152
6.29 Resultados do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ 7BQ_V3* 154
6.30 Saída do Sistema *HY_NES* - condição normal de funcionamento 157
6.31 Avaliação do *HY_NES* de acordo com "usuário" - sem defeito 158
6.32 Saída do Sistema *HY_NES* - folga mecânica 159
6.33 Saída do Sistema *HY_NES* - desbalanceamento 35,1g 160
6.34 Saída do Sistema *HY_NES* - desbalanceamento 21g 161
6.35 Saída do Sistema *HY_NES* - desalinhamento 162
6.36 Avaliação do *HY_NES* de acordo com "usuário" - desalinhamento 163
6.37 Saída do Sistema *HY_NES* - *single phase* 163
6.38 Avaliação do *HY_NES* de acordo com "usuário" - *single phase* 164
6.39 Saída do Sistema *HY_NES* - desequilíbrio de fase DF_2 165
6.40 Avaliação do *HY_NES* de acordo com "usuário" - desequilíbrio de fase DF_2 165
6.41 Saída do Sistema *HY_NES* - desequilíbrio de fase DF_1 166

6.42 Avaliação do *HY_NES* de acordo com "usuário" - desequilíbrio de fase DF_1 167
6.43 Saída do Sistema *HY_NES* - 2 barras quebradas 167
6.44 Avaliação do *HY_NES* de acordo com "usuário" - 2 barras quebradas 168
6.45 Saída do Sistema *HY_NES* - 3 barras quebradas 169
6.46 Avaliação do *HY_NES* de acordo com "usuário" - 3 barras quebradas 169
6.47 Saída do Sistema *HY_NES* - 5barras quebradas 170
6.48 Saída do Sistema *HY_NES* - 7 barras quebradas 171
6.49 Avaliação do *HY_NES* de acordo com "usuário" - global 172
I.1 Estator da máquina de indução trifásica 190
I.2 Rotor de gaiola 190
I.3 Vista explodida do motor de indução trifásico de rotor gaiola 191
I.4 Deslocamento espacial dos enrolamentos aa', bb' e cc' 192
I.5 Correntes instantâneas i_a, i_b e i_c 192
I.6 Fluxos produzidos pelos condutores nas diversas fases 193

Lista de Tabelas

2.1 Principais resultados sobre confiabilidade de motores elétricos, Santos (2000) 11

2.2 Vibração magnética girante e estacionária em motores de indução, Bate (1998) 13

2.3 Depuração da vibração magnética em motores de indução, Bate (1998) 13

2.4 Diferentes fontes de corrente em eixos, Coelho Jr. (1994) 19

3.1 Valores de índice de polarização 28

4.1 Severidade e recomendações para análise de corrente 66

4.2 Resultados da excitação de barras quebradas através da análise de vibração 66

4.3 Resultados da excitação de barras quebradas através da análise de corrente e fluxo 67

4.4 Desequilíbrio de fase através da análise de vibração 74

6.1 Testes para obtenção da melhor arquitetura 123

6.2 *EQM* de treinamento e qualificação - condição normal de funcionamento 128

6.3 Resposta das redes neurais - condição normal de funcionamento 128

6.4 Desempenho das regras - condição normal de funcionamento 130

6.5 *EQM* de treinamento e qualificação - folga mecânica 130

6.6 Resposta das redes neurais - folga mecânica 131

6.7 Desempenho das regras - folga mecânica 132

6.8 *EQM* de treinamento e qualificação - desbalanceamento 35,1g 132

6.9 Resposta das redes neurais - desbalanceamento 35,1g 133

6.10 Desempenho das regras - desbalanceamento 35,1g 134

6.11 *EQM* de treinamento e qualificação - desbalanceamento 21g 135

6.12 Resposta das redes neurais - desbalanceamento 21g 136

6.13 Desempenho das regras - desbalanceamento 21g 137

6.14 *EQM* de treinamento e qualificação - desalinhamento 137

6.15 Resposta das redes neurais - desalinhamento 138
6.16 Desempenho das regras - desalinhamento 139
6.17 *EQM* de treinamento e qualificação - *single phase* 140
6.18 Resposta das redes neurais - *single phase* 141
6.19 Desempenho das regras - *single phase* 142
6.20 *EQM* de treinamento e qualificação - desbalanceamento de fase DF_2 142
6.21 Resposta das redes neurais - desbalanceamento de fase DF_2 143
6.22 Desempenho das regras - desbalanceamento de fase DF_2 144
6.23 *EQM* de treinamento e qualificação - desbalanceamento de fase DF_1 144
6.24 Resposta das redes neurais - desbalanceamento de fase DF_1 145
6.25 Desempenho das regras - desbalanceamento de fase DF_1 146
6.26 *EQM* de treinamento e qualificação - 2 barras quebradas 147
6.27 Resposta das redes neurais - 2 barras quebradas 147
6.28 Desempenho das regras - 2 barras quebradas 148
6.29 *EQM* de treinamento e qualificação - 3 barras quebradas 149
6.30 Resposta das redes neurais - 3 barras quebradas 150
6.31 Desempenho das regras - 3 barras quebradas 151
6.32 *EQM* de treinamento e qualificação - 5 barras quebradas 151
6.33 Resposta das redes neurais - 5 barras quebradas 152
6.34 Desempenho das regras - 5 barras quebradas 153
6.35 *EQM* de treinamento e qualificação - 7 barras quebradas 153
6.36 Resposta das redes neurais - 7 barras quebradas 154
6.37 Desempenho das regras - 7 barras quebradas 155
6.38 Resposta das redes neurais - testes de validação intermediária 156
6.39 Desempenho do sistema especialista - testes de validação intermediária 156
6.40 Desempenho da validação final dos sensores - condição normal de funcionamento 158
6.41 Desempenho da validação final dos sensores - folga mecânica 159
6.42 Desempenho da validação final dos sensores - desbalanceamento 35,1g 160
6.43 Desempenho da validação final dos sensores - desbalanceamento 21g 161
6.44 Desempenho da validação final dos sensores - desalinhamento 162
6.45 Desempenho da validação final dos sensores - *single phase* 164

6.46 Desempenho da validação final dos sensores - desbalanceamento de fase DF_2 165
6.47 Desempenho da validação final dos sensores - desbalanceamento de fase DF_1 166
6.48 Desempenho da validação final dos sensores - 2 barras quebradas 168
6.49 Desempenho da validação final dos sensores - 3 barras quebradas 169
6.50 Desempenho da validação final dos sensores - 5 barras quebradas 170
6.51 Desempenho da validação final dos sensores - 7 barras quebradas 171
6.52 Desempenho da validação final dos sensores - global 172
I.1 Velocidade síncrona

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Nomenclatura

AVV	acoplado, lado da ventoinha, direção vertical	-
AHV	acoplado, lado da ventoinha, direção horizontal	-
AAV	acoplado, lado da ventoinha, direção axial	-
AVA	acoplado, lado do acoplamento, direção vertical	-
AHA	acoplado, lado do acoplamento, direção horizontal	-
AAA	acoplado, lado do acoplamento, direção axial	-
b	bias	-
β	ângulo de contato do rolamento	[grau]
d	diâmetro da esfera ou rolo do rolamento	[mm]
D	diâmetro primitivo do rolamento	[mm]
D_e	diâmetro externo do rolamento	[mm]
DF_1	desequilíbrio de fase 200 V	[V]
DF_2	desequilíbrio de fase 210 V	[V]
EQM	erro quadrático médio	[%]
f_l	freqüência de linha	[Hz]
f_r	freqüência de rotação do rotor	[Hz]
f_s	freqüência de escorregamento	[Hz]
k_e	ordem da excentricidade	-
p	número de pólos	-
R_s	número de ranhuras do rotor	
s	escorregamento	[Hz]
SP	*single phase*	[V]
TSO	temperatura da carcaça (lado oposto do acoplamento)	[^{0}C]
TSC	temperatura do centro da carcaça	[^{0}C]

TAF	temperatura ambiente da base de fixação	[^{0}C]
TBI	temperatura do rolamento (lado do acoplamento)	[^{0}C]
TBO	temperatura do rolamento (lado oposto ao acoplamento)	[^{0}C]
TTH	temperatura da caixa de ligação	[^{0}C]
TCP	temperatura do acoplamento	[^{0}C]
ω	freqüência de linha	[rd/s]

Capítulo 1

Introdução

A aplicação de motores elétricos na indústria é extensa, sendo estes expostos a uma ampla variedade de ambientes e condições, onde o tempo de uso os torna sujeitos à diversas falhas incipientes. Tais falhas, se não forem detectadas rapidamente, contribuem para a degradação e eventual quebra dos mesmos. O monitoramento, diagnóstico e detecção destas falhas são tópicos importantes e difíceis no campo da engenharia. Seu interesse justifica-se pela economia gerada através de sua prevenção antes da ocorrência, Chow (1997).

Os motores de indução trifásicos são largamente utilizados nos acionamentos de bombas, compressores, ventiladores, equipamentos para processamento e manuseio de cargas e em várias outras diferentes aplicações na indústria, devido à sua solidez e versatilidade. Vários artigos têm sido escritos, destacando-se as questões chaves relativas à confiabilidade e ao custo efetivo de operação dos motores que são: a alta qualidade, o conhecimento minucioso da aplicação, a escolha certa do tipo do motor para uma aplicação específica e a manutenção correta.

Embora as máquinas rotativas sejam usualmente bem construídas e robustas, a possibilidade de falhas incipientes é inerente. Falhas incipientes dentro das máquinas geralmente afetam o seu desempenho antes mesmo que falhas mais significativas ocorram, Timperley (1883), Sood, Fash *et al.* (1985[a,b]), Bate (1987), Douglas, Edmonds *et al.* (1988), Reason (1988), Chow e Yee (1990), Chow e Yee (1991), Bonnett e Soukup (1992), Gupta e Culbert (1992), Chow, Sharp *et al.* (1993), Sottile e Kohler (1993), Trutt, Cruz *et al.* (1993), Campbell, Stone *et al.* (1994), Finley e Burke (1994), Murry e Mitchell (1994), Timperley e Michalec (1994), Cameron *et al.* (1996).

A detecção de falhas antecipada, permite que a manutenção preventiva seja realizada durante a parada programada das máquinas. Este procedimento evita um período de parada longo, devido a uma falha comum no motor, aumentando a disponibilidade do sistema. Com métodos próprios de monitoramento e detecção de falhas, o custo de manutenção dos motores pode ser bastante reduzido e a sua disponibilidade significativamente melhorada.

Os motores podem ser expostos a diferentes tipos de ambientes agressivos, operação imprópria e defeitos de fabricação. Falhas internas (barras quebradas, rolamentos danificados, curto-circuito, etc.), assim como falhas externas (sobrecarga mecânica, desequilíbrio de fase, rotor bloqueado, etc.) são inevitáveis. Além disso, a degradação do isolamento dos motores elétricos operando dentro de ambientes agressivos pode ser acelerada, tornando-os ainda mais susceptíveis a falhas incipientes, Boothman *et al.* (1974), Burke, Douglas *et al.* (1983), Cambrias e Rittenhouse (1988), Edmonds *et al.* (1988), LaForte, McCoy, *et al.* (1988), Schump (1989), Tavner e Penman (1989), Fenton, Gott *et al.* (1992), Benbouzid *et al.* (1999), Riley *et al.* (1999).

Se as falhas incipientes ou a deterioração gradual não forem detectadas, poderão provocar a quebra do motor causando prejuízos e transtornos. Várias falhas podem ser evitadas se a aplicação, condição de trabalho e origem das falhas forem compreendidos, Maier (1992). A confiabilidade exigida para os motores elétricos crescem constantemente devido à importância de suas aplicações e do avanço tecnológico.

Vários autores têm discutido a importância e o ganho econômico do monitoramento *on-line* e dos métodos de detecção de falhas para motores elétricos. Em geral, os métodos de análise de custo-benefício têm sido aplicados para examinar a viabilidade econômica de tais métodos. Pailetti e Rose (1989) e Siyambalapitiya e Mclaren (1990) apresentaram um método para avaliar o aumento da disponibilidade de máquinas através destes métodos de monitoramento.

Segundo Chow (1997), atualmente existem dois métodos principais para detecção de falhas em motores elétricos: Método Baseado em Modelo e Método Baseado em Conhecimento. O primeiro, baseia-se em modelos matemáticos de um sistema de interesse e nem sempre é robusto o suficiente na presença de ruídos ou outras perturbações, Chow e Yee (1990) e Trutt *et al.* (1993). O segundo, tem como objetivo ensinar a máquina a imitar o conhecimento e a intuição humana a fim de que ela tome a decisão que um ser humano tomaria.

O Método Baseado em Conhecimento, principal interesse deste trabalho, caracteriza-se pela utilização de técnicas de Inteligência Artificial tais como: rede neural artificial (*RNA*), lógica *fuzzy* (*LF*), sistemas especialistas (*SE*), sistemas híbridos (*RNA/SE*, *RNA/LF*, ou até mesmo, *SE/SE*), Chow e Yee (1990 e Costello (1994).

A aplicação dessas técnicas de Inteligência Artificial na detecção de falhas possibilita a realização do diagnóstico *on line* por um computador, podendo apresentar uma interação mínima com o usuário e, em muitos casos, sendo capazes de diagnosticar falhas sem a ajuda dos especialistas da manutenção.

Dessa forma, nos últimos anos, estas técnicas vêem substituindo as metodologias convencionais de diagnóstico de falhas em motores elétricos. Seu uso crescente é fruto, principalmente, do grande desenvolvimento e disponibilidade dos recursos computacionais, do custo referente às consultorias pagas aos especialistas humanos e do rápido avanço tecnológico.

Vários trabalhos mostram que a tecnologia emergente das redes neurais artificiais tem sido usada com sucesso na detecção de problemas em motores elétricos, Chow e Yee (1990), Chow *et al.* (1991), Chow e Yee (1991), Goode e Chow (1993), Chow e Goode (1993), Chow *et al.* (1993), Chow (1994), Paul e Chow (1995), Schoen *et al.* (1995), Chow, (1997), Li *et al.* (1997), Chow *et al.* (1998), Filippetti *et al.* (1998) e Altug *et al.* (1999).

Benbouzid (1999), fez uma revisão bibliográfica sobre detecção e diagnóstico de falhas em motores elétricos no período de 1975 a 1999. São citados 5 livros, 217 *workshops* e conferências e 143 artigos técnicos. Este significativo número de publicações nos dá a certeza da importância do trabalho desenvolvido.

O objetivo deste trabalho é consolidar a aplicação de técnicas preditivas e desenvolver técnicas computacionais, baseadas na inteligência artificial, para detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos, visando sua inclusão em programas de Manutenção Preditiva.

O interesse pelo estudo de falhas em motores elétricos, através da aplicação de técnicas preditivas, iniciou-se em 1996. Neste ano foi enviado à FAPEMIG, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, o Projeto TEC 1008/96. Com sua aprovação, foi possível

adquirir o equipamento *UltraSpec 8000*, com várias tecnologias preditivas e periféricos, que possibilitaram uma série de estudos.

As primeiras investigações foram desenvolvidas dentro do programa de Iniciação Científica da FUNREI, Fundação de Ensino Superior de São João del Rei. A detecção de falhas de origem elétrica (*single phase*) e mecânica (folga mecânica), foram apresentadas por Júnior (1998). As excitações foram introduzidas num motor de indução trifásico, montado numa bancada dinamométrica, sendo os sinais coletados através da análise de vibração e análise da corrente elétrica. Novas investigações foram realizadas e apresentadas por Brito e Brito *et al.* (1999[a,b]). Além das excitações citadas, introduziu-se desbalanceamento, desalinhamento e a interação entre eles. Os testes foram realizados numa nova bancada, ainda sem a robustez desejada, numa série de cinco séries de testes. Essas investigações iniciais foram importantes para a familiarização com o equipamento, aplicação das técnicas preditivas, acertos nas bancadas de testes e simulação das falhas.

A implantação da manutenção preditiva na FIAT Automóveis, fruto de uma orientação de estágio supervisionado, Filho (2001), proporcionou a ligação entre a teoria e prática. Os conhecimentos adquiridos nos testes realizados em laboratório (quatro motores de 5 CV) somaram-se aos adquiridos na planta industrial (50 motores com potências variando de 40 a 272 CV), sendo os procedimentos de testes e respostas, iguais em ambas situações. Além da análise de vibração e análise de corrente, neste trabalho aplicou-se a análise de fluxo magnético, análise de corrente/tensão parasita no eixo do motor, termografia e termometria. O plano de manutenção preditiva para o maquinário da unidade *Motor Fire* da FIAT Automóveis foi apresentado por Filho *et al.* (2000).

Nos meses de julho, agosto e setembro de 2000 foram realizados testes experimentais, no Laboratório de Conservação de Energia da FUNREI (Fundação de Ensino Superior de São João del Rei). Uma terceira bancada foi montada, onde sua robustez garantiu a repetibilidade dos testes sob as mesmas condições, possibilitando a montagem de um banco de dados para o desenvolvimento do sistema inteligente híbrido para diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos. Destaca-se o interesse pela aplicação de técnicas de inteligência artificial como fruto da proposta de doutorado, sendo um campo totalmente novo a ser explorado.

Brito *et al.* (2001[a]), apresentaram o desenvolvimento de um Sistema Especialista para diagnosticar problemas em motores de indução trifásico, com o objetivo de ajudar os profissionais da área de manutenção na tarefa de interpretar os espectros coletados através de técnicas preditivas (análise de vibração, análise de corrente e análise de fluxo magnético). Os problemas diagnosticáveis podem ser de origem mecânica (folga mecânica, desalinhamento e desbalanceamento), de origem elétrica (barras quebradas e desequilíbrio de fase) e a condição normal de funcionamento.

Baccarini *et al.* (2001), apresentaram a influência do desequilíbrio de fase no comportamento dinâmico de motores de indução trifásico a partir de resultados experimentais, obtidos em uma bancada de teste, identificando-se suas freqüências determinísticas. Os espectros de vibração e de fluxo magnético foram coletados para a condição normal de funcionamento e com a introdução dos desequilíbrios de fase. Através destas técnicas, foi possível detectar e diagnosticar o desequilíbrio das fases do sistema de alimentação do motor dando uma contribuição para o aprimoramento da Manutenção Preditiva nas plantas industriais

Brito *et al.* (2001[b]), apresentaram uma contribuição ao estudo e caracterização de forças de excitação em motores de indução trifásico, usando redes neurais artificiais treinadas a partir dos sinais de vibração experimentais. A metodologia desenvolvida foi usada para classificar as seguintes condições: operação normal, desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica. Através de um filtro seletivo foi possível reduzir o número de parâmetros capazes de representar os sinais utilizados para o treinamento das redes neurais artificiais. Foram mostrados os resultados de treinamento e de qualificação para as arquiteturas de rede 3x5x3 e 5x10x5.

No Capítulo II, apresenta-se uma síntese das pesquisas realizadas pelo *Electric Power Research Institute* (*EPRI*) e *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.* (*IEEE*) e as principais fontes de falhas nos motores de indução trifásicos.

Quando uma suspeita de falha elétrica é diagnosticada num espectro de vibração, o profissional de manutenção deve procurar a real causa do problema. A escolha da ferramenta e da técnica é muitas vezes uma tarefa difícil, principalmente levando-se em consideração o custo dos equipamentos e a implantação da Manutenção Preditiva numa planta industrial. Na dúvida da

origem do problema, elétrico ou mecânico, que ferramenta e qual tecnologia usar? Neste sentido, o Capítulo III apresenta um procedimento orientativo que poderá ajudar a estes profissionais na escolha da ferramenta e tecnologia que os levará ao diagnóstico do problema.

No Capítulo IV, apresenta-se a bancada experimental e os espectros coletados através da análise de vibração, análise de corrente e análise de fluxo magnético. Os experimentos foram realizados para a condição normal de funcionamento e para as excitações de origem elétrica e mecânica.

No Capítulo V, apresenta-se uma introdução aos Sistemas Especialistas e a fundamentação teórica necessária para a construção do *SE_MIT (Sistema Especialista para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos)*, desenvolvido a partir da *shell Expert SINTA*.

No Capítulo VI, apresenta-se uma introdução às Redes Neurais Artificiais (*RNA*) e a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do sistema *HY_NES* (*Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos*).

As conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo VII. No Anexo I, tem-se um resumo dos fundamentos básicos dos motores de indução trifásicos. No Anexo II, tem-se as especificações técnicas das tecnologias *CSI* (*Computational Systems Incorporated*) utilizados nos testes experimentais. No Anexo III, tem-se as regras do *SE_MIT*.

Capítulo 2

Principais Fontes de Defeitos nos Motores Elétricos

Neste capítulo apresenta-se uma síntese das pesquisas realizadas pelo *Electric Power Research Institute* (*EPRI*) e *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.* (*IEEE*) e as principais fontes de falhas nos motores de indução trifásicos.

2.1 Síntese das pesquisas realizadas pelo *EPRI* e *IEEE*

Muito embora, em alguns casos pontuais, tenham sido identificados os mecanismos específicos relativos à ocorrência de falhas, até o início dos anos sessenta esse conhecimento era apenas qualitativo. Não existia, até este período, nenhuma documentação estatística que permitisse aos fabricantes e usuários dispor de uma referência sobre falhas nos motores elétricos, Santos (2000).

Dickinson (1962), publicou o primeiro estudo referente à confiabilidade dos equipamentos elétricos utilizados em instalações industriais. A atualização e ampliação deste estudo foi publicado pelo *IEEE* (1974), num extenso trabalho que foi dividido em seis partes. Cada parte abrange um aspecto específico relativo à análise de confiabilidade em instalações industriais.

Um resumo dos dados estatísticos de maior interesse, referente a este trabalho e publicado na norma técnica *IEEE* (1980), concluiu que a manutenção inadequada (17%) e os defeitos de fabricação (15%) são os principais fatores que influenciam a ocorrência de falhas em motores elétricos. O isolamento dos enrolamentos (50%) e os mancais (29%), constituem as partes mais afetadas.

Comparando estes dados com o estudo anterior, registra-se uma redução significativa do valor de taxas de falhas, não só nos motores elétricos, mas também nos disjuntores, cabos e geradores. Devido a algumas imprecisões, resultantes da insuficiência de dados, particularmente no domínio de motores, um outro estudo foi elaborado.

Neste novo estudo, os motores elétricos passaram a constituir o único equipamento elétrico em análise. Foram coletados dados num universo de 1.141 motores, com potência superior a 200 HP com menos de 15 anos de uso. As principais conclusões deste trabalho foram a redução das imprecisões e a confirmação das tendências citadas anteriormente.

A manutenção inadequada (21,4%) e os defeitos de fabricação (20,1%), permaneceram como os principais fatores que influenciam a ocorrência de falhas em motores elétricos. Os mancais passaram a ser os componentes com maior número de falhas. No geral, as taxas de falhas apresentaram valores significativamente superiores ao trabalho publicado pelo *IEEE* (1974).

Além destes trabalhos realizados pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE)*, outros institutos tais como o *Electric Power Research Institute (EPRI)* e *Edison Electric Institute (EEI)*, também desenvolveram seus estudos, Santos (2000).

Na Figura 2.1 tem-se a vida esperada em anos dos motores elétricos, sendo a média geral de 13,27 anos, Almeida e Góz (1994).

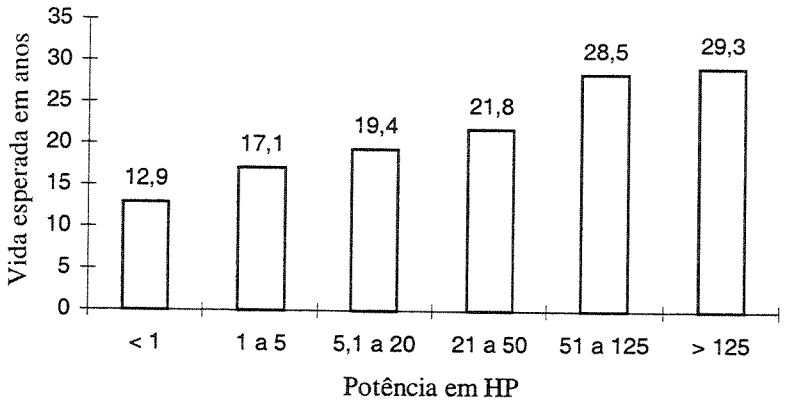


Figura 2.1 - Vida esperada dos motores elétricos.

Em 1983, sob os cuidados do *EPRI* e realizado pela *General Electric*, foi publicado um estudo referente a 4.797 motores. São motores utilizados em diversas centrais de produção de

energia elétrica e com potências superiores a 100 HP. Na Figura 2.2 tem-se a distribuição relativa das falhas registradas, segundo as áreas mais afetadas.

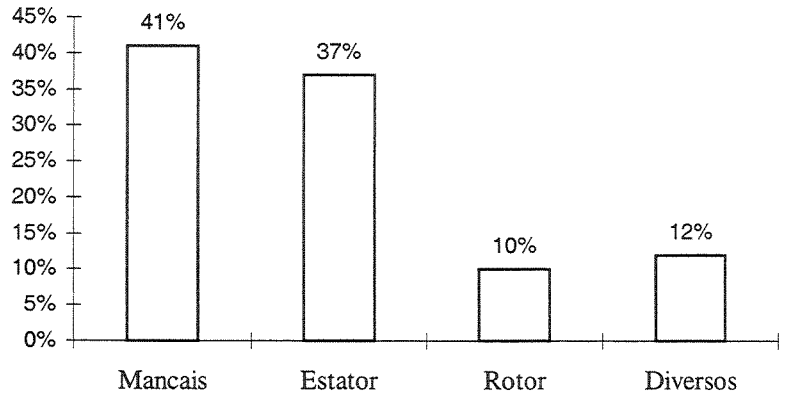


Figura 2.2 - Defeitos nos motores de indução trifásicos (*EPRI*).

Com a publicação do trabalho realizado pelo *EPRI*, surgiu a possibilidade de confrontar algumas conclusões anteriormente obtidas nos estudos realizados pelo *IEEE*. Consequentemente, nos anos seguintes, vários trabalhos foram publicados. Ao mesmo tempo, os estudos publicados pela *IEEE* e *EPRI* também foram atualizados.

Em 1984, o *IEEE* publicou uma versão mais detalhada dos dados apresentados anteriormente. O objetivo deste estudo era extrair conclusões adicionais e responder algumas questões levantadas na primeira publicação. Destaca-se o detalhamento dos diversos dados relativos aos motores de indução e a análise dos efeitos da manutenção inadequada na confiabilidade de vários componentes.

Em 1985, o *EPRI* também publicou uma nova versão dos estudos apresentados anteriormente. O universo de motores é de 6312, contribuindo significativamente para uma maior precisão das análises efetuadas. Em relação à versão inicial, registram-se apenas ligeiras alterações dos diversos índices analisados, sem grandes influências nas tendências observadas anteriormente.

Em 1986, o *IEEE* publicou uma nova versão, ainda mais detalhada, enfocando determinadas áreas específicas, não exploradas na sua totalidade nas versões anteriores.

Destacam-se neste estudo os fatores que mais influenciaram a ocorrência de falhas em motores localizados tanto em ambientes externos como internos.

Na Tabela 2.1 tem-se um resumo comparativo dos principais resultados obtidos pelo *IEEE* e *EPRI*. Embora os dados apresentem características distintas (tipo de aplicações, número total de motores e faixas de potências consideradas), ainda assim é possível comparar alguns resultados.

Tomando apenas os motores de indução de rotor de gaiola de esquilo, conclui-se que as falhas relativas aos mancais e aos enrolamentos estatóricos constituem, aproximadamente, três quartos do número total registrado. Já as falhas relativas ao rotor, apresentaram apenas 10% deste valor.

As duas entidades são concordantes quanto as áreas em que ocorrem mais falhas. O mesmo não ocorre quanto a identificação das causas mais prováveis e quanto ao valor do índice de ocorrência.

Em estudos apresentados na mesma época, o índice de falha determinado pelo *EPRI* corresponde, aproximadamente à metade do valor apresentado pelo *IEEE*. O critério apresentado pelo *EPRI* considera a ocorrência apenas na primeira falha, apresentando uma distribuição distinta da ocorrência de falhas subsequentes. Considerando-se o número total de falhas, ainda assim, o valor da taxa correspondente continuaria sendo inferior ao obtido nos estudos do *IEEE*. São os fatores responsáveis pela ocorrência de falhas que tornam as diferenças dos estudos mais significativas.

A instalação em condições deficientes, bem como a execução imprópria dos testes de pré-operação, aparecem nos estudos do *IEEE* como um percentual significativo atribuído a "outras causas". Estes dados não foram levados em consideração nos estudos do *EPRI*. Na Tabela 2.1, ainda são incluídos diversos resultados obtidos pelo *IEEE*, relativos a determinadas áreas específicas, os quais devem ser analisados separadamente.

Pode-se concluir que em ambientes externos a utilização inadequada é a principal causa de avarias. Em ambientes internos, os defeitos de fabricação e a manutenção são as principais causas de falha.

Tabela 2.1 - Resumo dos principais resultados obtidos nos estudos sobre confiabilidade de motores elétricos, Santos (2000).

	Dickinson		*IEEE*					*EPRI*	
	1962 [1]		1974	1980	1984	1986		1983	1985
Número de instalações	66	58	68	75	75	75		132	168
Número de empresas	33	33	30	33	33	33		56	65
Número de motores	-	-	5.631	1.141	1.141	1.141		4.797	6.312
Potência (HP)	< 200	> 250	> 50	> 200	> 200	> 200		> 100	> 100
Tempo de uso (anos)	-	-	> 10 (65%)	< 15	< 15	< 15		10	10
Unidade/ano	185.686	1.932	42.463	5.085	5.085	5.085		[2]	[2]
Total de avarias (média)	-	-	561	360	360	360		1.221	1.221
Taxa de avarias	0,0513	0,1087	0,0132	0,0708	0,0708	0,0708		0,034 [2]	0,0313 [2]
Causas de avarias					[1]	[3]	[4]		
Defeitos de fábrica	-	-	15	20,1	20,3	22,8	20,5	32,8	31,1
Funcionamento impróprio	-	-	4	3,6	3,3	1,3	1,0	-	-
Erros de operadores	-	-	0	6,8	5,7	2,5	8,1	-	-
Funcionamento inadequado	-	-	4 [6]	10,4 [6]	9,0 [6]	3,8 [6]	9,1 [6]	10,2	10,2
Adaptação motor-carga	-	-	-	4,9	4,9	6,3	4,8	-	-
Proteção elétrica inadequada	-	-	-	5,8	5,3	10,1	1,4	-	-
Proteção física inadequada	-	-	-	6,1	6,5	7,6	6,2	-	-
Utilização inadequada	-	-	9	16,8 [6]	16,7 [6]	24,0 [6]	12,4 [6]	6,8	6,1
Manutenção inadequada		-	17	21,4	22,8	16,5	25,2	-	-
Instalação e testes deficientes	-	-	1	12,9	15,9	11,4	14,3	-	-
Agentes externos	-	-	1	3,9	2,8	2,5	4,8	-	-
Transporte inadequado	-	-	0	0,6	0,8	1,3	0	-	-
Outras, não especificadas	-	-	53	13,9	11,7	17,7	13,7	50,2	52,6
Componentes avariados ou áreas afetadas (%)				[1]	[5]				
Mancais	-	-	29	50,0	59,6	-	-	41	41
Estator, enrolamentos	-	-	50	24,7	25,4	-	-	37	36
Rotor, acoplamentos	-	-	4	8,9	1,4	-	-	10	9
Escovas e anéis	-	-	-	0	8,5	-	-	-	-
Acessórios, outros	-	-	17	16,4	5,1	-	-	12	14
Total de avarias considerado	-	-	561	304	71	-	-	872	1.052

Na Tabela 2.1 tem-se a seguinte legenda: [1] considerando apenas o motor de indução; [2] dados contraditórios; [3] instalações em ambientes internos; [4] instalações em ambientes externos; [5] devido apenas à manutenção inadequada e [6] com base na contagem da primeira avaria.

2.2. Principais falhas de origem elétrica

As vibrações causadas por falhas de origem elétrica são normalmente o resultado de forças magnéticas desequilibradas. Estas forças agem sobre o rotor e estator e podem ser devidos a: mancais do eixo do rotor excêntricos, barras do rotor trincadas ou quebradas, rotor não centrado dentro do estator, furo do estator elíptico e ventoinhas quebradas ou defeituosas.

Geralmente, a freqüência de vibração relacionada com as falhas do rotor se manifesta em uma vez a freqüência de rotação do rotor ($1 \times f_r$) e quase sempre com bandas laterais de duas vezes a freqüência de escorregamento do rotor ($2 \times f_s$)

A freqüência de vibração relacionada com as falhas do estator se manifesta em duas vezes a freqüência de linha ou de rede ($2 \times f_l$), Bate (1987).

Na Tabela 2.2 tem-se as falhas de origem magnéticas classificadas como girantes e estacionárias e na Tabela 2.3 tem-se um guia de depuração dessas vibrações.

Na Tabela 2.3 tem-se as seguintes identificações: [1] aquecimentos localizados no estator podem ser causados por curto-circuito no ferro, [2] aquecimentos localizados no rotor podem ser causados por curto-circuito no ferro ou barras quebradas ou trincadas, [3] componentes observadas na prática, ω é a freqüência de linha, n é qualquer número inteiro, R_s é o número de ranhuras do rotor, s é o escorregamento, p é o número de pólos, k_e é a ordem da excentricidade sendo zero para excentricidade estática e um valor inteiro menor para excentricidade dinâmica e k_l é igual a zero ou infinito.

Tabela 2.2 - Vibração magnética girante e estacionária em motores de indução, Bate (1987).

Tipo de falha	Estacionária ($2 \times f_l$)	Girante ($1 \times f_r \pm 2 \times f_s$)
Variações do *gap* de ar	- excentricidade estática	- excentricidade dinâmica
Variações de corrente	- defeito no enrolamento do estator	- barras do rotor quebradas ou trincadas - lâminas do rotor em curto

Tabela 2.3 - Depuração da vibração magnética em motores de indução, Bate (1987).

Causa da vibração	Freqüência sintomática	Plano dominante	Comentários
- Excentricidade estática	$2 \times f_l$ e componentes a $\omega = \left[\frac{n R_s (1-s)}{p \pm k_l}\right]$	Radial	- Pode ser resultado de alinhamento interno deficiente, desgaste de mancal, ou de aquecimento localizado do estator[1]. A vibração aumenta com o aquecimento do motor.
- Folga no suporte do estator. - Impedância desbalanceada das fases. - Curto-circuito no ferro ou bobinas do estator	$2 \times f_l$	Radial	- Refere-se a folgas no ferro. - Dificuldade de diferenciar este grupo usando somente análise de vibração.
- Folgas no ferro do estator	$2 \times f_l$ e componentes espaçadas de $2 \times f_l$ em torno de 1 kHz	Radial	- Pode ter altas amplitudes, mas geralmente não destrutivas. As componentes de alta freqüência são similares a excentricidade estática[3].
- Excentricidade dinâmica	$1 \times f_r \pm 2 \times f_s$ e componentes a $\omega\left[\frac{(n R_s \pm k_e)(1-s)}{p}\right] \pm k_l$	Radial	- Pode ser resultado do encurvamento, de erros de circularidade do rotor ou de aquecimentos localizados no rotor[2].
- Barras do rotor quebradas ou trincadas. - Curto-circuito no ferro do rotor, juntas dos anéis da extremidade deficientes.	$1 \times f_r \pm 2 \times f_s$ e componentes a $\omega\left[\frac{(n R_s \pm k_e)(1-s)}{p}\right] \pm k_l$	Radial	- As bandas laterais de $2 \times f_s$ são de baixo nível.

2.2.1 Defeitos no estator

A seguir são mostrados algumas falhas comuns no estator dos motores de indução trifásicos, WEG (1998). Nas Figuras 2.3 a 2.7 tem-se falhas no isolamento, causados por contaminações, abrasão ou oscilação de tensão.

No curto-circuito de espiras, Figura 2.3, o motor apresenta somente algumas espiras de um jogo de bobinas queimadas. Este defeito pode ser causado por: falha na camada de verniz do fio de cobre, falta de cuidado na colocação das bobinas na ranhura ou falta de cuidado na montagem do rotor ou estator.

Na Figura 2.4 tem-se a foto da bobina curto-circuitada.

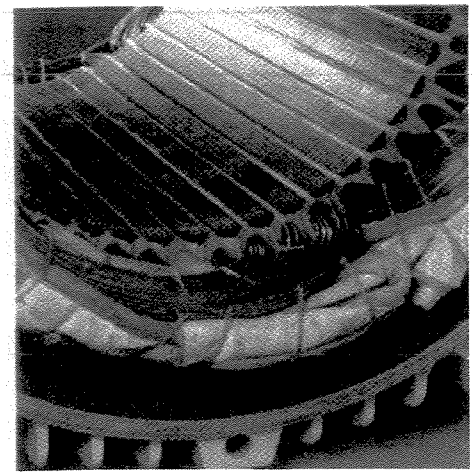


Figura 2.3 - Curto-circuito de Espiras.

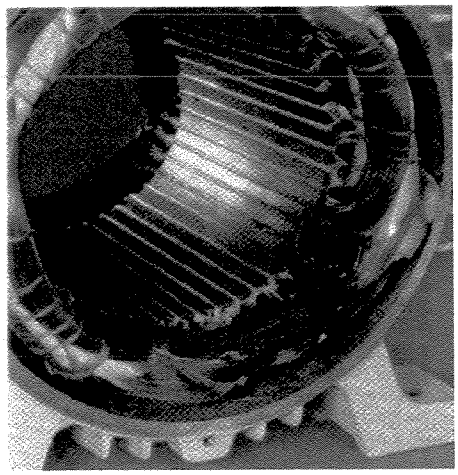


Figura 2.4 - Bobina curto-circuitada.

O curto-circuito contra massa é mostrado na Figura 2.5. Esta falha pode ser causada por forçar excessivamente a entrada das bobinas na ranhura rompendo o isolamento do estator ou falha do próprio material isolante.

Na Figura 2.6 tem-se a foto de um curto-circuito na conexão.

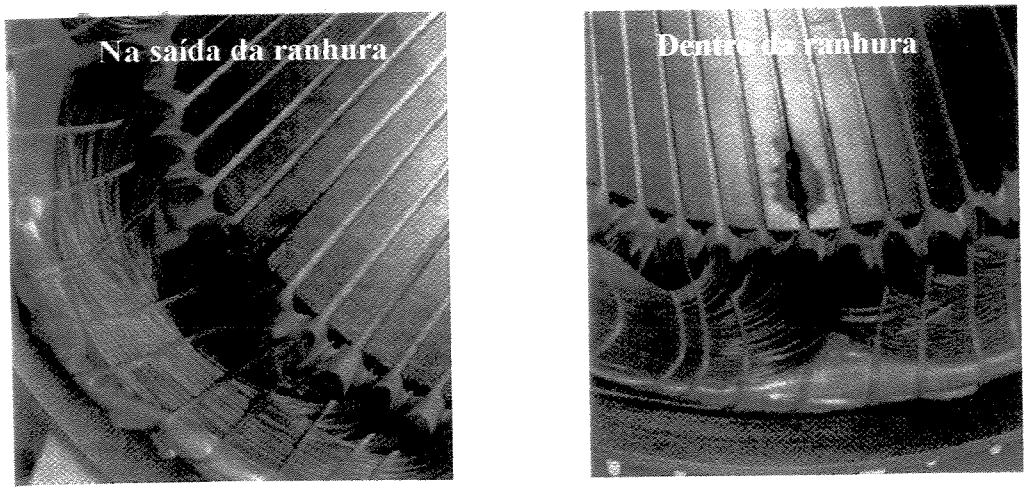


Figura 2.5 - Curto-circuito contra massa.

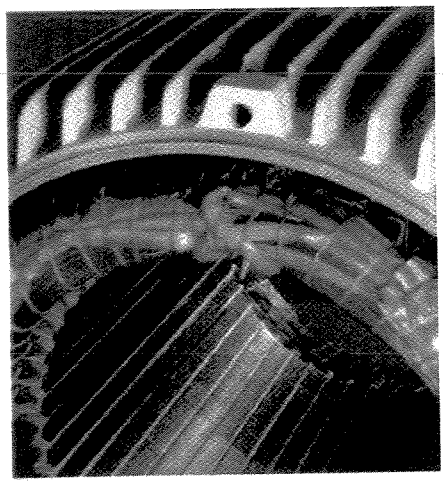


Figura 2.6 - Curto-circuito na conexão.

No curto-circuito entre fases, Figura 2.7, o motor apresenta dois jogos de bobinas queimadas parcialmente que pode ser causado por falta de cuidado quando efetuado o isolamento entre fases e amarração das cabeças de bobinas ou falta do próprio material isolante.

A queima por sobrecarga, Figura 2.8, provoca a queima total do isolamento em todas as fases do enrolamento trifásico. As subtensões e sobretensões também provocarão o mesmo tipo de falha.

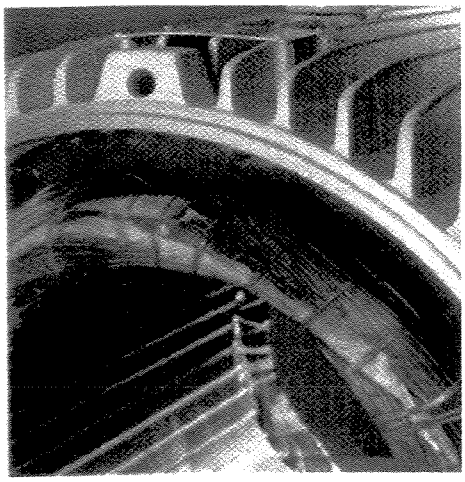


Figura 2.7 - Curto entre fases.

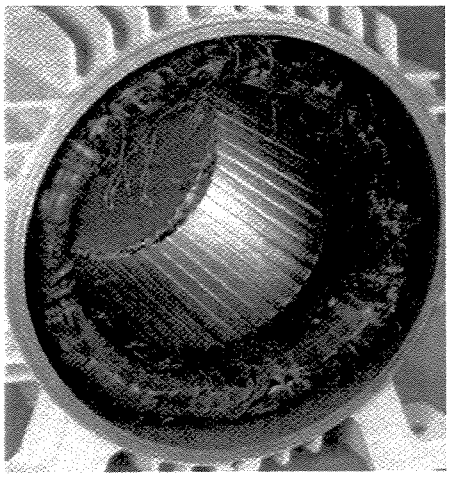


Figura 2.8 - Queima por sobrecarga.

A queima total do isolamento, em todas as fases do motor, normalmente é motivada por correntes muito altas no enrolamento do estator, devido à condição do rotor bloqueado, Figura 2.9. Isto também pode ocorrer devido a partidas e reversões excessivas.

A queima por pico de tensão, Figura 2.10, ocorre, muitas vezes, na comutação de circuitos de alimentação, descarga atmosférica, descarga de capacitores e de dispositivos de alimentação de semicondutores.

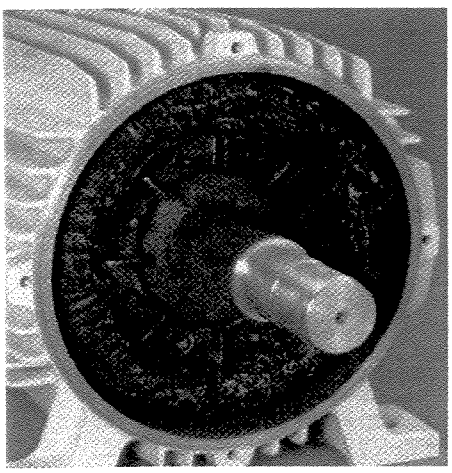


Figura 2.9 - Queima por rotor boqueado.

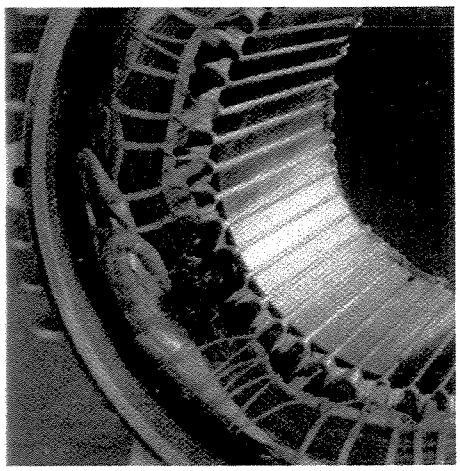


Figura 2.10 - Queima por pico de tensão.

A falha devido a falta de fase, Figura 2.11, surge em conseqüência de interrupção numa fase de alimentação do motor, também conhecido como *single phase*. A causa, geralmente, é um

fusível queimado, um contator aberto, uma linha de força interrompida ou por conexão deficiente.

Quando conectado na ligação estrela (a), queimam-se duas fases, ou seja, dois terços do enrolamento. Quando o motor estiver conectado na ligação triângulo (b), queima-se somente uma fase, ou seja, um terço do enrolamento.

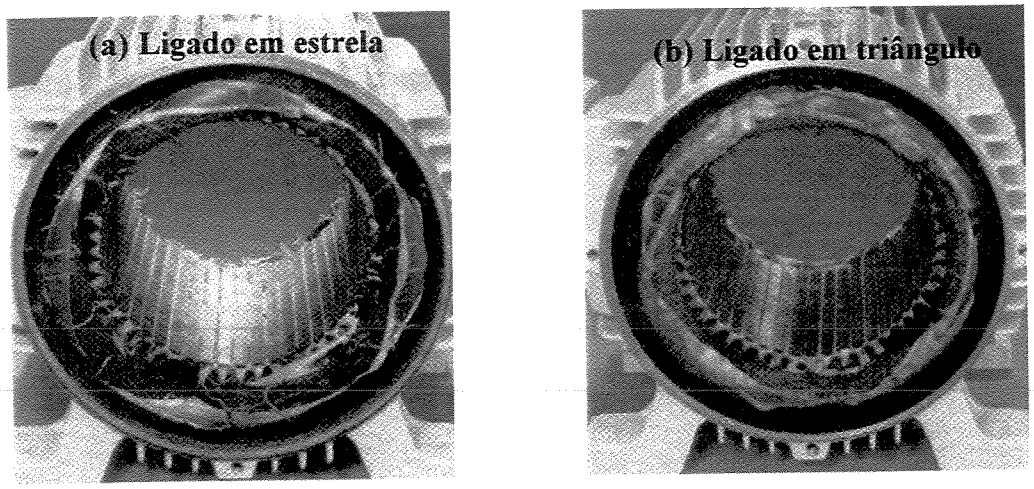


Figura 2.11 - Falta de fase.

Na fase danificada por desbalanceamento da tensão da rede, Figura 2.12, a queima do isolamento numa fase do enrolamento do rotor pode resultar de tensão desigual entre fases. Tensões desiguais normalmente são motivadas por cargas não balanceadas na rede de alimentação, por conexões deficientes junto aos terminais do motor ou por mau contato. O desequilíbrio de corrente é de 6% a 10%.

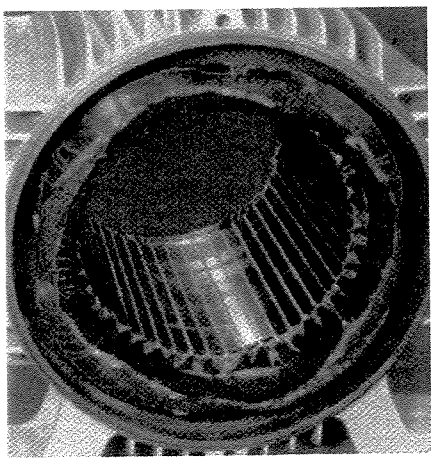


Figura 2.12 - Fase danificada por desbalanceamento da tensão da rede.

2.2.2 Defeito no rotor

Na Figura 2.13, têm-se as fotos de um motor Toshiba de 500 CV com o rotor apresentando quatro barras trincadas e uma quebrada (Cia. Vale do Rio Doce, Itabira - MG).

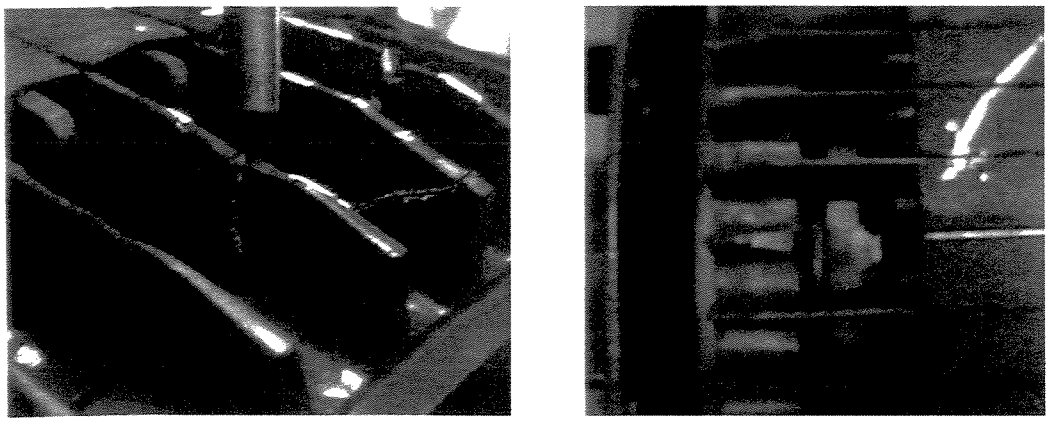


Figura 2.13 - Barras trincadas e quebrada do motor Toshiba de 500 CV.

2.2.3 Micro soldagem ou flauteamento na pista externa do rolamento

A presença de correntes parasitas circulando pelo eixo do motor, Figura 2.14, irá ocasionar uma micro soldagem ou flauteamento na pista externa do rolamento, conhecido como usinagem por descarga elétrica - UDE, Filho (2000). Para a detecção deste tipo de falha usa-se a análise de corrente/voltagem de eixo (Capítulo III, item 3.15).

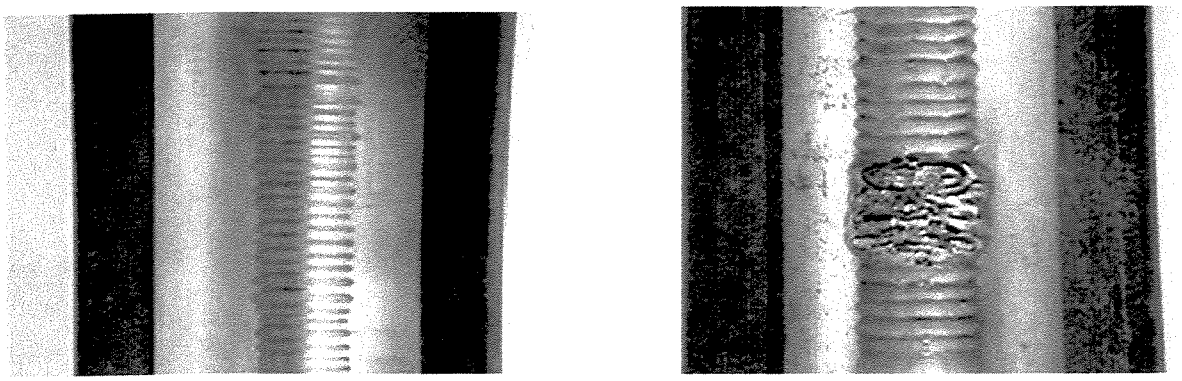


Figura 2.14 - Flauteamento na pista externa do rolamento.

Na Tabela 2.4 tem-se as características espectrais de formas de onda associadas com as diferentes fontes de corrente em eixos, Coelho Jr. (1994).

Tabela 2.4 - Diferentes fontes de corrente em eixos, Coelho Jr. (1994).

Fonte	Espectro
Eletromagnética	Desvio de tensão DC com componentes da rotação e pequenos harmônicos da rotação (geralmente na faixa de mV).
Eletrostática	Desvio grande de DC com freqüências da rotação. A forma de onda é caracterizada por mudança gradual de carregamento e rápida descarga (tem a aparência de uma onda dente de serra).
Tensão externa aplicada aos enrolamentos do rotor	Valores DC com freqüências iguais aos pulsos do retificador.
Dissimetrias magnéticas	Nenhum desvio DC. Os harmônicos da freqüência da rede são as principais.

2.3 Falhas de origem mecânica

As falhas de origem mecânica mais comuns resultam de vibrações em 1 e 2 x f_r (desbalanceamento do rotor, desalinhamento angular ou paralelo, eixo torto ou empenado e folgas mecânicas), sinais truncados, mancais e ventilação.

2.3.1 Desbalanceamento

O desbalanceamento de rotores é, sem dúvida, a maior causa de vibrações em máquinas rotativas. Este fenômeno é caracterizado pela existência de desequilíbrios de massa em relação aos eixos de rotação. Tais desequilíbrios são originados por inevitáveis assimetrias, tolerâncias e desvios de forma, além das imperfeições da matéria-prima e da montagem. Na Figura 2.15 tem-se a representação do desequilíbrio de massa.

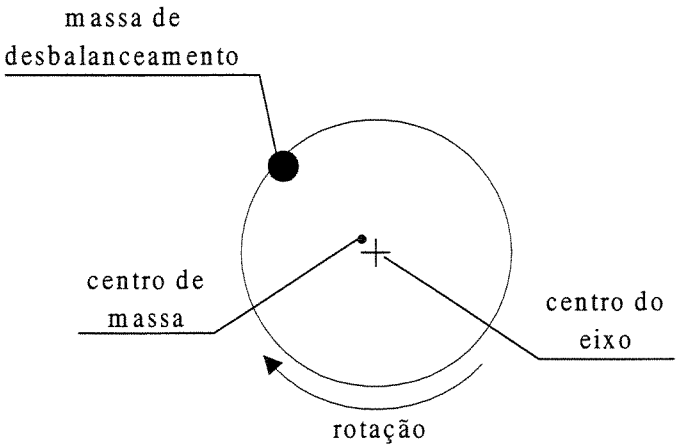


Figura 2.15 - Representação do desequilíbrio de massa.

A vibração resultante é predominantemente radial, forte componente em uma vez a freqüência de rotação (1 x f_r), com fase estável. Os dois mancais estarão em fase para desbalanceamento estático e fora de fase para desbalanceamento dinâmico, Almeida e Góz (1994).

2.3.2 Desalinhamento

O desalinhamento é um problema quase tão comum como o desbalanceamento. Nas montagens mecânicas, geralmente, tem-se vários eixos, mancais e acoplamentos com características dinâmicas diferentes. Quando o conjunto opera, aparecem forças de interação, que acabam provocando vibrações. O desalinhamento é o desvio em relação à linha de centro durante a operação, Figura 2.16. O desalinhamento pode ser paralelo, angular ou uma combinação dos dois, Figura 2.17.

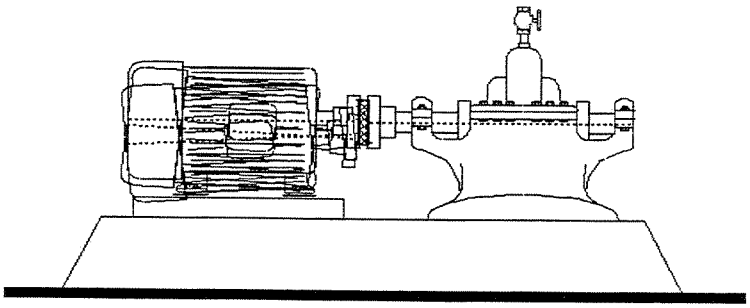


Figura 2.16 - Desalinhamento.

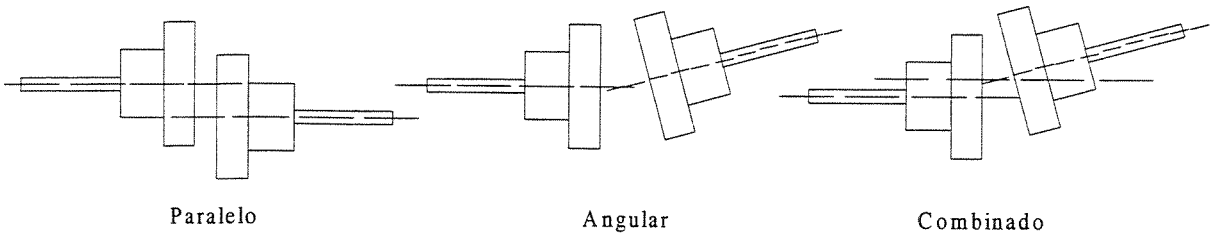


Figura 2.17 - Tipos de desalinhamento.

No desalinhamento angular, a vibração é mais forte na direção axial com componentes em 1 x f_r e 2 x f_r. No desalinhamento paralelo, a vibração é maior na direção radial, com fortes componentes nas harmônicas da freqüência de rotação (1 x f_r, 2 x f_r, 3 x f_r, 4 x f_r ...) e fases estáveis a 180^0 entre mancais, Almeida e Góz (1994).

2.3.3 Eixo torto ou empenado

O problema de eixo torto ou empenado é comum em motores elétricos sujeitos, principalmente, a sobrecargas e altos aquecimentos. Seus sintomas se confundem com desbalanceamento e desalinhamento, e as vibrações podem ser radiais e axiais, com fases estáveis. A distinção entre eixo empenado e desbalanceamento é feita comparando-se as componentes de 1 x f_r e 2 x f_r (as harmônicas da rotação crescem com o empenamento, da mesma forma que o desalinhamento), Almeida e Góz (1994).

2.3.4 Folga Mecânica

A folga mecânica, se caracteriza pela presença de múltiplos harmônicos da freqüência de rotação (1 x f_r) e gera vibrações em máquinas rotativas devido a parafusos frouxos, folgas excessivas nos mancais entre outros. Este tipo de vibração não ocorre sem que haja outras forças excitando o sistema, tais como desbalanceamento e desalinhamento, etc. Quando há folga excessiva, mesmo nos pequenos desbalanceamentos e desalinhamentos, aparecem elevados níveis de vibração, ou seja, as folgas mecânicas amplificam as vibrações.

O plano dominante é o radial e a relação de fase é variável. Harmônicas mais altas e também sub harmônicas de 1 x f_r (0,5 x f_r; 1,5 x f_r; 2,5 x f_r , etc.) podem estar freqüentemente presentes devido a não linearidade causadas por truncamento.

2.3.5 Truncamento

Quando ocorre uma folga mecânica, a rigidez do sistema na direção do movimento da vibração muda de acordo com a própria amplitude do movimento, restringindo a vibração em um dos extremos do percurso. O aspecto visual seria uma senóide saturada em um extremo, e o seu espectro de freqüência é caracterizado por um grande número de harmônicas superiores, sub-harmônicas da freqüência de rotação (1 x f_r) e ordens fracionárias (½, 1 ½, 2 ½), dependendo do tipo de excitação, Almeida e Góz (1994).

O truncamento pode também ocorrer quando a excitação se torna mais forte, forçando a estrutura a maiores deformações e, consequentemente, atingindo regimes de rigidez não linear. Este é o caso do desalinhamento mais severo gerando fortes vibrações em 2 x f_r, 3 x f_r e 4 x f_r, e

que, dependendo da rotação síncrona do motor, poderá ocorrer batimento com a componente elétrica a 120 Hz (2 x f_l). Na Figura 2.18 tem-se a forma de onda de um batimento truncado.

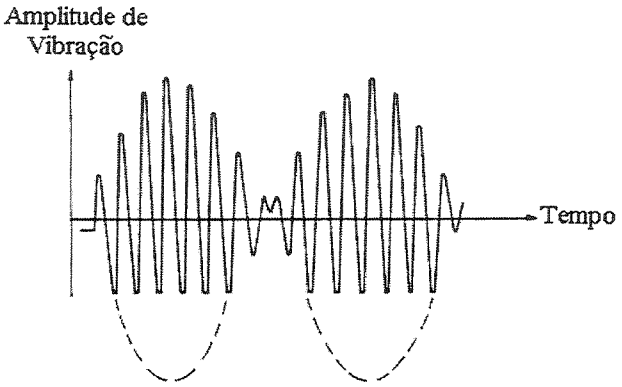


Figura 2.18 - Forma de onda de um batimento truncado, Almeida e Góz (1994).

2.3.6 Mancais

Os mancais nos motores de indução trifásicos geralmente são de rolamento (pequenos motores) e de deslizamento (grandes motores).

Nos mancais de rolamento, os defeitos locais produzem uma série de impactos que podem excitar ressonâncias na estrutura da caixa e na carcaça do motor, entre 1kHz e 20 kHz. Recomenda-se acompanhar a evolução do espectro dos rolamentos, medindo a vibração, preferencialmente, em aceleração. As freqüências características em (Hz) da pista externa, da pista interna, do elemento rolante e da gaiola, são dadas, respectivamente, pelas Equações 2.1 a 2.4, onde f_r é a freqüência de rotação (Hz), d é o diâmetro da esfera ou do rolo (mm), D é o diâmetro primitivo do rolamento (mm), n é o número de esferas ou rolos e β é o ângulo de contato do rolamento, conforme mostrado na Figura 2.19, Almeida e Góz (1994).

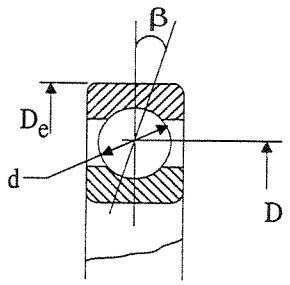


Figura 2.19 - Elementos do rolamento.

$$f_{Pista\,Externa} = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D}\right) \cos\beta \tag{2.1}$$

$$f_{Pista\,Interna} = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D}\right) \cos\beta \tag{2.2}$$

$$f_{ElementoGirante} = \frac{d}{2D} f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cos^2\beta\right] \tag{2.3}$$

$$f_{Gaiola} = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D}\right) \cos\beta \tag{2.4}$$

Nos mancais hidrodinâmicos, de deslizamento, os problemas de vibração são relacionados com a sustentação do óleo, ou seja, o *Whirl* (rodopio) e o *Whip* (chicoteamento) do óleo dentro dos mancais. Estes problemas causam vibrações em freqüências menores do que a metade da rotação do eixo (0,43 a 0,48 x f_r) , Almeida e Góz (1994).

Nos mancais de deslizamento, apresentam-se também vibrações em 1 x f_r, quando se inicia um processo de deterioração, podendo provocar uma excentricidade permanente que deslocará o rotor dentro do estator e fará aparecer ou crescer a componente em 2 x f_l. Ocorrem ainda harmônicas e sub-harmônicas e, normalmente, o aumento de temperatura precede o dano no mancal.

2.3.7 Ventilação

Os ventiladores dos motores elétricos produzem vários tipos de excitações dinâmicas que geram vibrações, Almeida e Góz (1994). As mais importantes são:

- passagem das pás: com freqüência igual a rotação vezes o número de pás, que vão induzir tensões nas pás e gerar fadiga, principalmente se excitarem ressonâncias;
- região instável do ventilador: as vibrações são provocadas por flutuações na pressão dinâmica do ventilador, podendo ser resolvido variando as aberturas de fluxo de ar;

- desbalanceamento: ocorrem devido a incrustações e/ou desgastes nas ventoinhas do motor, gerando esforços dinâmicos e gerando vibrações ou fadiga;

As ventoinhas internas do motor merecem atenção. A quebra de uma das pás pode danificar seriamente o estator, ou até mesmo, destrui-lo.

2.4 Comentários

A síntese das pesquisas realizadas pelo *EPRI* e *IEEE* mostra que as avarias devido à causas não identificadas apresentam percentuais expressivos. Isto nos leva a concluir que os estudos para identificação das falhas em motores elétricos têm um campo amplo a ser explorado. As duas entidades são concordantes quanto a área em que ocorrem mais falhas, mas não quanto à identificação das causas mais prováveis e do valor do índice de ocorrência. No Brasil, não se tem registro de nenhuma pesquisa que revele a situação dos motores elétricos. Neste sentido, contatos têm sido feitos com entidades representativas do setor de manutenção e empresas interessadas visando, num futuro próximo, a realização de uma pesquisa nacional, que seja ainda mais ampla e completa do que as apresentadas pelo *EPRI* e *IEEE*.

Desenvolver técnicas computacionais e experimentais capazes de detectar e diagnosticar falhas em motores elétricos, tanto as de origem elétrica como as de origem mecânica, é sem dúvida um grande desafio para a engenharia. Neste trabalho, algumas dessas técnicas e falhas serão estudadas.

Capítulo 3

Ferramentas e Tecnologias para Análise de Falhas em Motores Elétricos

Quando uma suspeita de falha elétrica é diagnosticada num espectro de vibração, o profissional de manutenção deve procurar a real causa do problema. A escolha da ferramenta e da técnica é, muitas vezes, uma tarefa difícil, principalmente levando-se em consideração o custo dos equipamentos e a implantação da Manutenção Preditiva numa planta industrial. Na dúvida da origem do problema, elétrico ou mecânico, que ferramenta e qual tecnologia usar? Neste sentido, este capítulo apresenta um procedimento orientativo que poderá ajudar na escolha da ferramenta e tecnologia que os levará ao diagnóstico do problema.

Embora o enfoque deste trabalho tenha sido o uso de ferramentas e técnicas preditivas modernas, também foram usadas as mais simples para monitoramento paralelo. Este procedimento permitiu que os testes fossem realizados a plena carga. Este é um caso real, em que o uso de tecnologias de ponta em conjunto com as mais simples, foi fundamental para a obtenção de resultados mais significativos. De uma forma resumida, tem-se uma visão global da situação atual e das novas tendências de ferramentas e técnicas para detecção e diagnóstico de falhas em motores.

3.1 Identificação da origem da falha

O motor elétrico é sujeito a falhas de origem mecânica e elétrica. Geralmente, recebem tratamentos diferenciados pelas equipes de manutenção, sendo importante verificar os seus sintomas. Constatando a origem da falha, a ação corretiva pode ser programada e realizada de

forma rápida e eficaz. Um meio rápido e eficiente para se determinar a origem da falha, mecânica ou elétrica, é observar o espectro em tempo real no analisador. Para isto, é necessário que o motor esteja ligado.

O equipamento deve ser rápido o suficiente para permitir que o operador veja a movimentação das amplitudes no visor. Se a falha for de origem mecânica, as amplitudes de interesse vão avançar lentamente para a faixa de baixa freqüência quando o motor for desligado. Se a falha for de origem elétrica, ao desligar o motor, a amplitude em duas vezes a freqüência de linha ($2 \times f_l$), cai imediatamente.

Uma situação interessante é quando o motor não pode ser desligado para se fazer este tipo de teste. Neste caso, deve-se analisar o espectro de vibração com alta resolução (no mínimo 1600 e preferencialmente 3200 linhas). Dessa forma, é possível verificar se a amplitude de interesse tem harmônicos. Geralmente, o operador confunde duas vezes a freqüência de linha ($2 \times f_l$) com um harmônico da freqüência de rotação (f_r). Usando somente 400 ou 800 linhas de resolução, $2 \times f_l$ e harmônicos da f_r poderão parecer uma única amplitude. Pela diferenciação dos picos nestas duas freqüência é possível diferenciar e diagnosticar corretamente o problema elétrico.

Uma vez diagnosticada a falha como de origem elétrica, é necessário conhecer a sua natureza. No caso da dúvida ser entre uma deformação do estator (elétrico) ou um pé manco (mecânico), provocado pelo afrouxamento de um dos parafusos de fixação do motor à base, uma nova técnica será necessária. A ferramenta mais simples e, provavelmente, a mais barata disponível é o multímetro.

3.2 Multímetro

O multímetro pode ser usado para checar o aterramento de fase (*grounded fase*), enrolamento aberto (*open windings*) e medir a resistência existente em cada fase. Para medir a resistência da fase é melhor usar um multímetro digital, que tem a possibilidade de medir valores relativamente baixos.

Quando se refere à falha no motor, geralmente esta é devida ao isolamento, e o multímetro não fornece nenhum indicativo da condição real do mesmo. Uma ferramenta relativamente de baixo custo, capaz de detectar este problema, é o Megômetro, ou simplesmente *Megger*.

3.3 Megômetro ou *Megger*

O megômetro ou *Megger*, como é mais conhecido, é um instrumento construído especialmente para medir a resistência de isolamento. O potencial fornecido pelo *Megger* é muito maior do que o de um ohmímetro, às vezes chegando a 10.000 V. O seu potencial é aplicado entre o condutor e a superfície de um material isolante. Dependendo da resistência do material isolante, circula uma quantidade de eletricidade pelo isolador. O *Megger* detecta este valor e o relaciona diretamente com a tensão aplicada. O resultado final fornece a resistência em ohms, através do indicador do *Megger*, que é a resistência de isolamento, Almeida (1995).

O tipo construtivo de *Megger* mais difundido é o manual. Ele possui um gerador que é acionado por manivela. Essa tensão, obtida manualmente, é aplicada no acionamento sob teste. A tensão de teste mais comum é 500 V. Porém, uma tensão de teste nunca deve ser superior à tensão nominal do equipamento testado. O *Megger* eletrônico também é muito usado. O seu potencial, que pode ser superior a 5.000 V, é obtido com algumas pilhas de lanterna. É um equipamento leve, de pequeno volume e fácil de transportar, Almeida (1995).

3.4 Teste de índice de polarização (IP)

Segundo Verri (1996), o índice de polarização é o mais importante para prever as condições do isolamento. O índice de polarização (IP) é dado pela Equação 3.1, onde R (1') é leitura efetuada com aplicação do megômetro após um minuto e R (10') é a medida efetuada após a aplicação do megômetro por dez minutos.

$$IP = \frac{R(10')}{R(1')} \tag{3.1}$$

A empresa Jamens Biddle (1966) correlacionou os valores do índice IP com a condição do motor e Verri (1996), apresentou novos valores práticos para estes índices. Esses valores são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores de índice de polarização, Verri (1996).

Valor IP James Biddle (1966)	Condições do motor	Valor IP Verri (1996)
IP < 1	Perigosa	IP < 1
1 ≤ IP < 1,5	Ruim	1 ≤ IP < 1,1
1,5 ≤ IP < 2	Questionável	1,1 ≤ IP < 1,2
2 ≤ IP < 3	Dentro da média	1,2 ≤ IP < 1,4
3 ≤ IP < 4	Bom	1,4 ≤ IP < 2
IP > 4	Excelente	IP > 2

Os valores da Tabela 3.1 são válidos para motores mais antigos, cuja isolação é de base asfáltica. Para motores de isolação de base fenólica, os valores são menores. Para estes casos, sugere-se tirar 1/10 de cada valor da Tabela 3.1, Verri (1996). Assim, um motor é considerado "perigoso" tem o IP = 0,9; "ruim" se 0,9 ≤ IP < 1; "questionável" se 1 ≤ IP < 1,1 e assim por diante.

Se o índice IP não for adequado, o motor deverá ser desmontado e limpo, preferencialmente com vapor. O estator deve ser colocado em estufa por aproximadamente 24 horas, acompanhando-se o índice IP. Se não houver envelhecimento do isolamento, o índice subirá para valores considerados bons e o motor poderá ser montado novamente.

3.5 Teste de alto potencial (*Hipot Test*)

O teste de alto potencial é capaz e detectar a condição do isolamento, podendo ser realizados em corrente alternada ou corrente contínua.

Os equipamentos para realizar o teste de alto potencial AC (*AC Hipot Test*), compreendem basicamente um transformador elevador e um auto transformador DC. A tensão máxima de saída é função das características específicas de cada aparelho. Alguns modelos fornecem mais de 150 kV. Para a realização deste teste em motores de baixa tensão, há necessidade de se usar um transformador de aproximadamente 1000 V no secundário, Almeida (1995).

O teste de alto potencial DC (*DC Hipot Test*) é classificado como sendo não destrutivo, porém, é recomendado que se tenham peças de reservas ao executá-lo. Os testes de alta tensão CC em motores de baixa tensão podem ser feitos com um *Megger* de múltipla escala de tensão, com aproximadamente 1000 V. Os aparelhos de alta tensão CC, especialmente construídos para esta finalidade, são conhecidos pelo nome de *Hipot CC*, Almeida (1995).

3.6 Teste da voltagem escalonada (*Step Voltage Test*)

O teste da voltagem escalonada substitui os testes *Hipot* (AC e DC). Neste caso, os resultados alcançados são os mesmos, porém o operador tem mais controle sobre o procedimento. Durante o procedimento de teste, os resultados devem ser registrados em gráficos, sendo as suas rampas cuidadosamente analisadas. Se a rampa aumenta antes de atingir a voltagem de operação normal, o motor não terá condições de funcionamento e deverá ser substituído e reparado.

Os dois testes *Hipot* e o teste de voltagem escalonada apresentam restrições para diagnosticar o estado dos enrolamentos. Neste caso, uma nova ferramenta é necessária e poderá detectar, com antecedência, os problemas no isolamento. Esta ferramenta é o Surge, que permite aplicar o teste de impulso.

3.7 Teste de impulso aplicado em motores (*Surge Test*)

Dentre os testes convencionais para enrolamentos de máquinas elétricas, o teste de impulso (*Surge Test*) é o mais comum nas oficinas elétricas. Neste teste, aplica-se um impulso elétrico de alta tensão em um par de bobinas e compara-se a resposta de tensão de cada bobina, não sendo necessário submeter os enrolamentos a aquecimentos e altas tensões, Almeida (1995).

O *Surge Test* trabalha com baixos níveis de corrente. Dessa forma, curtos-circuitos momentâneos não causam danos adicionais ao isolamento do enrolamento. Isto evita riscos de carbonização da região do curto e de maiores danos ao equipamento.

Qualquer irregularidade na bobina fará variar sua impedância elétrica. Neste caso, basta comparar todas as bobinas do transformador ou do motor, testando duas a duas. Superpondo as saídas de tensão de duas bobinas em uma tela de osciloscópio, pode-se perceber se existem diferenças de impedância entre elas, e daí estabelecer um critério de análise. Como ilustração

deste teste, na Figura 3.1 são mostradas as formas de onda indicando a evolução do problema no isolamento.

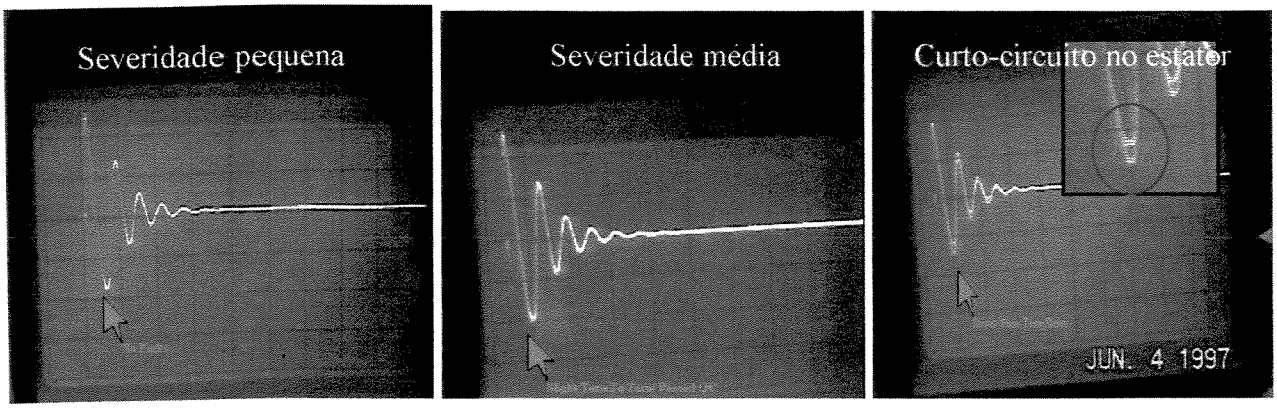


Figura 3.1 - Formas de onda gerada pelo *Surge Test*.

3.8 Analisadores Modernos de Sinais

O mercado atual oferece uma variedade expressiva de analisadores de espectro, todos baseados no algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (*FFT - Fast Fourier Transformer*). Este algoritmo executa a decomposição em freqüência de um sinal dinâmico qualquer pelo processo de *Fourier*. Os modernos e portáteis analisadores de sinais baseados em microcomputadores dedicados, têm como funções principais: mostrar a forma de onda dos sinais; mostrar o conteúdo de freqüências, através do espectro; medir os níveis em unidades corretas e memorizar as medidas para processamento posterior, Almeida e Góz (1994).

Para executar qualquer procedimento de medição ou de análise, o sinal deve ser digitalizado e memorizado no analisador para depois executar qualquer uma de suas funções. O sinal a analisar passa pelo circuito de entrada e é colocado à entrada de um conversor A/D (análogo/digital) para a aquisição. Os parâmetros mais importantes neste procedimento são:

- tempo de aquisição: o analisador deverá fazer a aquisição de um tamanho de amostra (tempo de amostragem) que permita constituir uma amostra representativa do sinal a analisar mantendo suas informações;
- número de amostras: a digitalização do sinal consiste em expressá-lo por uma colocação de pares de valores - tempo e amplitude. O número de pares de valores deverá ser suficiente para reproduzir o sinal, inclusive as componentes de alta freqüência.

Geralmente as medições são feitas tanto do lado do acoplamento quanto do lado oposto do acoplamento, nas posições horizontal, vertical e axial. Na Figura 3.2 tem-se a ilustração destes pontos onde (M) identifica o motor e (B) a bomba.

- **MOV** = motor, lado oposto ao acoplamento, direção vertical.
- **MOH** = motor, lado oposto ao acoplamento, direção horizontal.
- **MOA** = motor, lado oposto ao acoplamento, direção axial.
- **BAV** = bomba, lado do acoplamento, direção vertical.
- **BAH** = bomba, lado do acoplamento, direção horizontal.
- **BAA** = bomba, lado do acoplamento, direção axial.

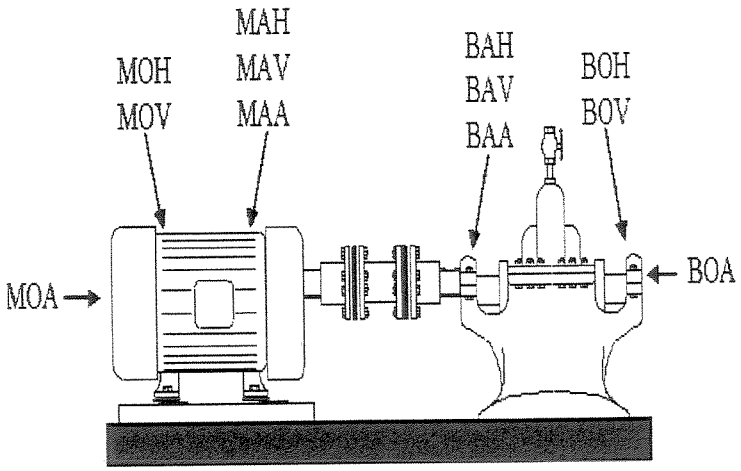


Figura 3.2 - Pontos de medição.

O sinal coletado é processado pelo algoritmo FFT para determinar o espectro de freqüências, conforme ilustrado na Figura 3.3.

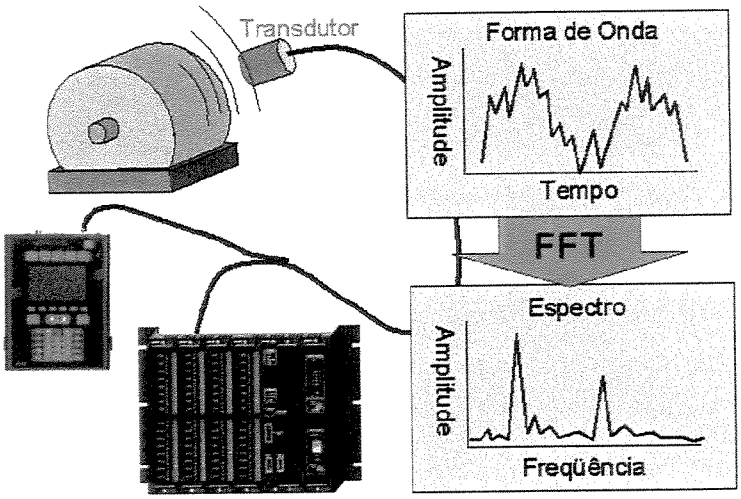


Figura 3.3 - Processamento do sinal.

O cálculo da FFT é baseado em um limite superior de freqüência e em um determinado número de linhas, que pode ser: 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 e 6400. Assim, tem-se um efeito de filtragem por discretização de freqüências, com influência direta na resolução de freqüência. A resolução de freqüência é o resultado da divisão do limite superior de freqüência pelo número de linhas, dada em [Hz/linha].

Nos motores de indução ocorrem, muitas vezes, modulações das forças magnéticas e mecânicas pela corrente do rotor na freqüência de escorregamento (f_s). As bandas laterais criadas são muito próximas a duas vezes o escorregamento (2 x s), exigindo que o analista combine baixo limite superior de freqüência, alto número de linhas e uso de *zoom* para poder destacar os indicativos destas modulações, Almeida e Góz (1994).

Para a faixa de freqüência, Figura 3.4, tem-se as seguintes opções: para baixa freqüências usar deslocamento; para uso genérico usar velocidade e para altas freqüências usar aceleração.

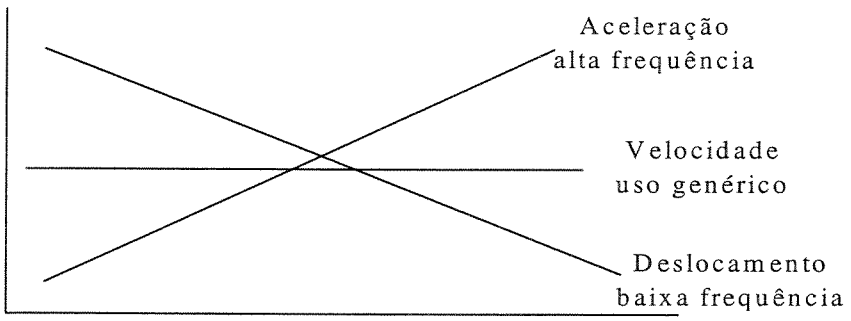


Figura 3.4 - Faixas de freqüência.

Nem sempre é possível coletar os sinais na $F_{máx}$ devido à limitação do analisador; do espaço extra requerido para armazenar os dados coletados e da redução da resolução do espectro. Na Figura 3.5 tem-se uma ilustração das faixas de freqüência.

Quanto ao número de linhas, Figura 3.6, os equipamentos dispõe de várias opções. Quanto maior o número de linhas menor será o Δf ($\Delta f = F_{máx}$/Número de Linhas) e maior será a resolução. Se o valor de Δf for grande, o pico não será visto e portanto não será analisado.

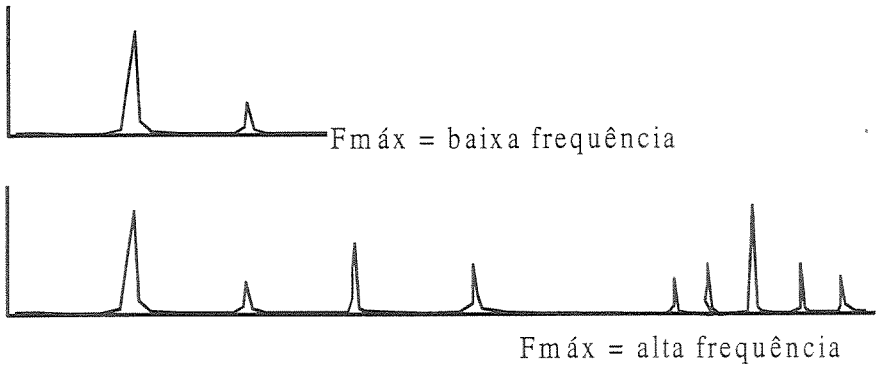


Figura 3.5 - Freqüência máxima.

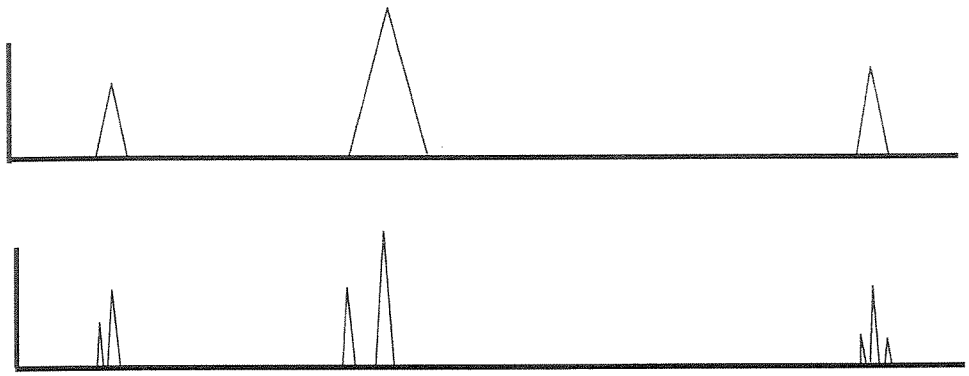


Figura 3.6 - Número de linhas.

A função *zoom* aumenta a resolução de freqüência em uma faixa escolhida no espectro, permitindo medir e analisar componentes de freqüência muito próximas, tais como bandas laterais geradas por modulações.

O diagnóstico pode ser feito manual ou automaticamente. O primeiro refere-se ao procedimento usual, e o segundo, através de técnicas de Inteligência Artificial, que serão apresentados nos capítulos posteriores.

3.10 *MotorStatus*

O *MotorStatus*, Figura 3.7, é uma ferramenta da *CSI - Computational Systems, Inc.* específica para diagnósticos de falhas em motores elétricos. Trata-se de um sistema para monitoramento e acompanhamento preditivo simultâneo: do número de partidas do motor, rotação, carga, temperatura, fluxo magnético e vibração. Abrange um universo possível de 64

parâmetros de acompanhamento. Isto é possível devido aos sensores embutidos no *MotorStatus*, que é montado na carcaça do motor sem a utilização de cabos ou outros acessórios, permitindo uma coleta de dados fácil e segura.

Todas as leituras armazenadas ao longo dos dias e meses são transferidas, via comunicação infravermelha, para o *software StatusReport*, permitindo o gerenciamento e análise destes dados. Dessa maneira, pode-se avaliar as condições tanto do rotor quanto do estator e construir um histórico de vida do motor, parâmetro a parâmetro.

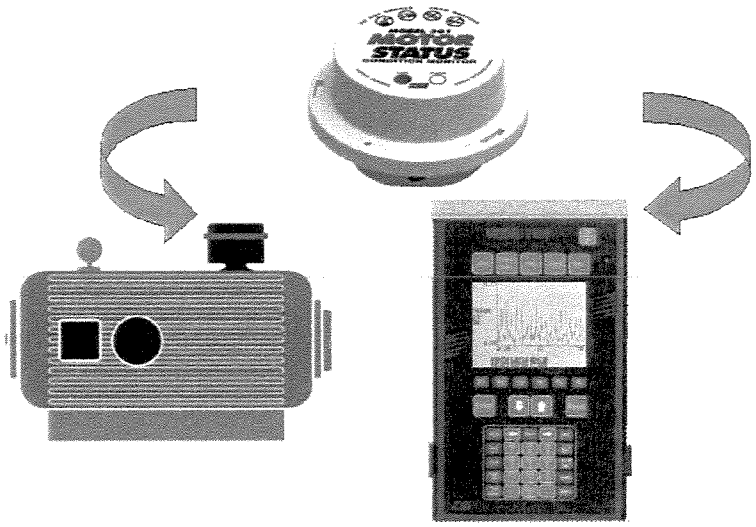


Figura 3.7 - *MotorStatus*.

3.10 Analisador *UltraSpec 8000*

Neste trabalho, utilizou-se o equipamento *UltraSpec 8000*, Figura 3.8, para detecção das falhas de origem mecânica e elétrica. Trata-se de um coletor e analisador de sinais da *CSI*, que digitaliza e memoriza os sinais e as informações neles contidas.

Essas informações podem ser analisadas diretamente no próprio equipamento, ou então transferidas para o computador através do software de apoio *UltraManager*. Nesta opção, tem-se um ambiente mais confortável de trabalho, permitindo análises detalhadas, geração de relatórios técnicos e montagem dos bancos de dados.

Estão disponíveis no *UltraSpec 8000* os seguintes módulos: Balanceamento (*UltraSpec Balance*), Alinhamento Completo (*UltraSpec Pro Align*), Alinhamento Simples (*UltraSpec Easy Align*), Controle de Qualidade (*UltraSpec QC*), Análise de Vibração (*UltraSpec Analyse*) e Análise de Motores (*UltraSpec Motor*).

No módulo *UltraSpec Balance*, faz-se o balanceamento dinâmico através de programas específicos e fototacômetro. O procedimento de balanceamento é rápido e, quando necessário, requer somente um soldador para a fixação de pesos corretivos.

Nos módulos *UltraSpec Pro Align e UltraSpec Easy Align*, faz-se o alinhamento a *laser* através de programas específicos e de cabeçotes de feixe duplo *laser*.

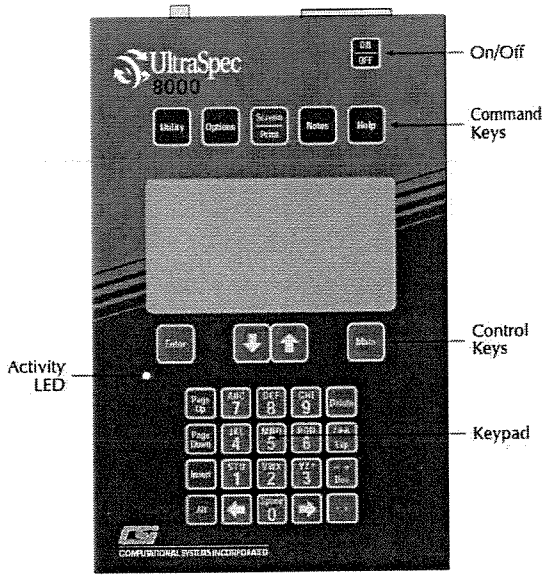


Figura 3.8 - Analisador *UltraSpec 8000*.

Os módulos *UltraSpec Balance* e *UltraSpec Easy Align*, foram usados antes do início dos testes para a obtenção dos sinais sem a introdução dos defeitos, "assinatura da máquina". Este procedimento é importante para garantir a comparação dos espectros com e sem a introdução dos defeitos. Também permite identificar e corrigir vibrações indesejáveis, garantindo a robustez da bancada.

No módulo *UltraSpec QC*, novas tarefas são integradas a um único sistema que correlaciona: desempenho, controle de qualidade e relatório. Procedimentos tais como alinhamento, balanceamento e medidas de vibrações, anteriormente usados somente para

identificação de condições de problemas conhecidos, no *UltraSpec QC* são usados em um módulo proativo para estender a vida da máquina e qualificar remontagens e novas instalações.

No módulo *UltraSpec Analyse*, faz-se o estudo dinâmico dos sinais característicos de vibração. Neste módulo é possível fazer as seguintes medições: *Spectrum* (espectro); *Waveform* (forma de onda); *Peak/Phase* (pico/fase); *Overall* (nível gobal); *Temperature* (temperatura) e *DC Level* (nível DC).

No módulo *UltraSpec Motor* é possível fazer as seguintes medições: *Current Analysis* (análise de corrente); *Rotor Bar* (barras quebradas); *Shaft Amps/Volt* (corrente/voltagem no eixo); *Motor Inrush* (corrente de partida) e *Temperature* (temperatura).

3.11 Análise de Vibração

A análise de vibração é utilizada na detecção de componentes síncronos (desbalanceamento, desalinhamento, eixo empenado, folga mecânica, passagens de pás, motores alternativos, engrenamentos, barras trincadas ou quebradas) e componentes não síncronos (correias, instabilidade hidráulica, atritos, rolamentos, ressonâncias e defeitos elétricos).

Neste trabalho, a análise de vibração foi utilizada para detecção das falhas de origem mecânica (desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica), de origem elétrica (barras quebradas e desbalanceamento de fase) e da condição sem defeito (assinatura da máquina).

3.12 Análise de Corrente

A análise de corrente é aplicada para coletar os espectros da corrente elétrica dos motores elétricos. Utiliza o sensor alicate amperímetro, modelo *CSI* 341B, sendo a análise realizada nas bandas laterais em torno da freqüência de linha (f_l). O objetivo é detectar barras quebradas ou trincadas e, ainda, desbalanceamento de corrente. Seus espectros podem ser usados como referência (*base line*) para análise de fluxo magnético.

A análise de corrente apresenta as seguintes limitações: necessidade de acessar painéis elétricos, de alicate amperímetro conectado a cabos energizados, de um eletricista para fazer as medições.

3.13 Análise de Fluxo magnético

A análise de fluxo magnético é aplicada para coletar os espectros de fluxo do campo magnético dos motores elétricos. O sensor, espira de fluxo modelo *CSI 343P*, deve ser sempre posicionado na mesma posição axial e central, evitando-se interferência na coleta dos espectros. O objetivo desta análise é detectar barras trincadas ou quebradas, falhas no estator, desequilíbrio de fase e curto circuito (entre fase e entre espiras).

Na análise de fluxo magnético os espectros são coletados de forma segura, sem acesso a painéis elétricos, sem conexão a cabos energizados e sem a necessidade de eletricista para realizar as medições.

3.14 Análise de Corrente/Voltagem de Eixo

A análise de corrente/voltagem de eixo é uma técnica recente e ainda pouco aplicada no meio industrial. Na Figura 3.9, tem-se o sensor *shaft probe*, modelo *CSI 348SP*, utilizado para medir a corrente e a tensão no eixo do motor.

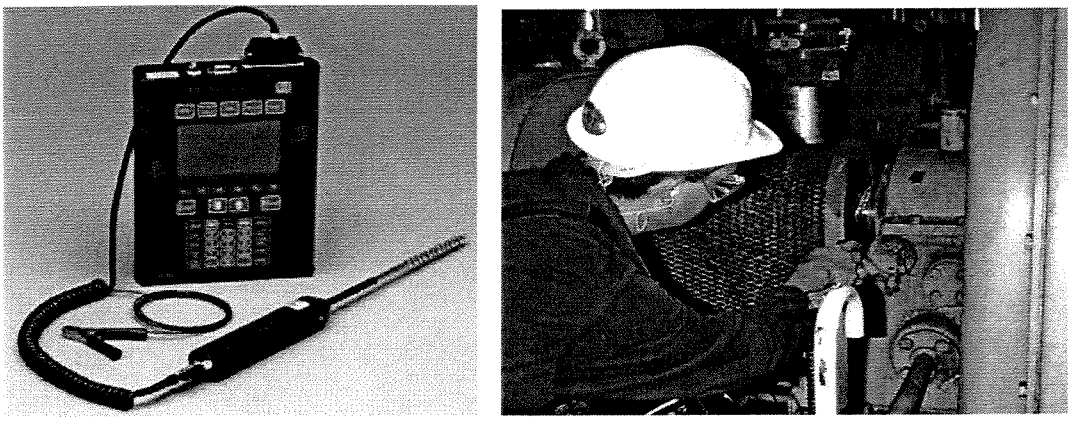


Figura 3.9 - *UltraSpec* 8000 e *shaft probe CSI* 348SP.

Correntes elétricas e voltagens podem ser encontradas nos eixos dos motores elétricos, devido à indução magnética ou descargas capacitivas. Forças magnéticas causadas por pequenas assimetrias do circuito do motor produzem corrente no eixo do motor. Correntes magneticamente induzidas, circulando entre o rotor e a carcaça, passam através dos mancais. Estas correntes podem levar à falha os mancais, Walter (1990).

De acordo com Costello (1991), estes problemas estão associados ao uso de isolantes de baixa qualidade e mancais não isolados. Medindo e acompanhando-se a tendência da corrente (AC e DC) do eixo para terra, podem-se prever falhas nos rolamentos devido à correntes induzidas magneticamente.

Segundo Isakkala e Pekola (1998), existem dois tipos de circulação de correntes em rolamentos:

- correntes de baixa freqüência: podem ser de 5 a 10% da corrente nominal do motor;
- correntes de alta freqüência: são criadas pelas variações de tensões e freqüências fornecidas pelos conversores de freqüência. Estas correntes se apresentam de duas formas. A primeira circula através da carcaça do motor e a segunda circula nos rolamentos do motor.

3.15 Análise Térmica Normalizada

Aquecimento excessivo e prolongado é o principal fator da diminuição da vida útil esperada de motores elétricos. Os componentes mais afetados pelo calor excessivo são os isolamentos e os mancais. De um modo geral, a vida do isolamento cai pela metade, a cada 10 ^{0}C de aumento da temperatura de exposição, Brancato (1992).

Altas temperaturas também reduzem a viscosidade dos óleos e graxas lubrificantes, prejudicando a lubrificação dos mancais. As causas mais comuns são: sobrecarga, mancal travado, desalinhamentos, ventilação insuficiente, falta de fase, temperatura ambiente alta, ciclos de trabalho pesados, variação no suprimento de potência e falhas no enrolamento.

As medições de temperatura são rápidas e fáceis de serem coletadas. Contudo, certos fatores podem alterar as leituras, resultando em uma interpretação incorreta. Os fatores a serem considerados são: carga, temperatura ambiente, calor gerado pelo sol e localização das medições. As temperaturas são coletadas através do sensor de temperatura (termômetro infravermelho) *CSI 505*.

Na Figura 3.10 tem-se a localização dos pontos de medição, onde: TSO é a temperatura da carcaça (lado oposto do acoplamento), TSC é a temperatura do centro da carcaça, TSI é a temperatura da carcaça (lado do acoplamento), TAF é a temperatura ambiente da base de fixação; TBI é a temperatura do rolamento (lado do acoplamento), TBO é a temperatura do rolamento (lado oposto ao acoplamento), TTH é a temperatura da caixa de ligação e TCP é a temperatura do acoplamento.

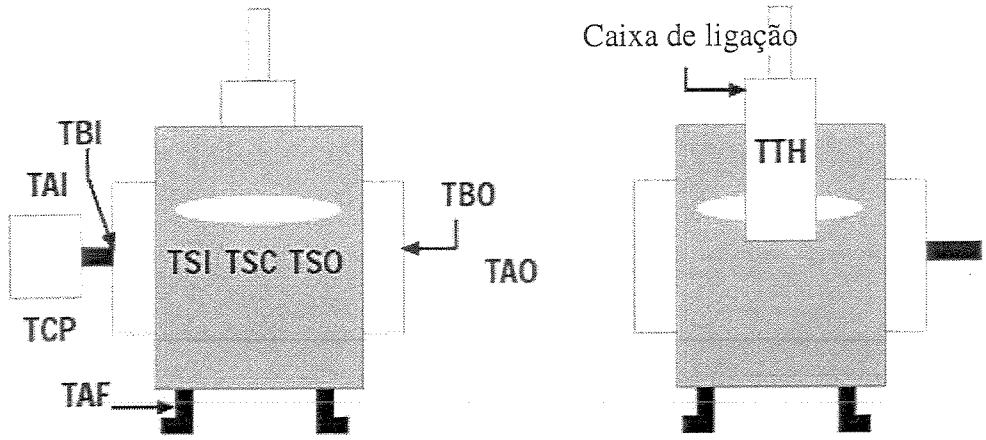


Figura 3.10 - Localização dos pontos de medição.

Todos os pontos de medição devem ser marcados, permitindo que medições subsequentes sejam realizadas sempre no mesmo ponto. Este procedimento garante que mudanças na temperatura indiquem variação na condição de funcionamento do motor e não resultado de leitura feita com o sensor posicionado em pontos diferentes.

3.16 Termometria

A análise termométrica, diferencia-se na literatura da análise térmica normalizada pelo tipo de sensor. Na análise térmica normalizada, as temperaturas são coletadas por um radiômetro e transferidas para o computador através de um software específico. Este procedimento permite diagnosticar o problema e gerar um banco de dados. Os pontos de medição são os mesmos mostrados na Figura 3.10.

Os aquecimentos detectados são provocados por resistência elétrica (mau contato ou sobrecarga), atrito (falta de lubrificação) e vibração.

3.18 Termografia

A termografia é extremamente eficiente no diagnóstico de problemas elétricos, mecânicos e térmicos. A inspeção termográfica ocupa cada vez mais espaço nos programas de manutenção preditiva. Esta tecnologia complementa o diagnóstico pela verificação do estado dos painéis elétricos associados ao motor e sua temperatura.

O sistema termográfico da *CSI* é composto de uma câmera de vídeo infravermelha, software de gerenciamento *Infranalysis* e o coletor de dados *Infraroute*, que é o coletor de imagens termográficas.

Como ilustração desta técnica, na Figura 3.11 tem-se o termograma de um desbalanceamento entre fases, e na Figura 3.12 tem-se o termograma de um mau contato nas conexões.

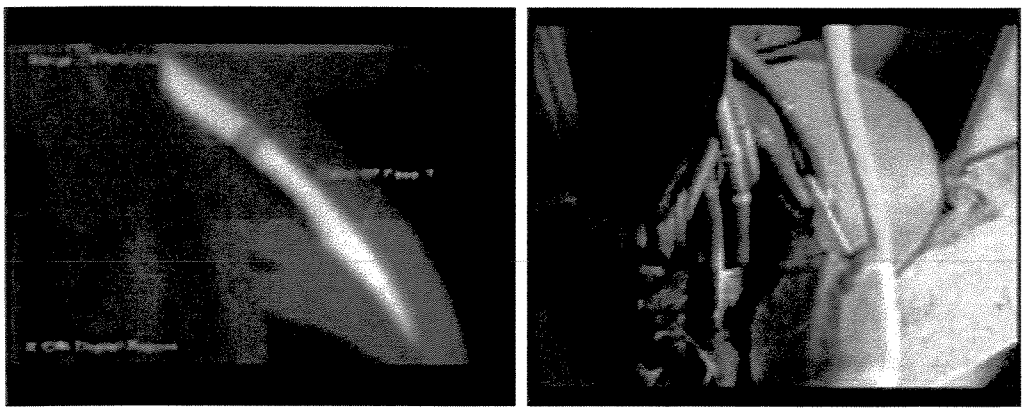


Figura 3.11 - Termograma do desbalanceamento entre fase.

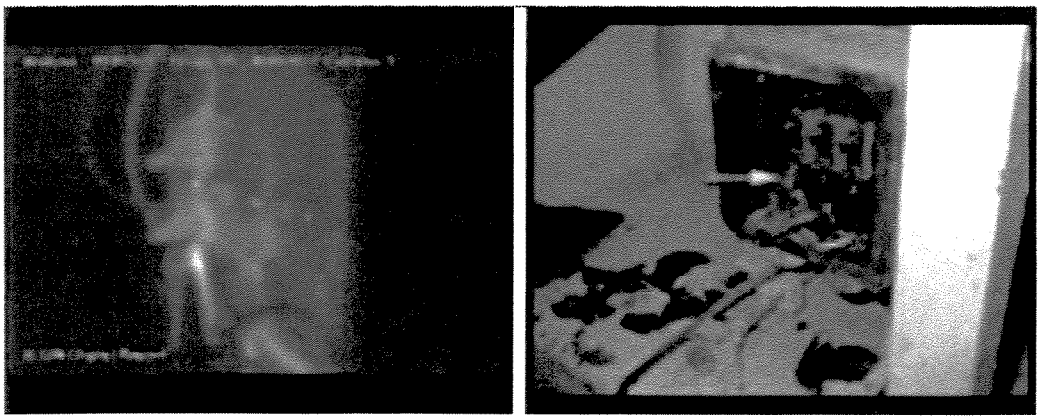


Figura 3.12 - Mau contato nas conexões.

3.18 Comentários

Neste capítulo apresentou-se um procedimento orientativo que poderá ser útil na escolha da melhor ferramenta e tecnologia para o diagnóstico das falhas de origem elétrica e mecânica em motores elétricos.

Das ferramentas apresentadas, destaca-se o *UltraSpec 8000* e suas tecnologias integradas: *UltraSpec Motor* (específica para análise dos motores elétricos), *UltraSpec Analyzer* (usada para todos os tipos de análise de vibração), *UltraSpec Balance* (para balanceamento até quatro planos consecutivos) e o *UltraSpec Align* (para alinhamento vertical e horizontal), utilizadas neste trabalho.

BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Capítulo 4

Bancada Experimental e Fontes de Excitação

Neste capítulo apresentam-se a bancada experimental e os espectros coletados através da análise de vibração, análise de corrente e análise de fluxo magnético. Os experimentos foram realizados para a condição normal de funcionamento e para as excitações de origem elétrica e mecânica.

4.1 Apresentação da bancada experimental

Na Figura 4.1 tem-se uma vista geral da bancada experimental utilizada para a montagem do banco de dados para construção do Sistema Especialista *SE_MIT* e do Sistema Híbrido *HY_NES*.

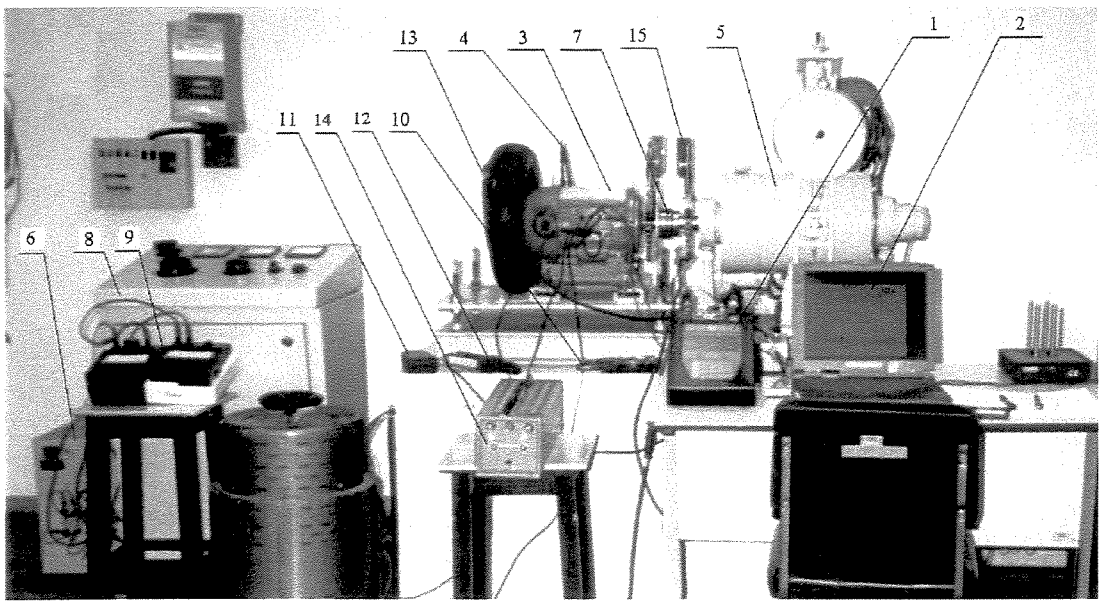


Figura 4.1 - Bancada experimental.

A bancada experimental foi montada no Laboratório de Conservação de Energia da FUNREI - Fundação de Ensino Superior de São João del Rei. Os sinais foram coletados através do coletor e analisador de sinais *UltraSpec 8000* [1], que digitaliza e memoriza as informações nele contidas. Estas informações podem ser analisadas diretamente no próprio equipamento ou então transferidas para o computador [2] através do software de apoio *UltraManager*. Nesta opção, tem-se um ambiente mais confortável de trabalho, permitindo análises detalhadas, geração de relatórios técnicos e montagem dos bancos de dados.

Os defeitos foram introduzidos num motor de indução trifásico [3], WEG (FH 88747), rotor gaiola, 5 CV, 1730 rpm, 220 V, 60 Hz, 4 pólos, categoria N, 44 barras, 36 ranhuras, rolamento SKF 6205-2Z, ID–1, carcaça 100L, classe de isolamento B, FS 1,15, Ip/In 7,5, IP 55, 13,8 A, gentilmente cedido pela WEG Motores.

Um gerador CC [5] alimentando um banco de resistência [6] foi utilizado como sistema de carga. Aplicou-se a carga no motor através do ajuste da corrente de campo do gerador CC. O gerador está acoplado ao motor elétrico através de um acoplamento flexível [7], gentilmente cedido pela Flender do Brasil Ltda.

Usou-se também uma monitoração paralela através de um voltímetro de precisão *Engro* [9] modelo 600, alicate digital *Dawer* modelo CM-600 e tacômetro *Optho Tako*. O objetivo desta monitoração é garantir o funcionamento do motor em teste com carga nominal, simulando a condição real de funcionamento. A estrutura flexível da bancada experimental e o motor trabalhando com carga nominal, possibilitaram que os defeitos introduzidos se tornassem mais perceptíveis nos espectros.

Através das leituras do voltímetro tem-se a informação dos níveis de tensão nas três fases de alimentação do motor. No painel de controle do gerador CC [8] também é possível monitorar a corrente de armadura, tensão de armadura e velocidade.

Através de *firmwares* específicos e disponíveis no *UltraSpec 8000*, fez-se o balanceamento e alinhamento a laser da bancada de teste, verificando-se possíveis folgas mecânicas. Dessa forma, coletaram-se espectros para a condição considerada sem defeito, para posteriores comparações com os espectros das excitações em estudo.

Na Figura 4.2, tem-se uma vista da montagem para alinhamento da bancada, destacando-se os cabeçotes para alinhamento a laser.

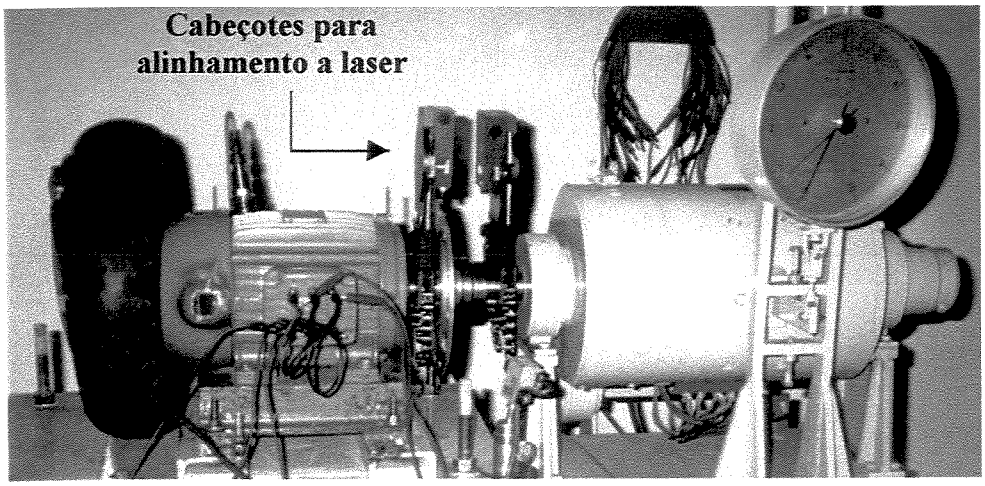


Figura 4.2 - Alinhamento a laser da bancada experimental.

Na Figura 4.3, tem-se uma vista da montagem para balanceamento da bancada experimental e sua estrutura. As massas de balanceamento são colocadas nos discos de alumínio que têm 230 mm de diâmetro e 12 furos espaçados entre si de 30^0. O disco do lado do acoplamento tem 10 mm de espessura e o do lado da ventoinha 12 mm.

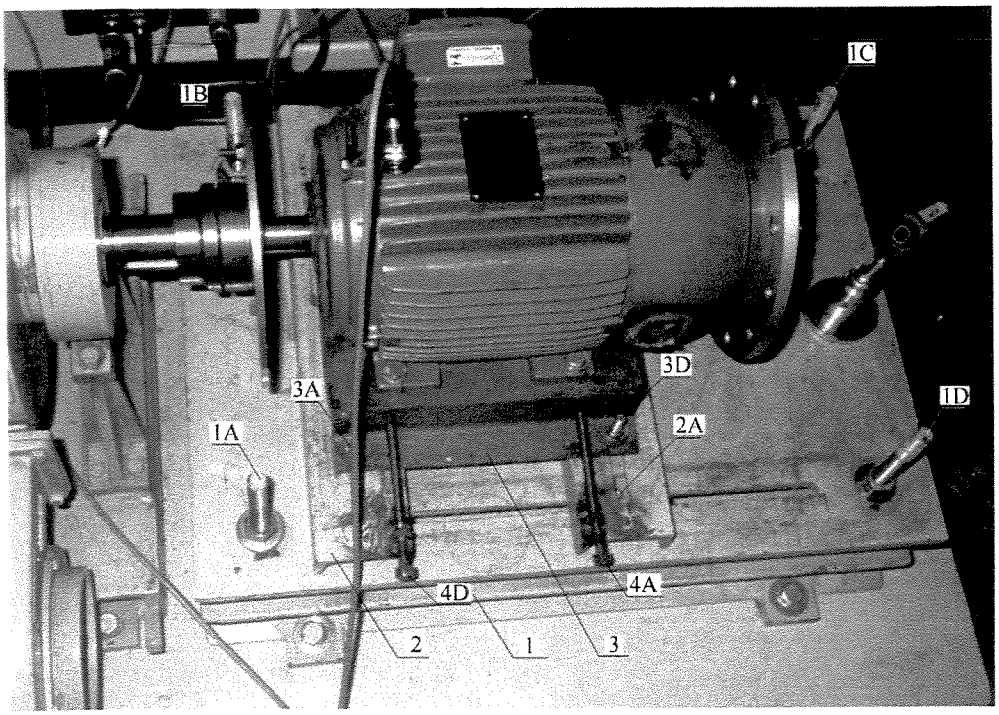


Figura 4.3 - Balanceamento e estrutura da bancada experimental.

A estrutura da bancada de teste é composta de três bases:

- a primeira base [1] é montada na base de concreto através de chumbadores e permite o ajuste vertical da bancada através dos parafusos 1A, 1B, 1C e 1D;
- a segunda base [2] é montada sobre a primeira base e permite o ajuste axial da bancada através dos parafusos 2A, 2B, 2C e 2D;
- a terceira base [3] é montada sobre a segunda base e permite o ajuste horizontal da bancada através dos parafusos 3A, 3B, 3C e 3D. Também permite um ajuste fino através dos parafusos 4A, 4B, 4C e 4D, essencial para o alinhamento a laser da bancada experimental. É nesta base que o motor elétrico é montado.

Foram coletados, aleatoriamente, 3.916 espectros no módulo *UltraSpec Analyzer* (3.492 - análise de vibração, 212 - análise de corrente e 212 - análise de fluxo magnético), numa série de 50 testes para cada excitação e repetidos sobre as mesmas condições. Após a coleta do sinal de cada excitação, a bancada era ajustada para a condição normal de funcionamento, ou seja, amplitudes $\leq 0{,}5$ mm/s, direção vertical, representando a condição boa para o Grupo K da norma VDI 2056 (1964). Quando necessário, verificou-se e realizou-se o alinhamento e balanceamento. Este trabalho exaustivo e laborioso garantiu a montagem de um banco de dados, imprescindível para o desenvolvimento do Sistema Especialista *SE_MIT* e do Sistema Híbrido *HY_NES*.

4.2 Detecção das excitações de origem mecânica através da análise de vibração

Os sinais de vibração foram coletados através do acelerômetro A0720GP, SN6714, sensibilidade de 0.1000 mV/m/s^2, Figura 4.1 [4]. O analisador foi configurado para janela *Hanning*, 3200 linhas, 10 médias, faixa de freqüência de 0 a 400 Hz e amplitudes medidas em velocidade (mm/s). Com o objetivo de observar defeitos que manifestam-se em altas freqüências, alguns espectros foram coletados na faixa de freqüência de 0 a 1200 Hz. As especificações técnicas do analisador e sensores são apresentadas no Anexo II.

O acelerômetro foi colocado alternadamente nas direções vertical, horizontal e axial, lado do ventilador e lado do acoplamento do motor. Nos espectros estas posições são identificadas por três letras: a primeira será sempre *A*, a segunda poderá ser *V* de vertical, *A* de axial ou *H* de horizontal e a última poderá ser *V* de ventoinha ou *A* de acoplamento.

4.2.1 Condição normal de funcionamento

Na Figura 4.4 têm-se os espectros de vibração para a condição normal de funcionamento do motor elétrico.

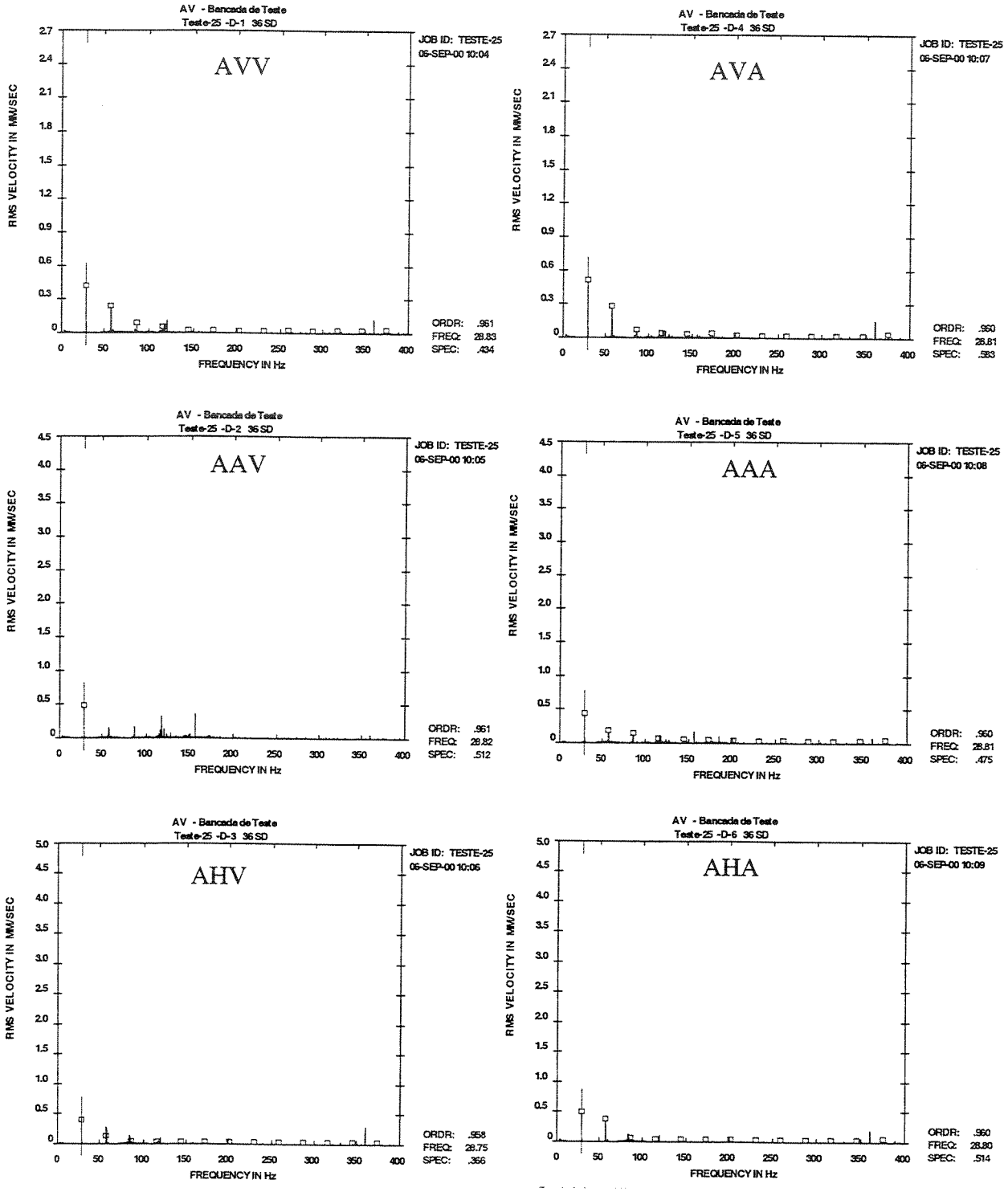


Figura 4.4 - Espectros de vibração para a condição normal de funcionamento.

4.2.2 Desbalanceamento

As massas de desbalanceamento de 21g.mm e 35,1g.mm foram colocadas no disco do lado do ventilador. Seus espectros são mostrados nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente.

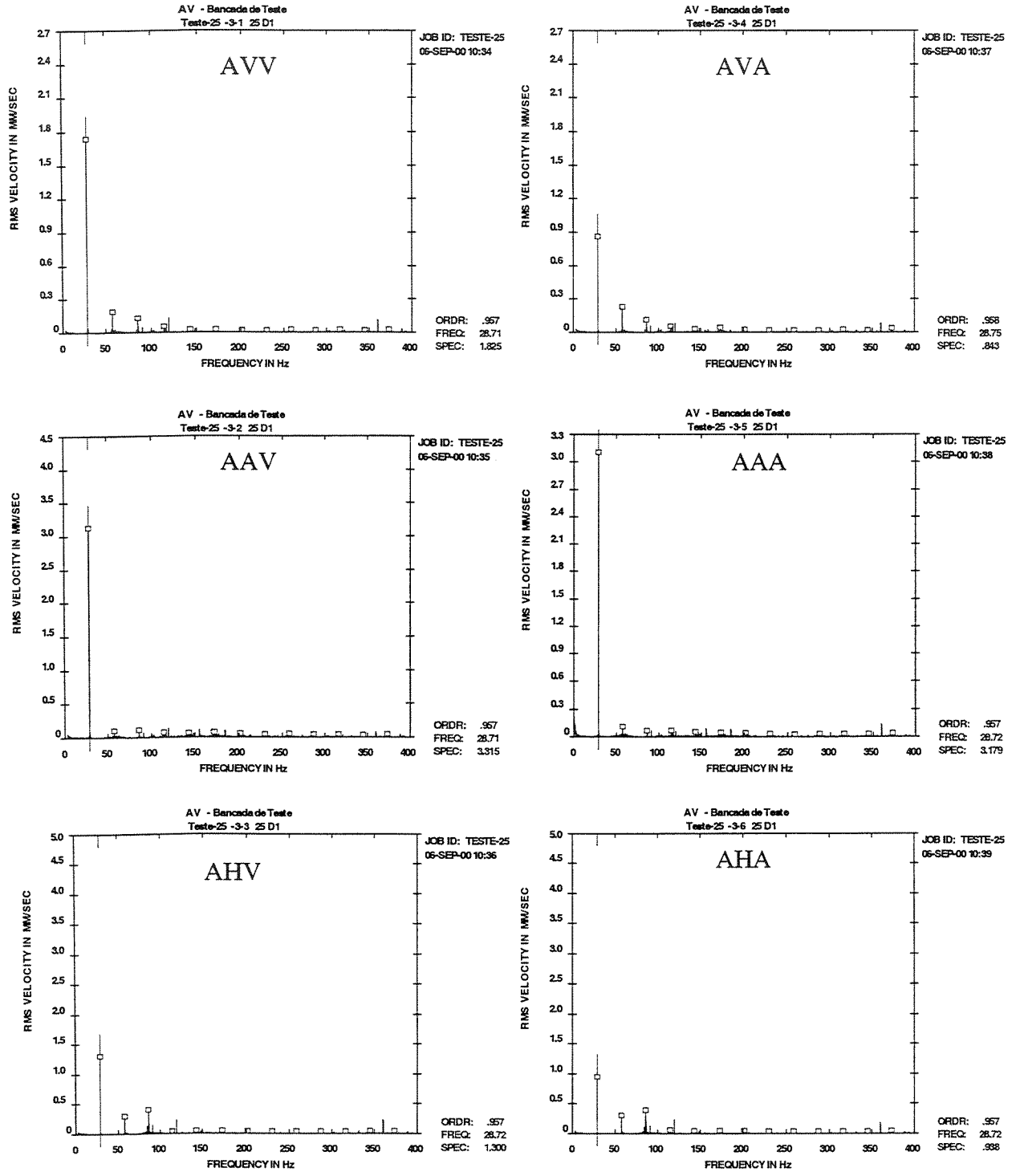


Figura 4.5 - Espectros de vibração para desbalanceamento de 21g.mm.

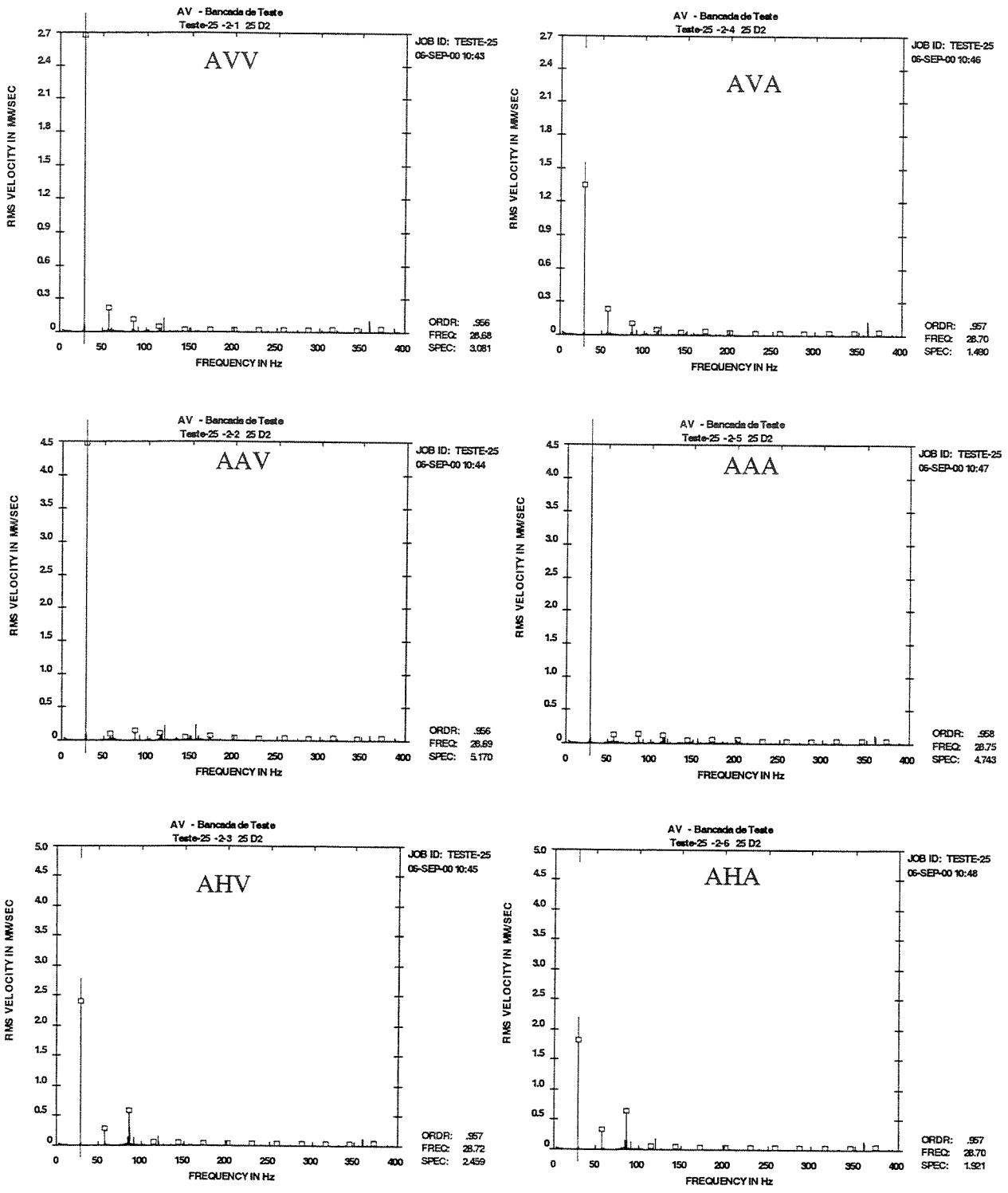


Figura 4.6 - Espectros de vibração para desbalanceamento de 35,1g.mm.

4.2.3 Desalinhamento

A excitação por desalinhamento foi obtida desnivelando-se a bancada através dos parafusos 1C e 1D, Figura 4.3 . Na Figura 4.7, têm-se os espectros de vibração para o desalinhamento.

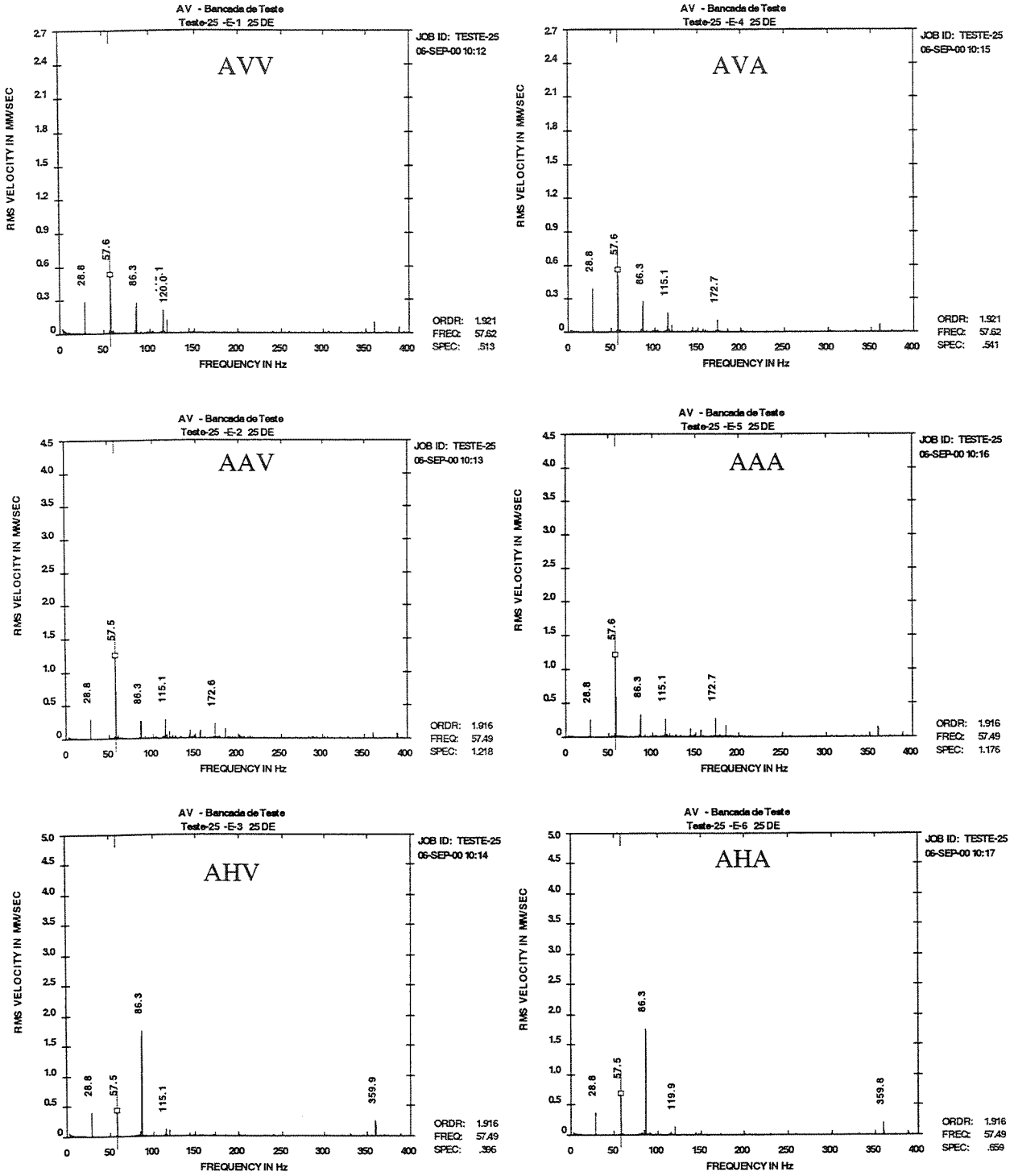


Figura 4.7 - Espectros de vibração para desalinhamento.

4.2.4 Folga mecânica

A excitação por folga mecânica foi obtida através do afrouxamento dos parafusos de fixação do motor à base da bancada. Na Figura 4.8. têm-se os espectros de vibração para a folga mecânica.

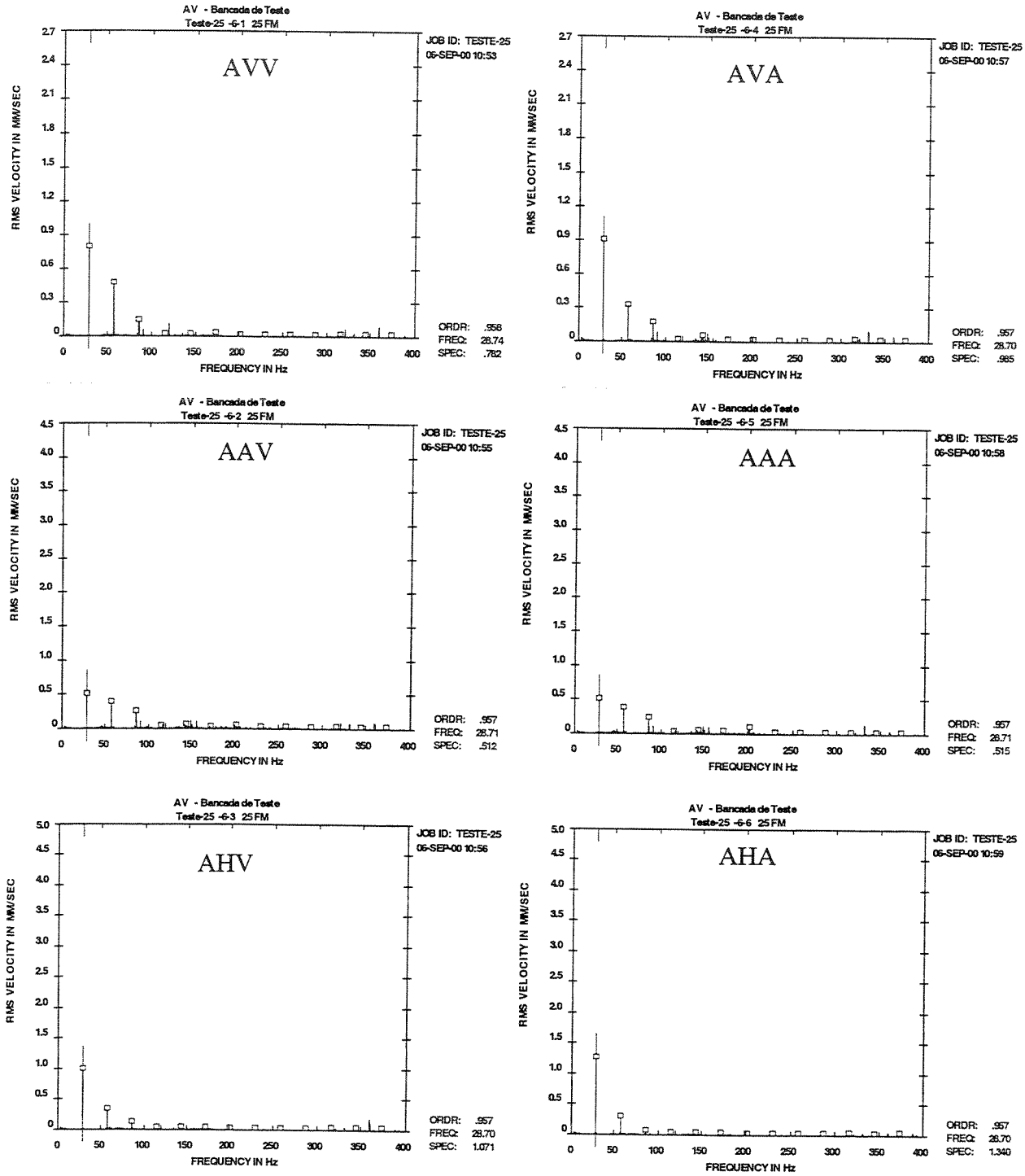


Figura 4.8 - Espectros de vibração para folga mecânica.

4.3 Detecção de barras quebradas

Vários autores têm pesquisado o problema de barras quebradas e o desenvolvimento de técnicas para realizar o seu diagnóstico: Cho e Lang (1992), Elkasabgy e Eastham (1992), Elkasabgy *et al.* (1986), Hargis *et al.* (1982), Kliman (1986), Kliman *et al.* (1989), Lowther e Silvester (1986), Milimonfared *et al.* (1998), Penman e Stavrou (1996), Walliser e Landy (1994) e Williamson e Smith (1982).

Brito *et al.* (2001), apresentaram novos resultados para a detecção de barras quebradas através da análise de corrente e análise de fluxo magnético. Neste trabalho, visando o desenvolvimento do Sistema Especialista *SE_MIT* e do Sistema Híbrido *HY_NES*, os espectros também foram coletados através da análise de vibração.

De todas as excitações introduzidas no motor elétrico, barras quebradas foi a mais complexa e laboriosa. Na revisão bibliográfica e nas consultas feitas aos profissionais das indústrias, não foi possível encontrar um procedimento que simulasse a situação real. Na Figura 2.14, Capítulo II, tem-se um caso real de um motor Toshiba de 500 CV apresentando quatro barras trincadas e uma quebrada. Este é um motor de grande porte e difere dos motores de 5 CV usados nos experimentos, dificultando a simulação deste tipo de falha.

Para se conhecer a geometria das barras e melhor simular esta excitação, fez-se um corte em um outro rotor, também de 5 CV, Figura 4.9. O rompimento progressivo de 2, 3, 5 e 7 barras do rotor, foram feitos através de brocas de diâmetros variando entre 1,2 e 5 mm. Na Figura 4.10 tem-se uma vista do rotor e estator e na Figura 4.11 tem-se o rotor com as sete barras rompidas.

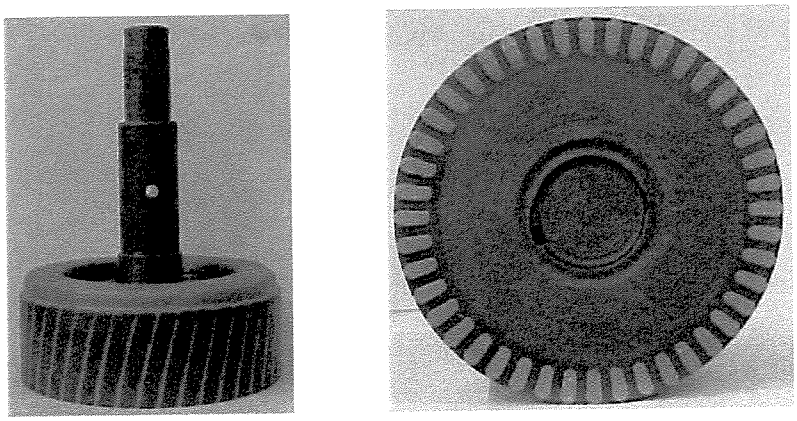


Figura 4.9 - Detalhes das barras do rotor.

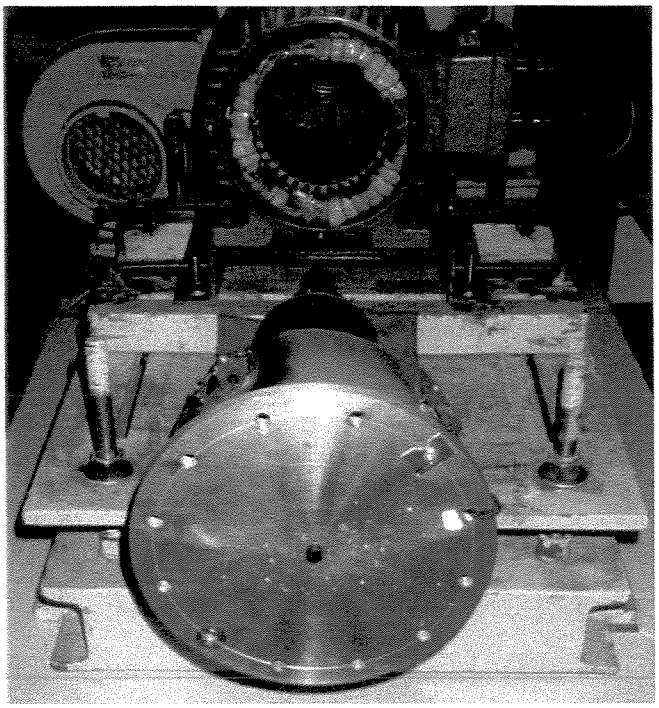


Figura 4.10 - Vista do rotor e estator.

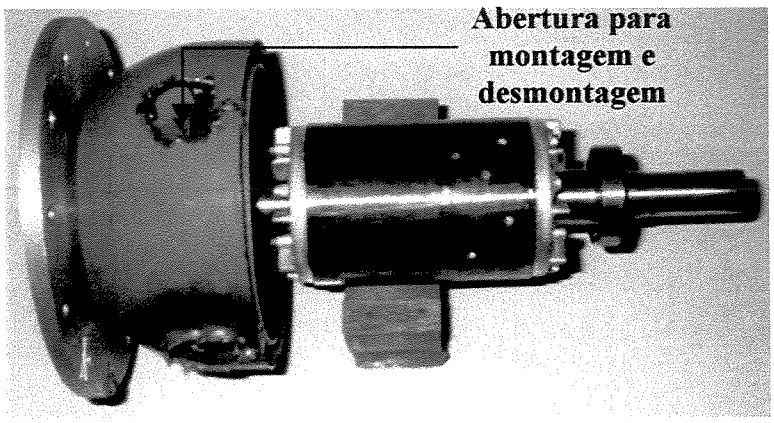


Figura 4.11 - Rotor com as sete barras rompidas.

4.3.1 Detecção de barras quebradas através da análise de vibração

Os sinais coletados através da análise de vibração para barras quebradas, seguem os mesmos procedimentos descritos para as excitações de origem mecânica.

Na Figura 4.12, têm-se os espectros de vibração para duas barras quebradas, amplitudes em mm/s.

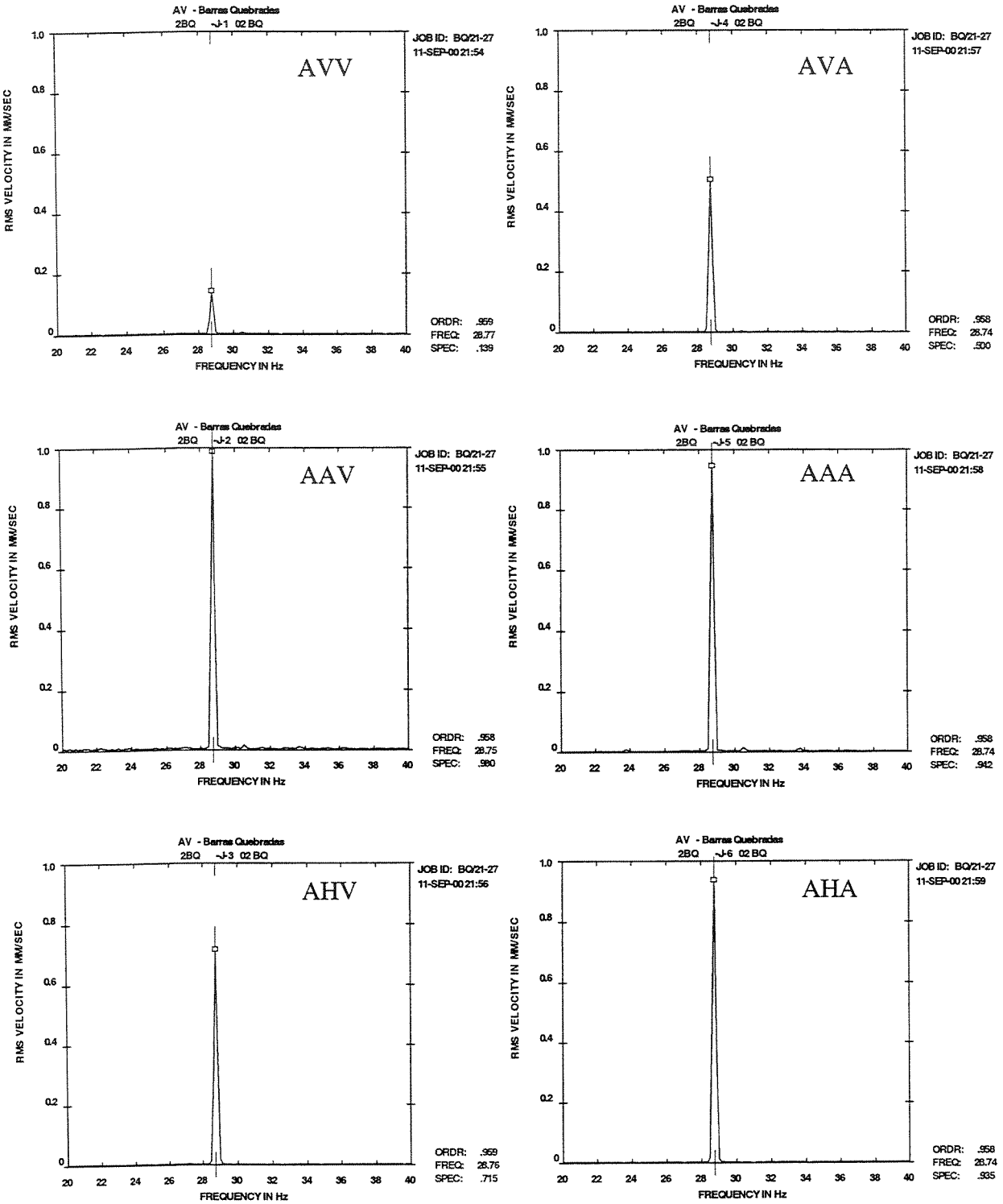


Figura 4.12 - Espectros de vibração para duas barras quebradas, amplitudes em mm/s.

Na Figura 4.13, têm-se os espectros de vibração para duas barras quebradas. Os espectros de vibração (mm/s), apresentados em *dB* são referenciados à velocidade de 1 *in/s*.

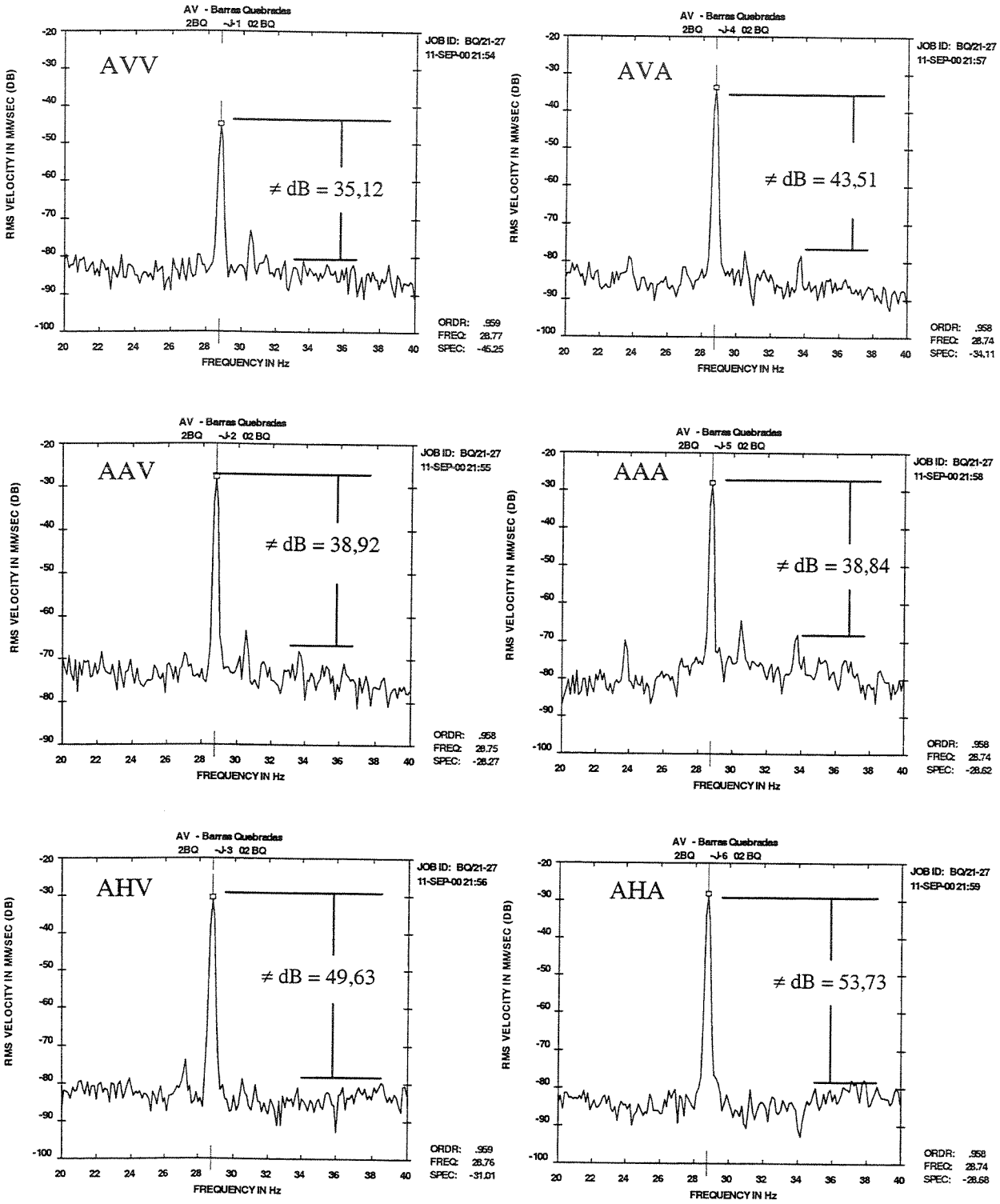


Figura 4.13 - Espectros de vibração para duas barras quebradas, amplitudes em *dB*.

Na Figura 4.14, têm-se os espectros de vibração para três barras quebradas, amplitudes em mm/s.

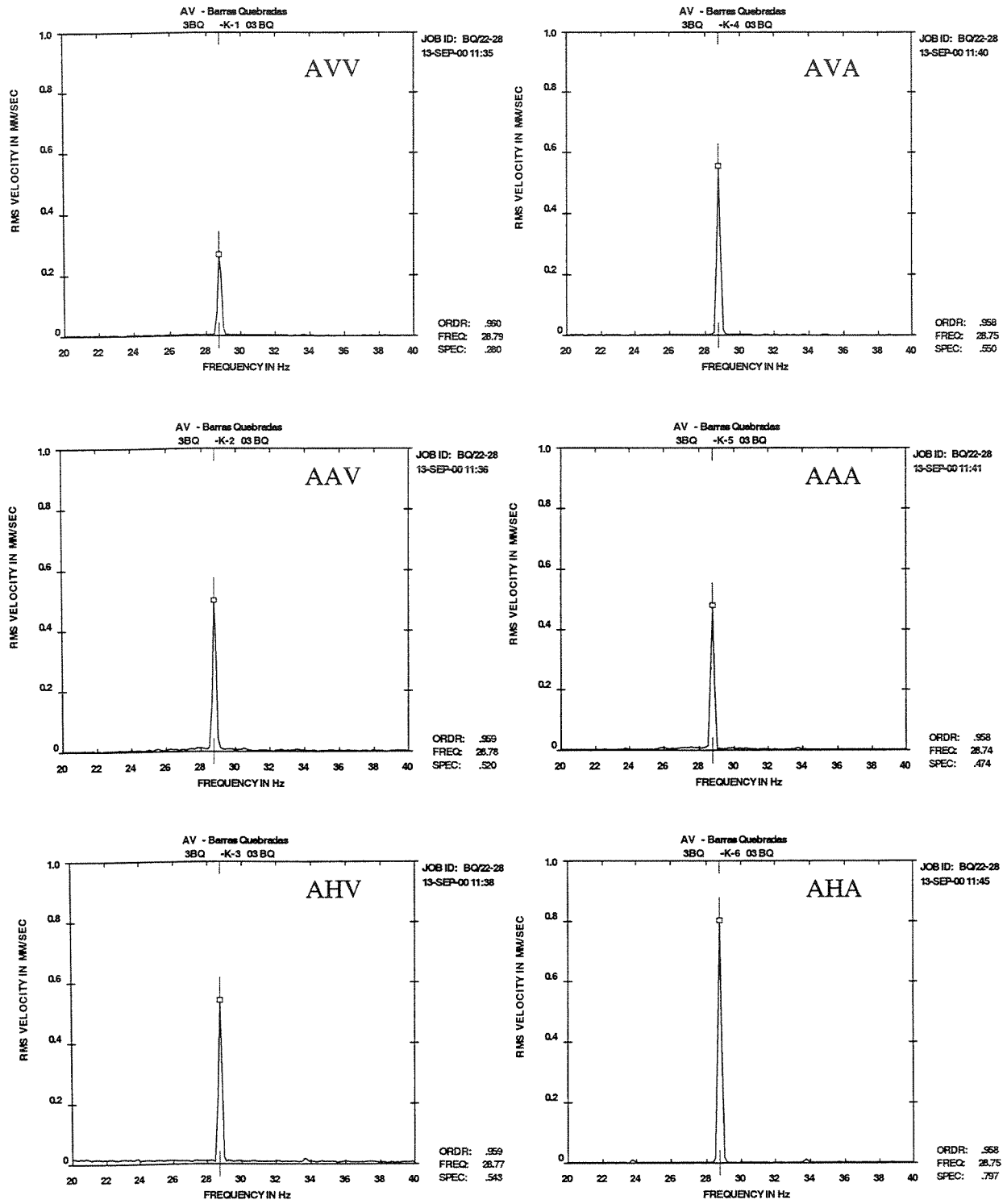


Figura 4.14 - Espectros de vibração para três barras quebradas, amplitudes em mm/s.

Na Figura 4.15, têm-se os espectros de vibração para três barras quebradas. Os espectros de vibração (mm/s), apresentados em *dB* são referenciados à velocidade de 1 *in/s*.

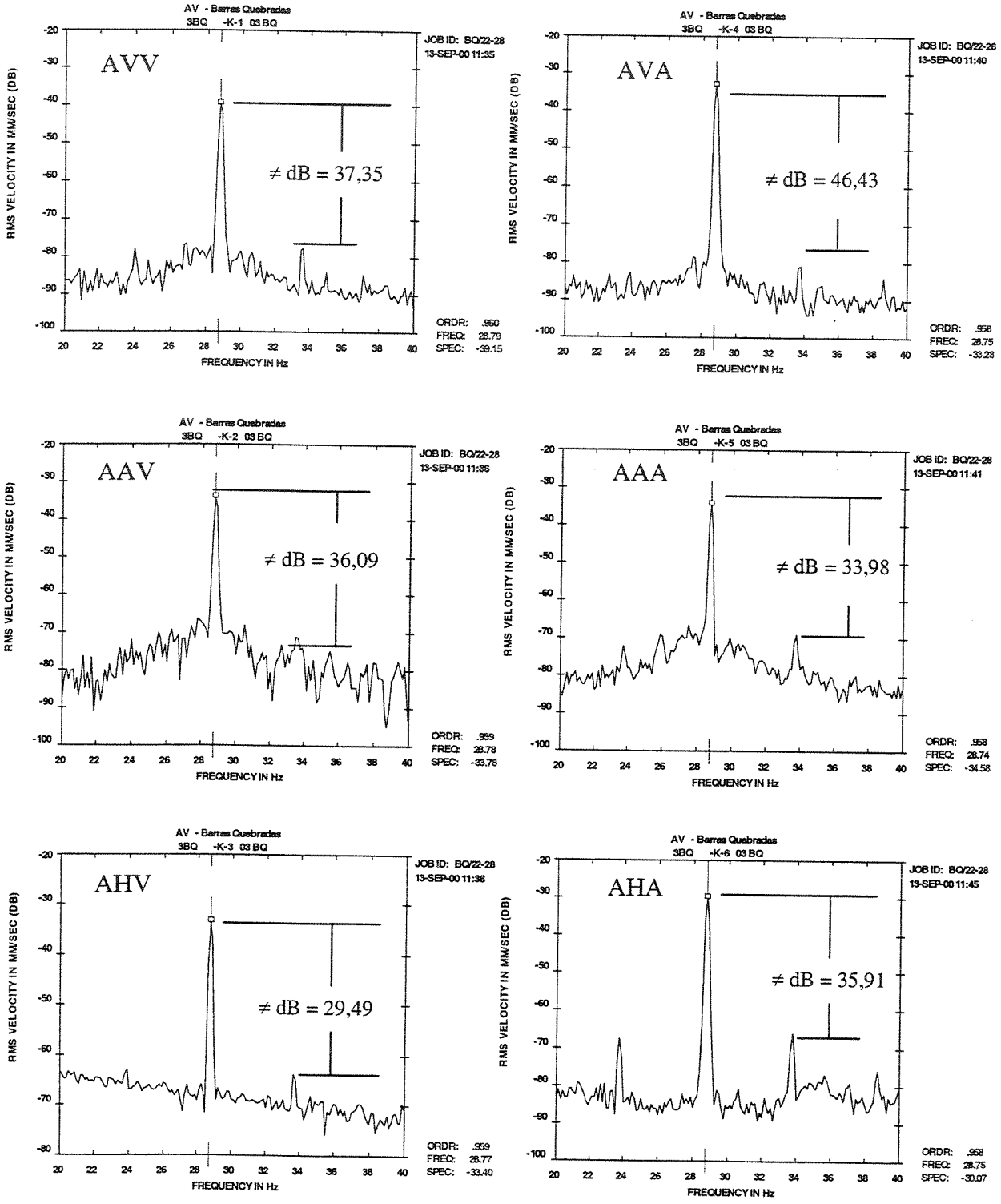


Figura 4.15 - Espectros de vibração para três barras quebradas, amplitudes em *dB*.

Na Figura 4.16, têm-se os espectros de vibração para cinco barras quebradas, amplitudes em mm/s.

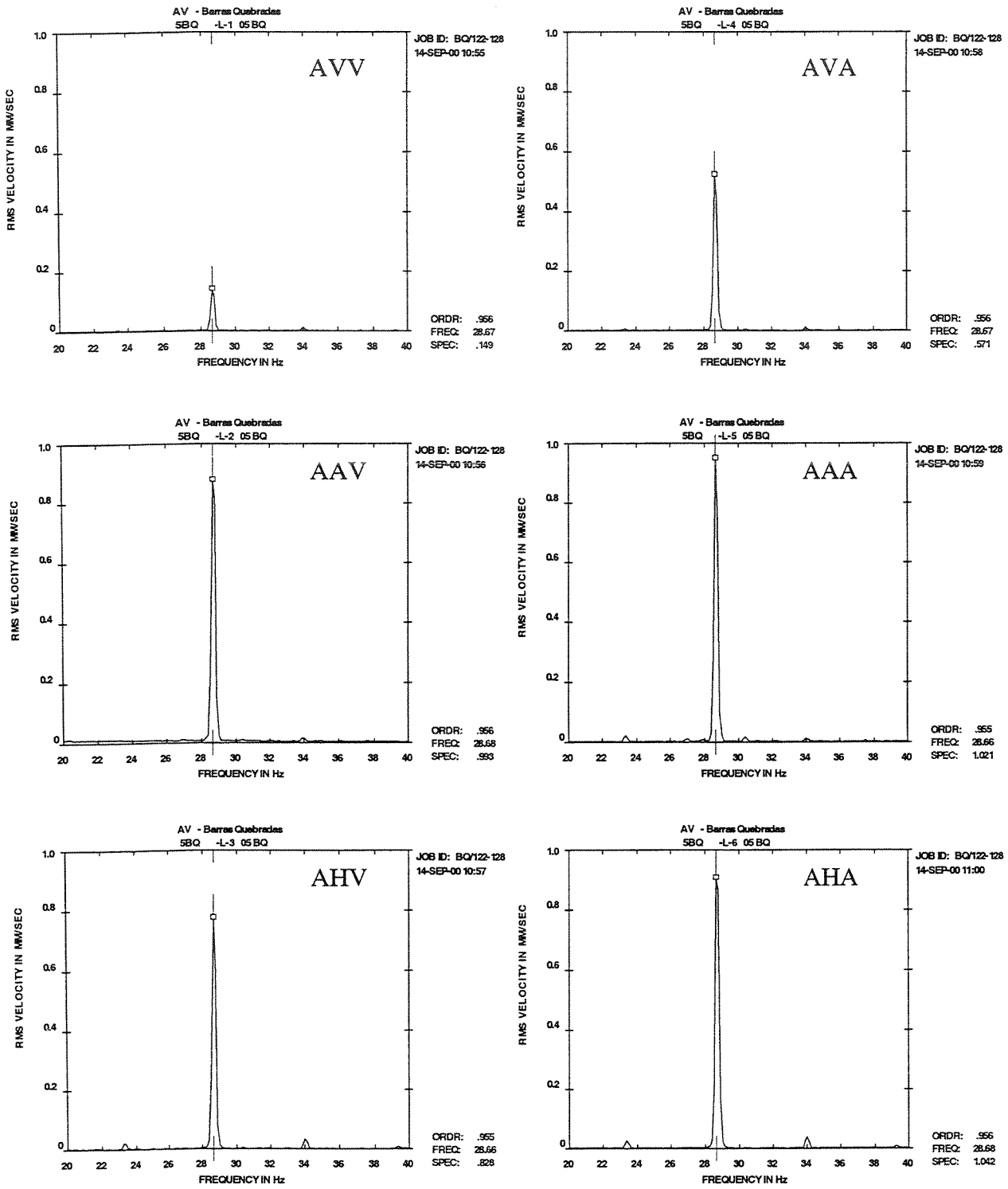


Figura 4.16 - Espectros de vibração para cinco barras quebradas, amplitudes em mm/s.

Na Figura 4.17, têm-se os espectros de vibração para cinco barras quebradas. Os espectros de vibração (mm/s), apresentados em *dB* são referenciados à velocidade de 1 *in/s*.

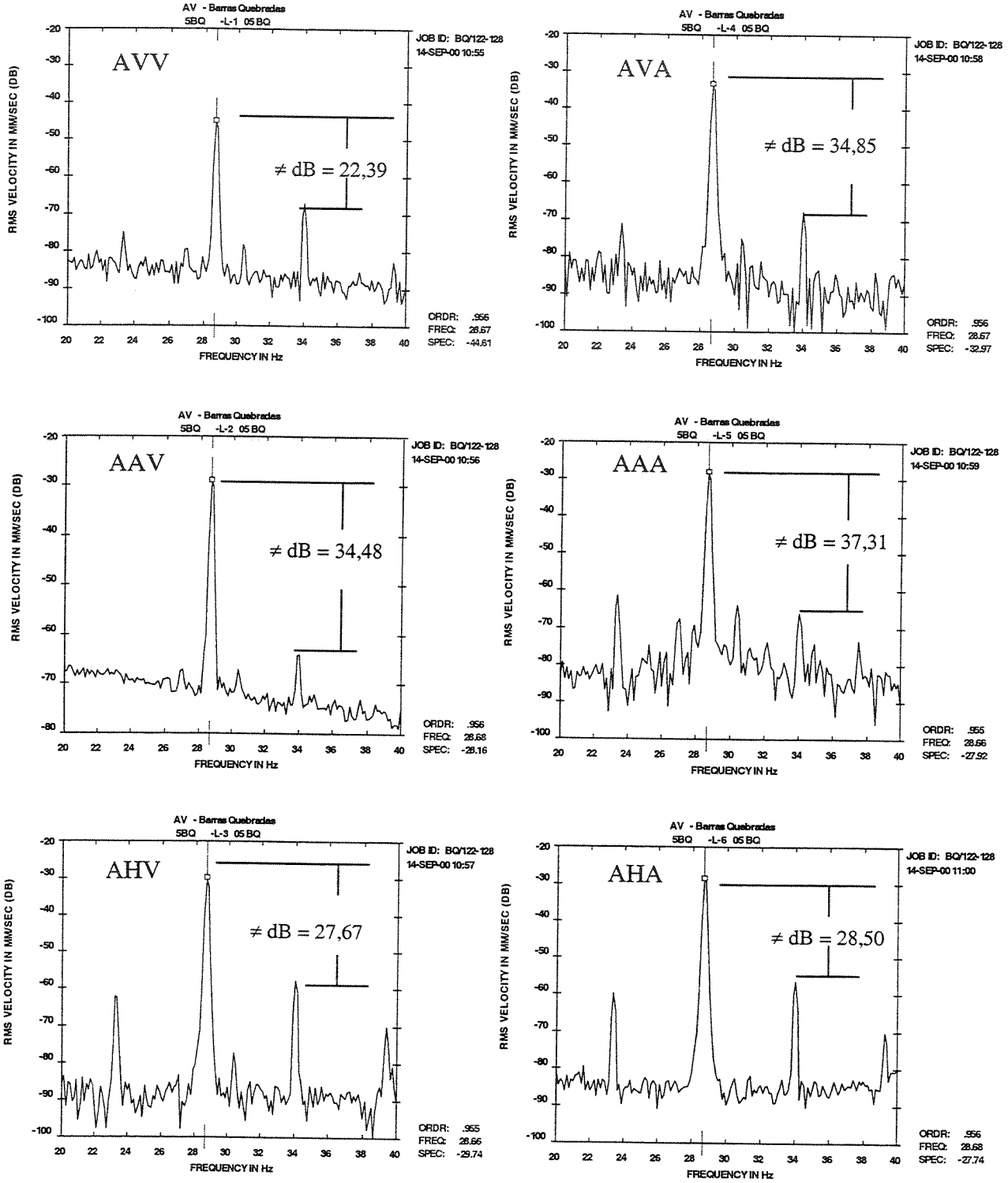


Figura 4.17 - Espectros de vibração para cinco barras quebradas, amplitudes em *dB*.

Na Figura 4.18, têm-se os espectros de vibração para sete barras quebradas, amplitudes em mm/s.

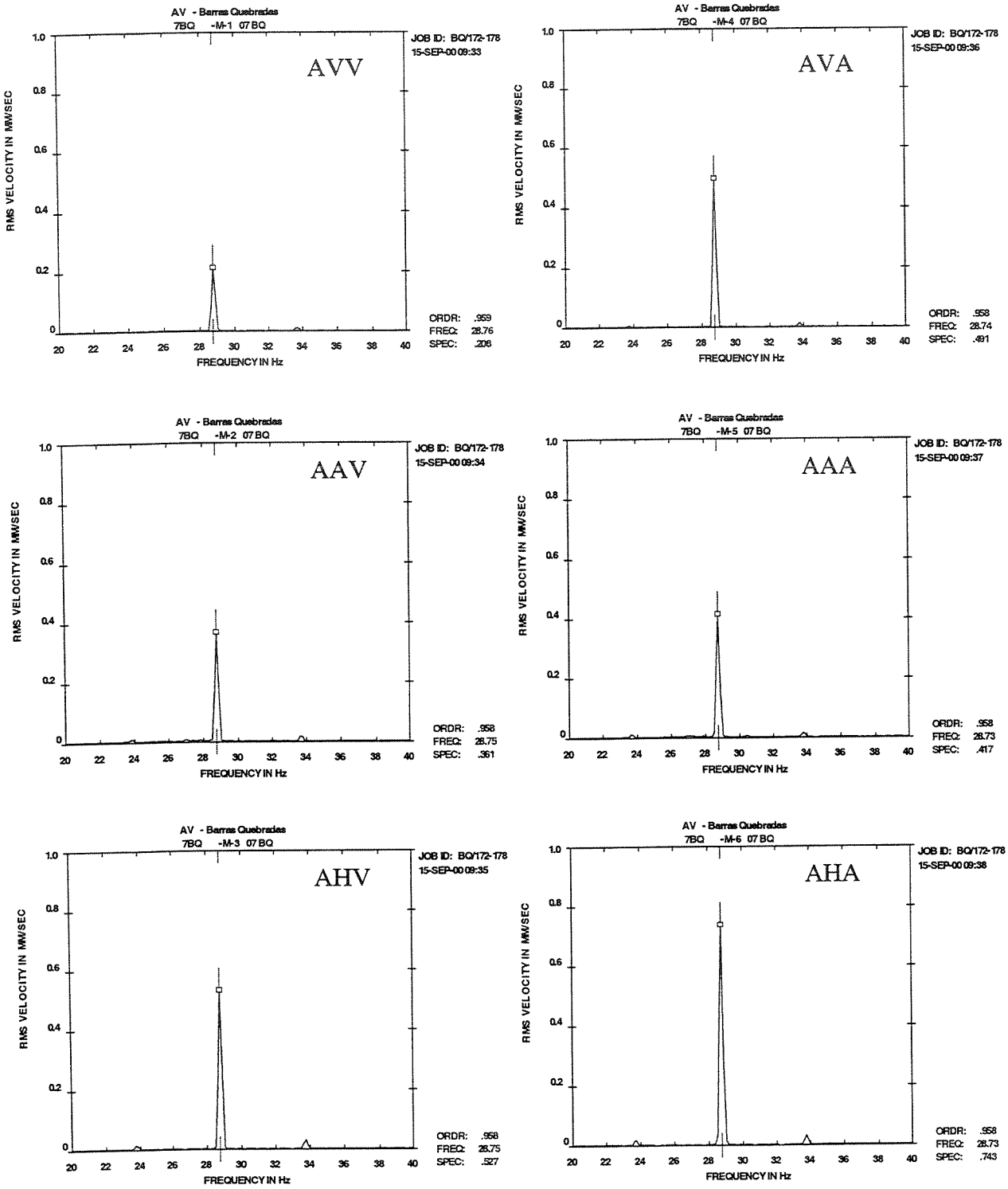


Figura 4.18 - Espectros de vibração para sete barras quebradas, amplitudes em mm/s.

Na Figura 4.19, têm-se os espectros de vibração para sete barras quebradas *dB*. Os espectros de vibração (mm/s), apresentados em *dB* são referenciados à velocidade de 1 *in/s*.

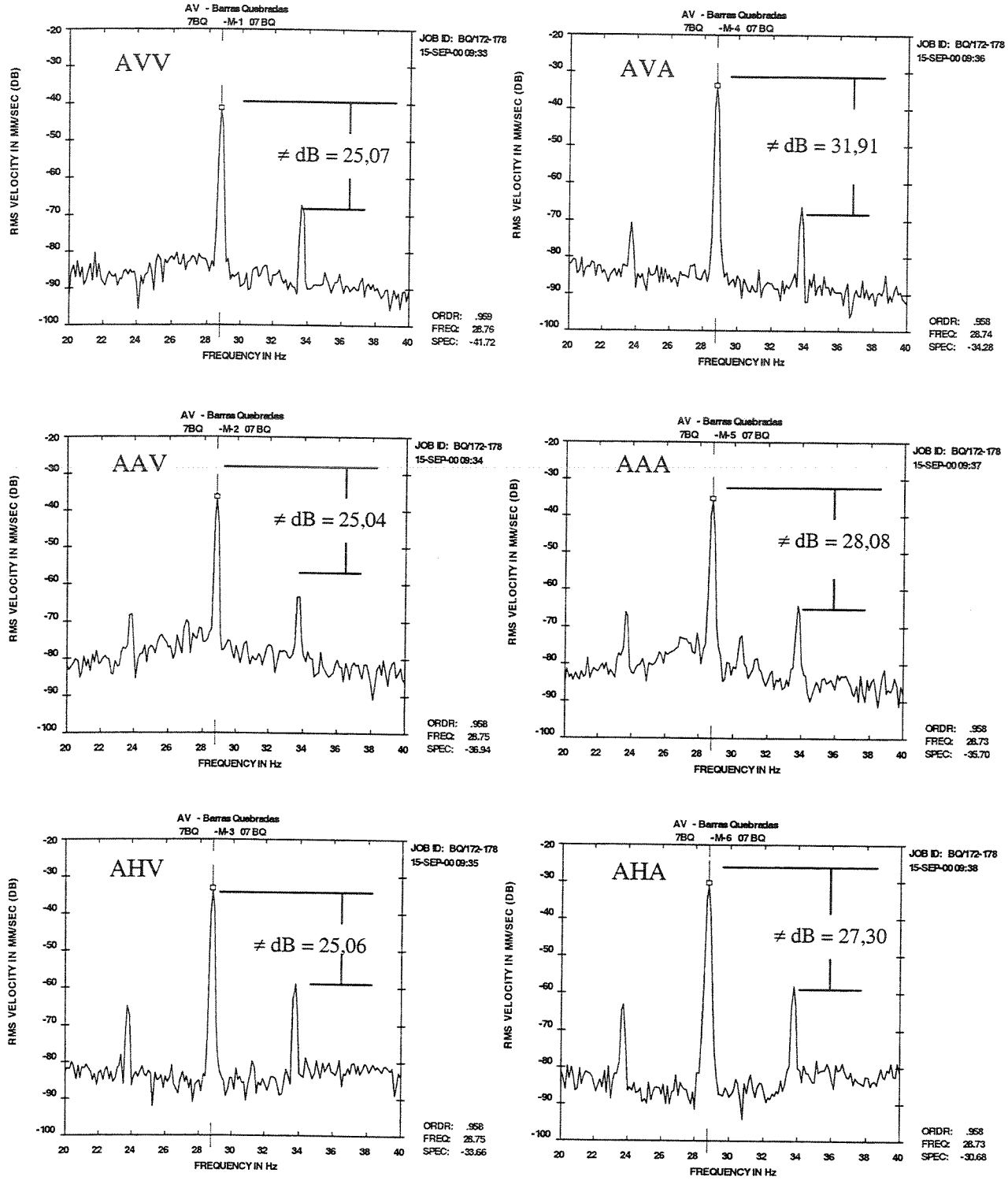


Figura 4.19 - Espectros de vibração para sete barras quebradas, amplitudes em *dB*.

4.3.2 Detecção de barras quebradas através da análise de corrente

Os espectros de corrente das barras quebradas foram coletados através de um alicate amperímetro (*AC Current Probe*), modelo MM 185 da *AEMC Instruments*, Figura 4.1 [12], colocado alternadamente nas três fases de alimentação do motor elétrico. Este sensor tem entrada de 150 A, AC saída de 1 mA/A AC, relação de 1.000 para 0.005. Nas Figuras 4.20 a 4.23 tem-se os espectros de corrente para 2, 3, 5 e 7 barras quebradas, respectivamente. Os espectros de corrente (*Ampères*), apresentados em *dB* são referenciados à corrente de 1 *A*.

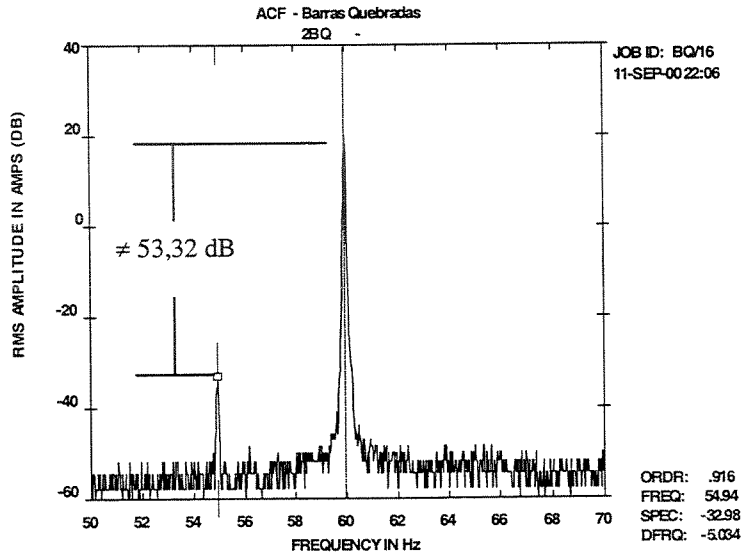


Figura 4.20 - Espectro de corrente para duas barras quebradas.

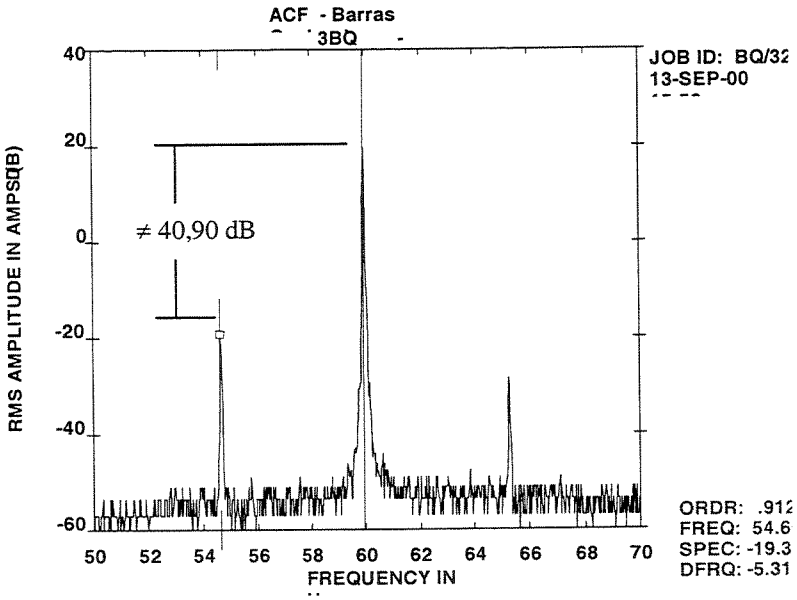


Figura 4.21 - Espectro de corrente para três barras quebradas.

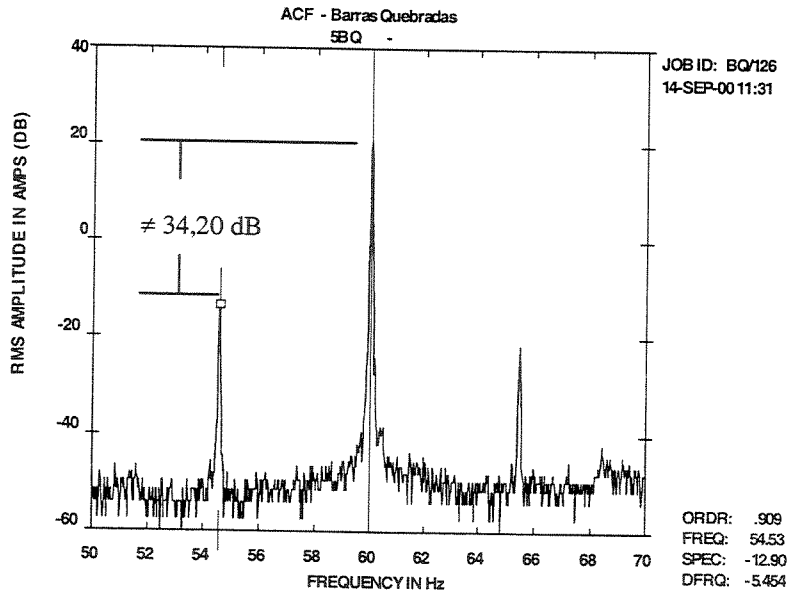


Figura 4.22 - Espectro de corrente para cinco barras quebradas.

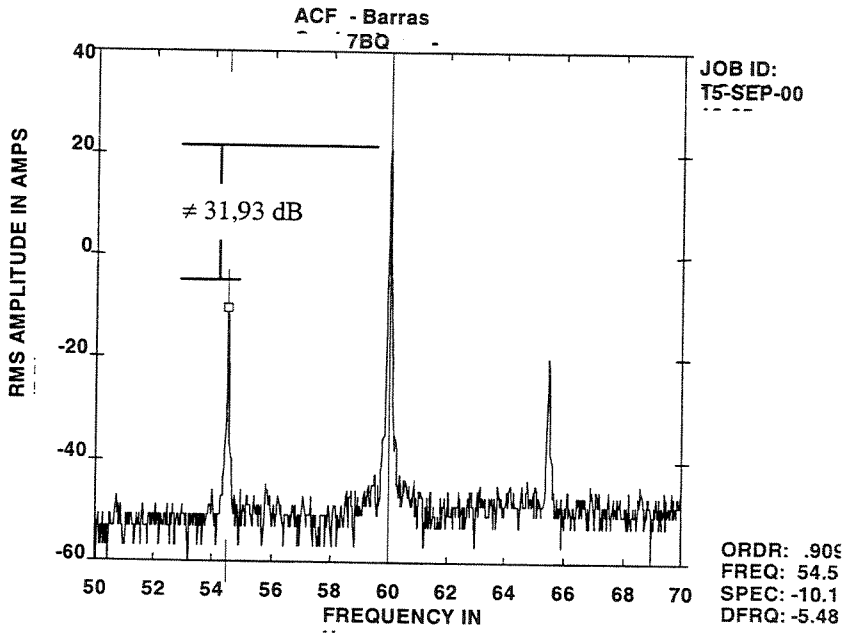


Figura 4.23 - Espectro de corrente para sete barras quebradas.

4.3.3 Detecção de barras quebradas através da análises de fluxo magnético

Os espectros de fluxo magnético das barras quebradas foram coletados através da bobina de fluxo (343 *Flux Coil*) da *CSI*, a fixada central e axialmente ao motor elétrico, Figura 4.24, mantendo-se sempre a mesma posição. Devido à necessidade de colocação do disco de

balanceamento no lado da ventoinha, a bobina de fluxo teve de ser instalada num pneu fixado à estrutura da bancada.

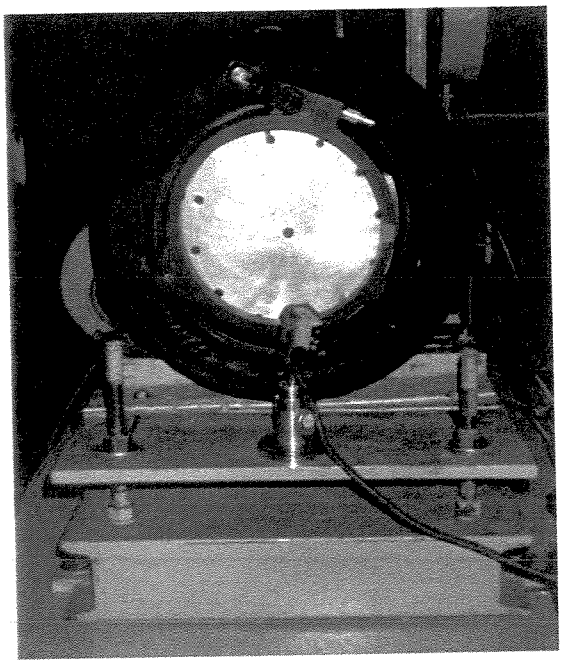


Figura 4.24 - Bobina de fluxo fixada axialmente.

Nas Figuras 4.25 a 4.28 têm-se os espectros de fluxo magnético para 2, 3, 5 e 7 barras quebradas, respectivamente. Os espectros de fluxo magnético (*Ampères*), apresentados em *dB* são referenciados à corrente de 1 *A*.

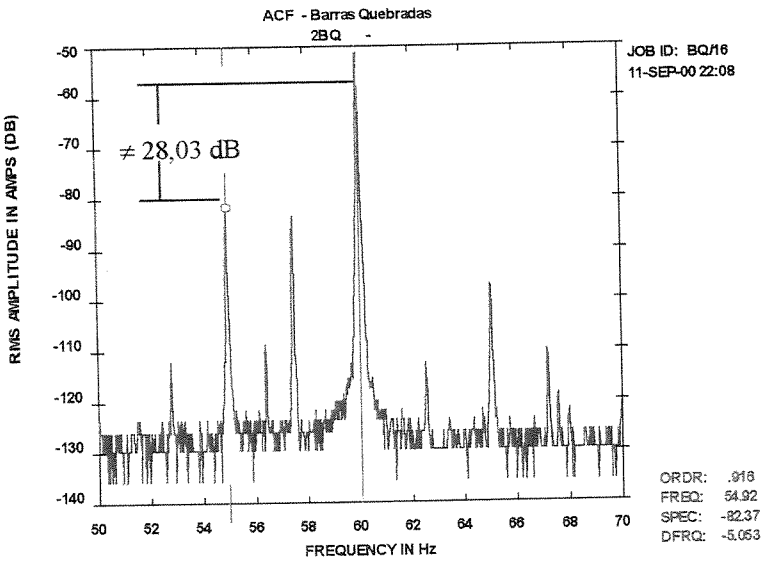


Figura 4.25 – Espectro de fluxo magnético para duas barras quebradas.

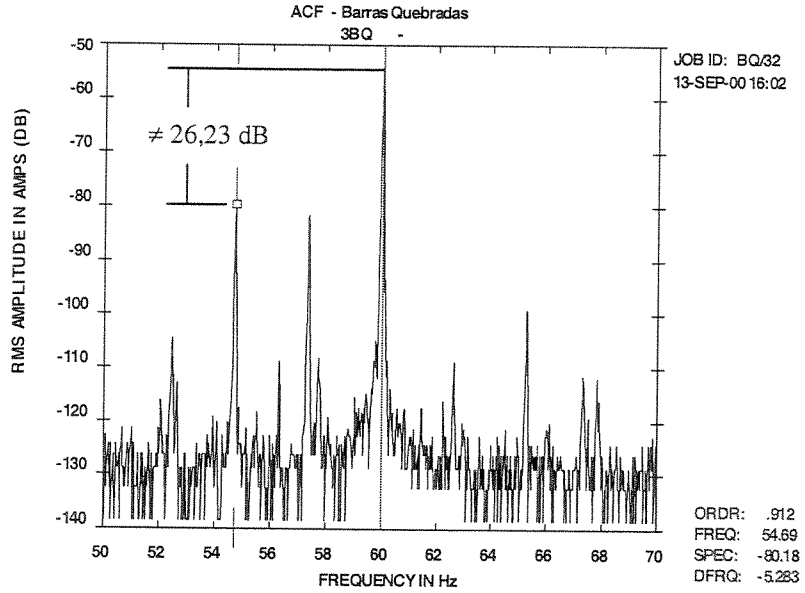


Figura 4.26 - Espectro de fluxo magnético para três barras quebradas.

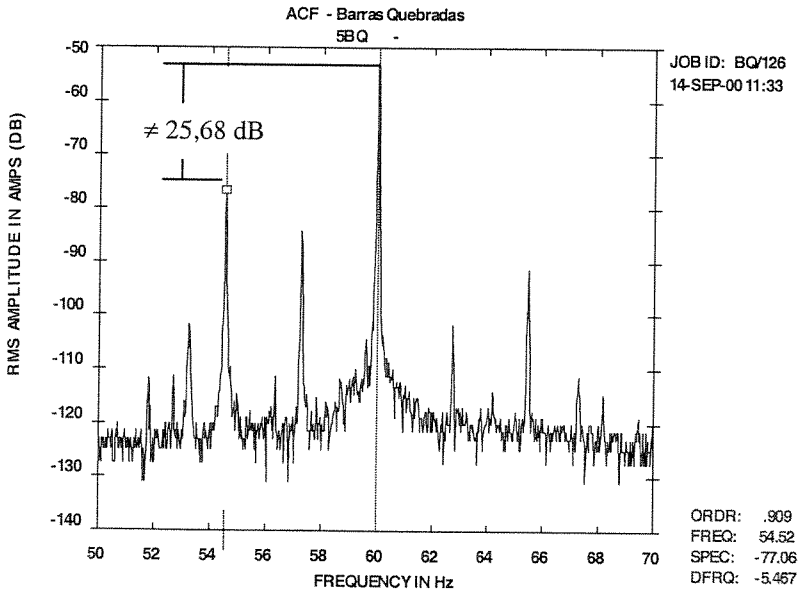


Figura 4.27 - Espectro de fluxo magnético para cinco barras quebradas.

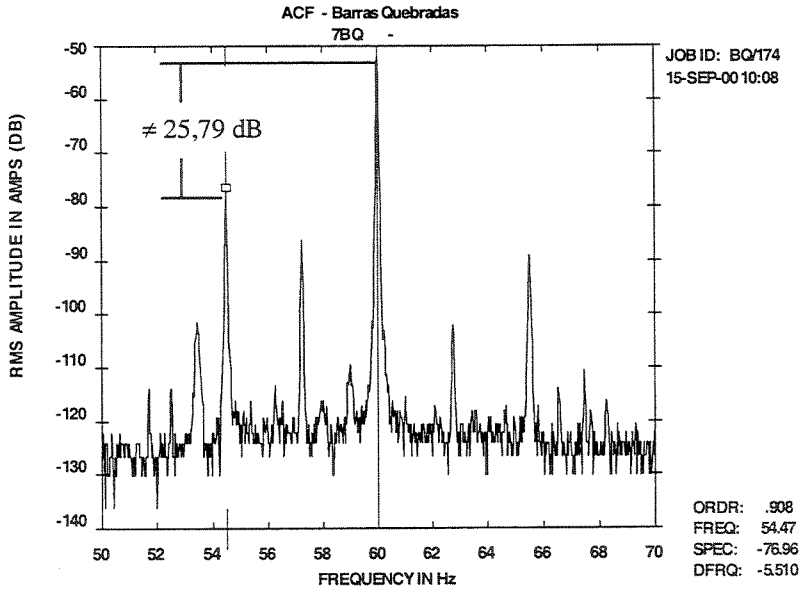


Figura 4.28 – Espectro de fluxo magnético para sete barras quebradas.

4.3.4 Resultados da detecção de barras quebradas

A excitação devido a barras quebradas foi pesquisada através de três tecnologias, sendo as amplitudes (*A*) em *dB*. Na análise de vibração o diagnóstico é feito em $1 \times f_r \pm 2 \times f_s$. Nas análises de corrente e fluxo o diagnóstico é feito em $1 \times f_l \pm 2 \times f_s$, sendo f_r a freqüência de rotação, f_l a freqüência de linha e f_s a freqüência de escorregamento, calculada através da Equação (I.6), Anexo I.

Na Tabela 4.1 tem-se a severidade e recomendações para a análise de corrente, baseado na *Liberty Technologies Inc.*, Filho (2000).

Na Tabela 4.2 tem-se os resultados dos estudos da excitação de barras quebradas através da análise de vibração, direções radial e axial, lado da ventoinha e lado do ventilador.

Na Tabela 4.3 tem-se os resultados obtidos através das análise de corrente e fluxo magnético. Os resultados são apresentados para quatro testes escolhidos aleatoriamente.

Tabela 4.1 - Severidade e recomendações para análise de corrente, Filho (2000).

A [dB] $f_l - 2 \times f_s$	Avaliação da condição	Ação recomendada.
> 50 dB	excelente	nenhuma
44 a 50 dB	boa	nenhuma
39 a 44 dB	moderada	continuar inspeção e analisar somente a tendência
35 a 39 dB	desenvolvendo trinca na barra do rotor ou juntas com alta resistência	reduzir intervalo de inspeção e observar curva de tendência
30 a 35 dB	provavelmente duas barras trincadas ou quebradas ou juntas de altas resistências	fazer análise espectral de vibrações para confirmar a fonte do problema
25 a 30 dB	muitas barras trincadas e/ou quebradas, várias trincas nos anéis de curto e falhas severas em toda gaiola	desmontar o rotor para inspeção
< 25 dB	severa	desmontar ou substituir o rotor para inspeção

Tabela 4.2 - Resultados médios de quatro testes através da análise de vibração.

Pontos de medição	Barras quebradas Diferença em *dB* das amplitudes em $1 \times f_r + 2 \times f_s$.			
	2 BQ	3 BQ	5 BQ	7 BQ
AVV	35,12	37,35	22,39	25,07
AAV	38,92	36,09	34,48	25,04
AHV	49,63	29,49	27,67	25,06
AVA	43,51	46,23	34,85	31,91
AAA	38,84	33,98	37,71	28,08
AHA	53,73	35,91	28,50	27,30

Tabela 4.3 - Resultados médios de quatro testes através das análises de corrente e fluxo.

Barras quebradas	Diferença em *dB* das amplitudes em 1 x $f_l \pm 2$ x f_s.	
	Análise de Corrente	Análise de Fluxo
2 BQ	53,32	28,03
3 BQ	40,90	26,23
5 BQ	34,20	25,68
7 BQ	31,93	25,79

Dos valores apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3, somente os relativos à análise de corrente podem ser comparados às severidades apresentadas na Tabela 4.1.

A medida que aumenta o número de barras quebradas, a diferença em *dB* da banda lateral de 2 x f_s em torno da f_r (análise de vibração) e f_l (análises de corrente e fluxo) diminui. Quanto menor for esta diferença, maior será o número de barras quebradas ou trincadas. Isto ocorre devido a alteração da uniformidade do campo magnético.

4.4 Detecção do desequilíbrio de fase

Bowers *et al.* (1993) usaram a integração das tecnologias de análise de temperatura, análise de fluxo e análise de corrente parasita para detectar problemas de origem elétrica num motor de indução trifásico de 5 HP, 2 pólos. Os casos históricos discutem problemas de aquecimento, barras quebradas e desequilíbrio de fase.

Leonard e Thomson (1986), Penman *et al.* (1986) e Penman *et al.* (1994), estudaram os problemas relacionados com as falhas simétricas e assimétricas do estator.

O desequilíbrio de fase é um dos problemas mais freqüente nas indústrias. Provoca superaquecimento nos motores elétricos, reduz sua vida útil e gera vibrações que por sua vez provocam desgastes mecânicos e ruídos.

Para a sua inclusão em um plano de manutenção preditiva, é necessário conhecer seu comportamento e determinar suas freqüências determinísticas.

O desequilíbrio de fase, por ser um problema de origem elétrica, é geralmente identificado através da análise de corrente ou análise de fluxo. Brito *et al.* (2001) identificaram e relacionaram as freqüências determinísticas ao desequilíbrio de fase, através da análise de vibração e análise de fluxo magnético.

Sendo a análise de vibração universalmente aplicada nas plantas industriais, a detecção do desequilíbrio de fase através dessa técnica torna-se uma importante contribuição para a inclusão deste tipo de problema no programa de manutenção preditiva.

Para a análise do comportamento do motor alimentado por tensões desequilibradas, realizou-se uma série aleatória de 50 testes para as seguintes situações:

- sem introdução de desequilíbrio (SD): valor eficaz da tensão $V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = 220$ V;
- desequilíbrio de fase DF_2: $V_{AB} = 210$ V, $V_{BC} = 220$ V e $V_{CA} = 210$ V;
- desequilíbrio de fase DF_1: $V_{AB} = 200$ V, $V_{BC} = 220$ V e $V_{CA} = 200$ V;
- *single phase* (SP): provocado através do corte de uma das fases de alimentação do motor.

Os desequilíbrios de fase DF_1 e DF_2 foram obtidos através da inserção de uma resistência variável, Figura 4.1 [14], em uma das fases de alimentação do motor, provocando uma queda de tensão na linha.

4.4.1 Detecção do desequilíbrio de fase através da análise de vibração

Os sinais coletados através da análise de vibração para desequilíbrio de fase, seguem os mesmos procedimentos descritos para as excitações de origem mecânica.

Na Figura 4.29, têm-se os espectros de vibração para desequilíbrio de fase DF_2 = 210V ($V_{AB} = 210$ V, $V_{BC} = 220$ V e $V_{CA} = 210$ V).

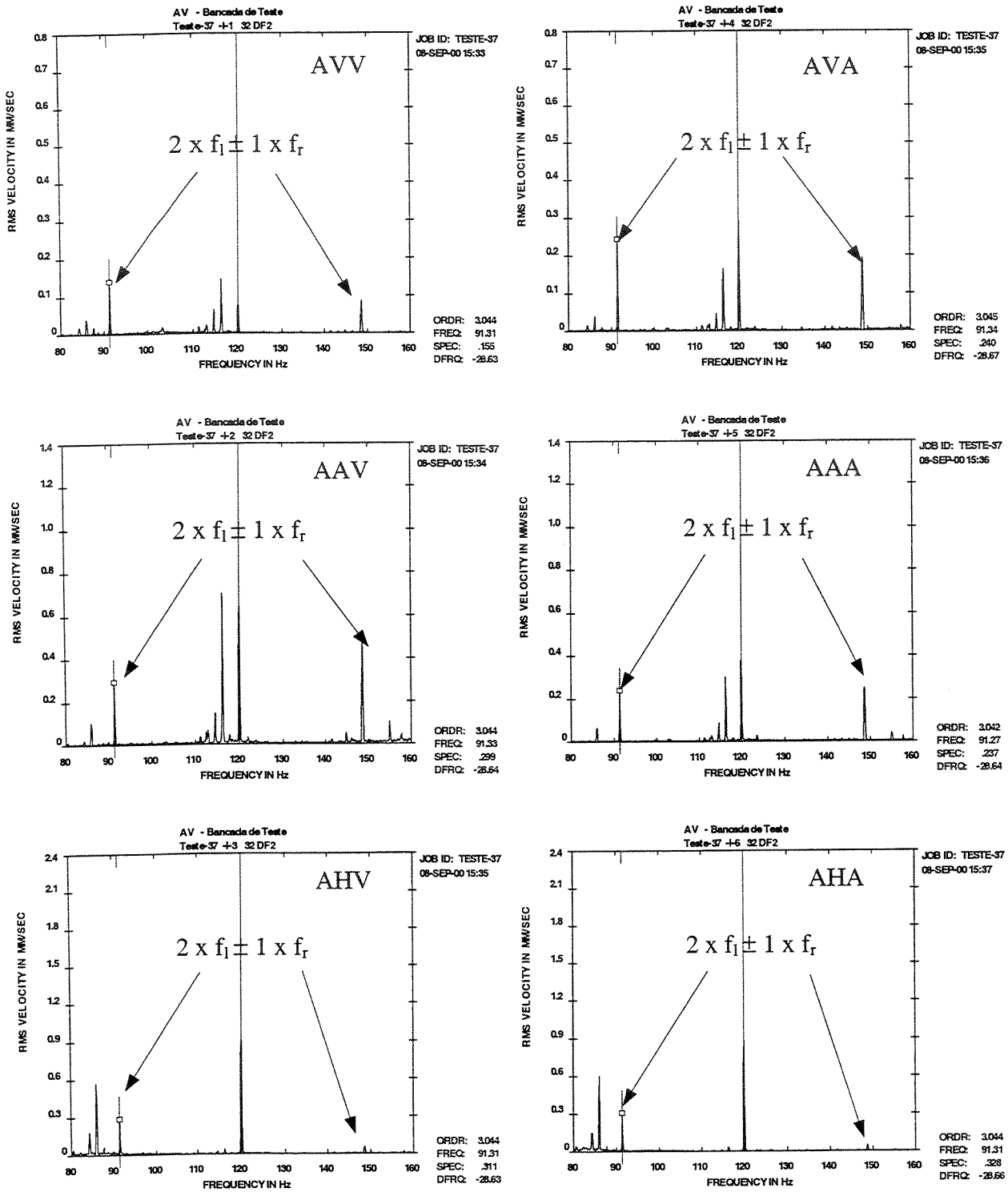


Figura 4.29 - Espectros de vibração para desequilíbrio de fase $DF_2 = 210V$.

Na Figura 4.30, têm-se os espectros de vibração para desequilíbrio de fase DF_1 = 200V (V_{AB} = 200 V, V_{BC} = 220 V e V_{CA} = 200 V).

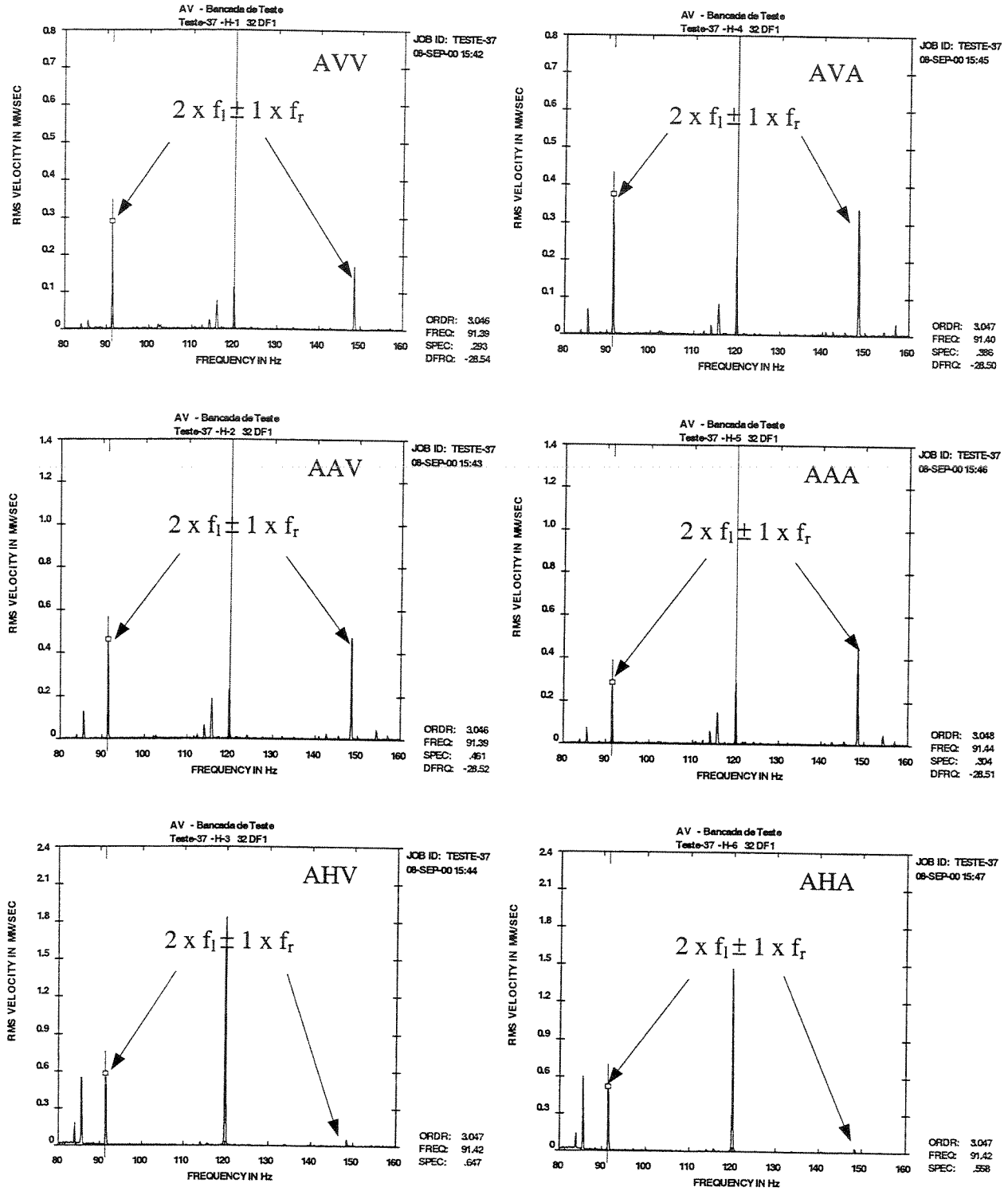


Figura 4.30 - Espectros de vibração para desequilíbrio de fase DF_1 = 200V.

Na Figura 4.31, têm-se os espectros de vibração para *single phase*.

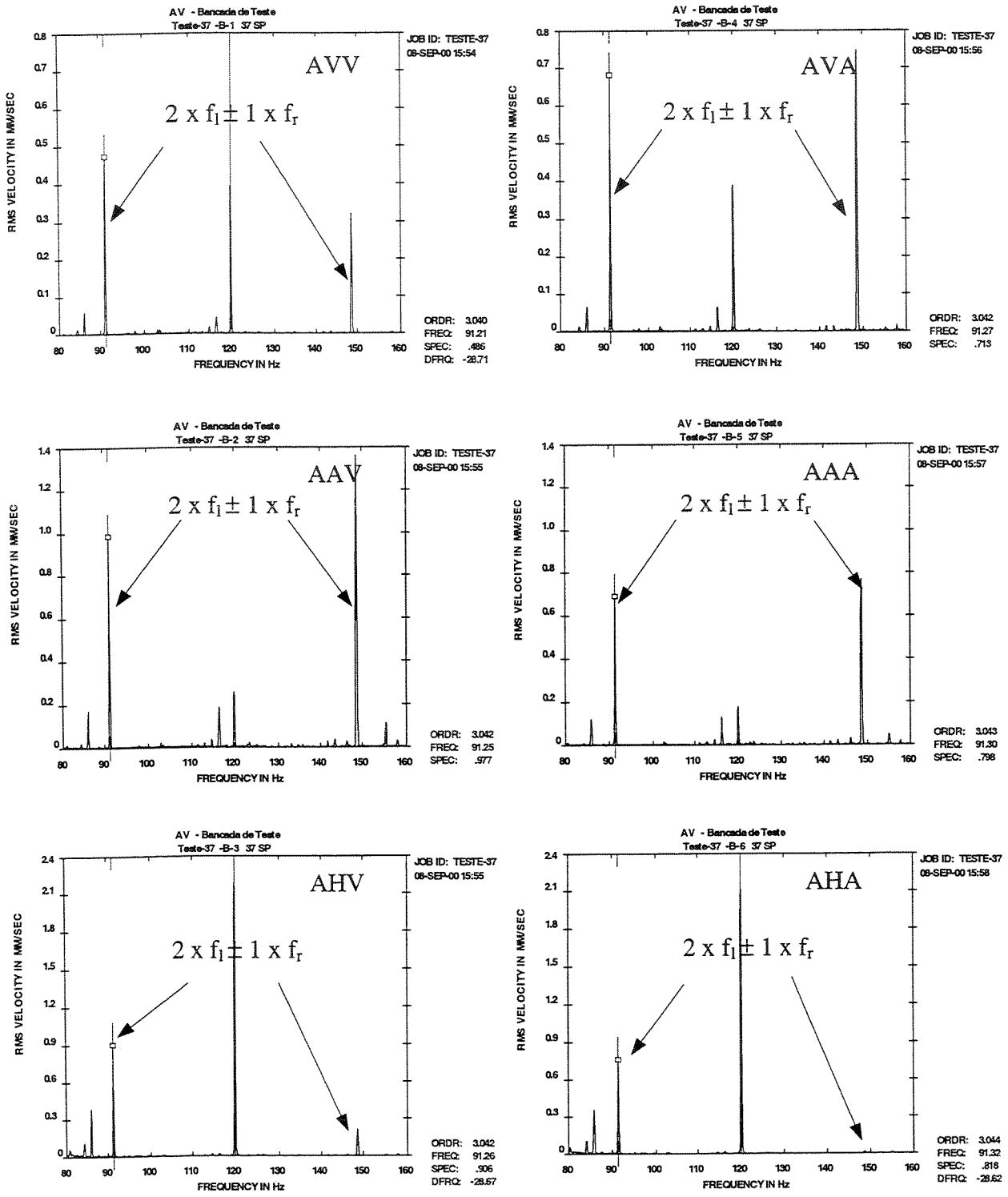


Figura 4.31 - Espectros de vibração para *single phase*.

4.4.2 Detecção do desequilíbrio de fase através da análise de fluxo magnético

Segundo Thomson *et al.* (1983), por definição os motores elétricos produzem fluxo magnético. Qualquer pequeno desbalanceamento no fluxo magnético ou no circuito elétrico é refletido no fluxo transmitido axialmente.

As principais causas da mudança de características da simetria são: barras quebradas do rotor, anomalias nos enrolamentos do estator (curto entre espiras e curto entre fases) e desequilíbrio de fases.

Para ilustrar a detecção do desequilíbrio de fases através da análise de fluxo magnético, escolheu-se aleatoriamente o teste 18 onde os espectros estão com o mesmo fundo de escala em dB.

Na Figura 4.32 tem-se o espectro de fluxo magnético para a condição normal de funcionamento do motor. Nas Figuras 4.33 a 4.35 têm-se os espectros de fluxo magnético para desbalanceamento de fase 210 V, 200V e *single phase*, respectivamente. Os espectros de fluxo magnético (*Ampères*), apresentados em *dB* são referenciados à corrente de 1 *A*.

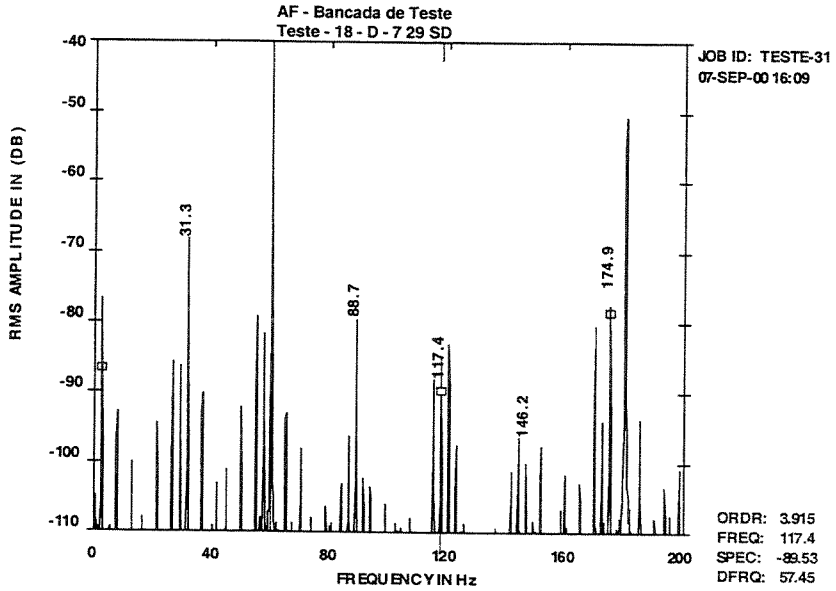


Figura 4.32 - Espectro de fluxo magnético para condição normal de funcionamento.

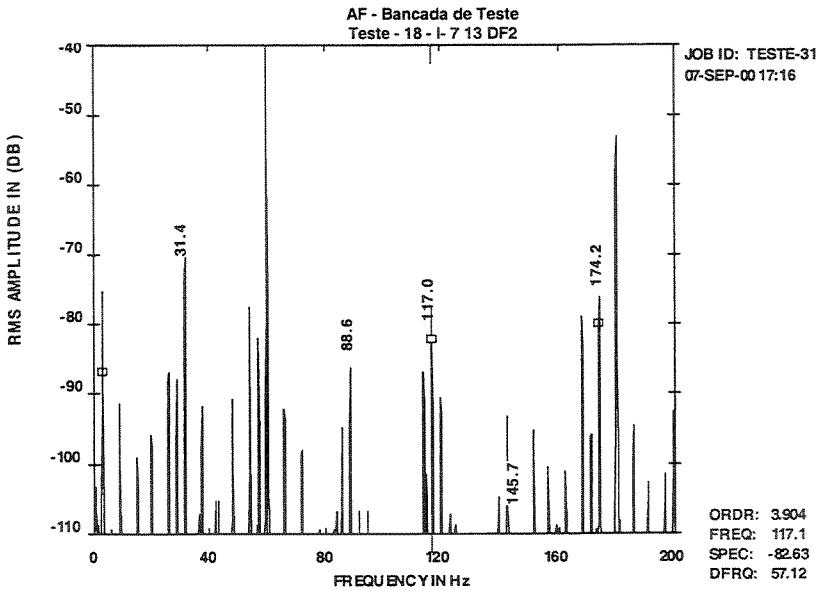


Figura 4.33 - Espectro de fluxo magnético para desequilíbrio de fase $DF_2 = 210V$.

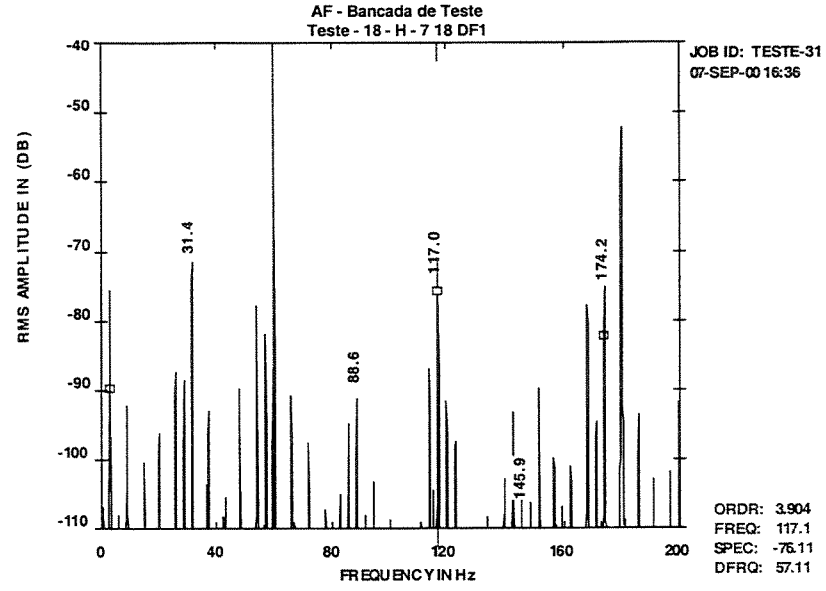


Figura 4.34 - Espectro de fluxo magnético para desequilíbrio de fase $DF_1 = 200V$.

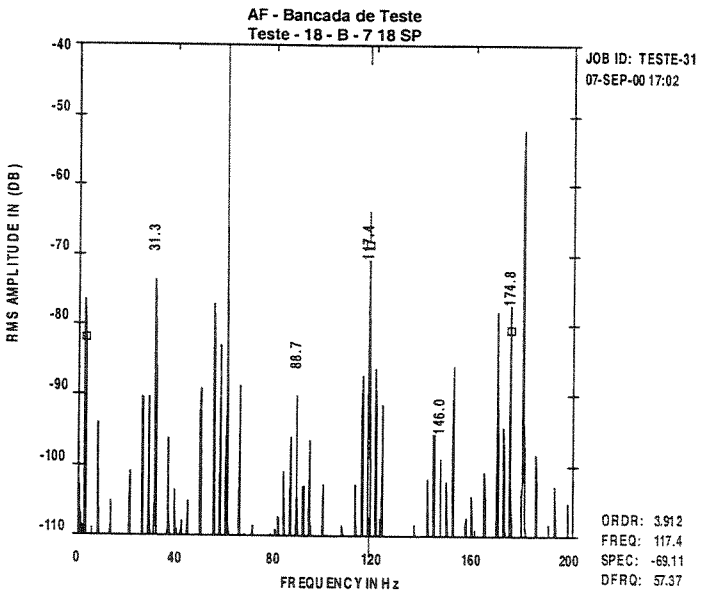


Figura 4.35 - Espectro de fluxo magnético para *single phase*.

4.4.3 Resultados da detecção do desequilíbrio de fase

O desequilíbrio de fase foi estudado através da análise de vibração e análise de fluxo magnético.

Na Tabela 4.4 tem-se os resultados do desequilíbrio de fase através da análise de vibração. A evolução desta excitação é observado pelo aumento significativo das amplitudes nas freqüências determinísticas ($2 \times f_l$ e $2 \times f_l + 1 \times f_r$) nos seis pontos de medição.

Tabela 4.4 - Desequilíbrio de fase através da análise de vibração.

Pontos de medição	Amplitudes [mm/s]			Amplitudes [mm/s]		
	DF2 210 V	DF1 200 V	*single phase*	DF2 210 V	DF1 200 V	*single phase*
AVV	0,084	0,131	0,448	0,091	0,170	0,325
AAV	0,693	0,248	0,288	0,476	0,545	1,390
AHV	1,040	2,014	2,555	0,055	0,055	0,214
AVA	0,309	0,222	0,454	0,223	0,370	0,781
AAA	0,414	0,322	0,200	0,290	0,467	0,831
AHA	0,937	1,616	2,439	0,005	0,004	0,009

O estudo do desequilíbrio de fase é outro problema de origem elétrica detectado e diagnosticado através da análise de vibração, técnica usualmente utilizada para detectar problemas de origem mecânica.

Uma das grandes vantagens da análise de vibração na identificação do desequilíbrio, é que esta técnica não necessita de um espectro de referência (*base line*), podendo o problema ser diagnosticado através do aumento da energia presente nas amplitudes relacionadas com suas freqüências determinísticas.

Na análise de fluxo, o desequilíbrio de fase se manifesta com alterações nas amplitudes de $f_l \pm 1 \times f_r$, $f_l + 2 \times f_r$, $f_l + 3 \times f_r$ e $f_l + 4 \times f_r$.

Na Figura 4.36 tem-se as curvas de tendência para o teste 18, sendo a freqüência $f_l + 2 \times f_r = 117$ Hz a de maior energia.

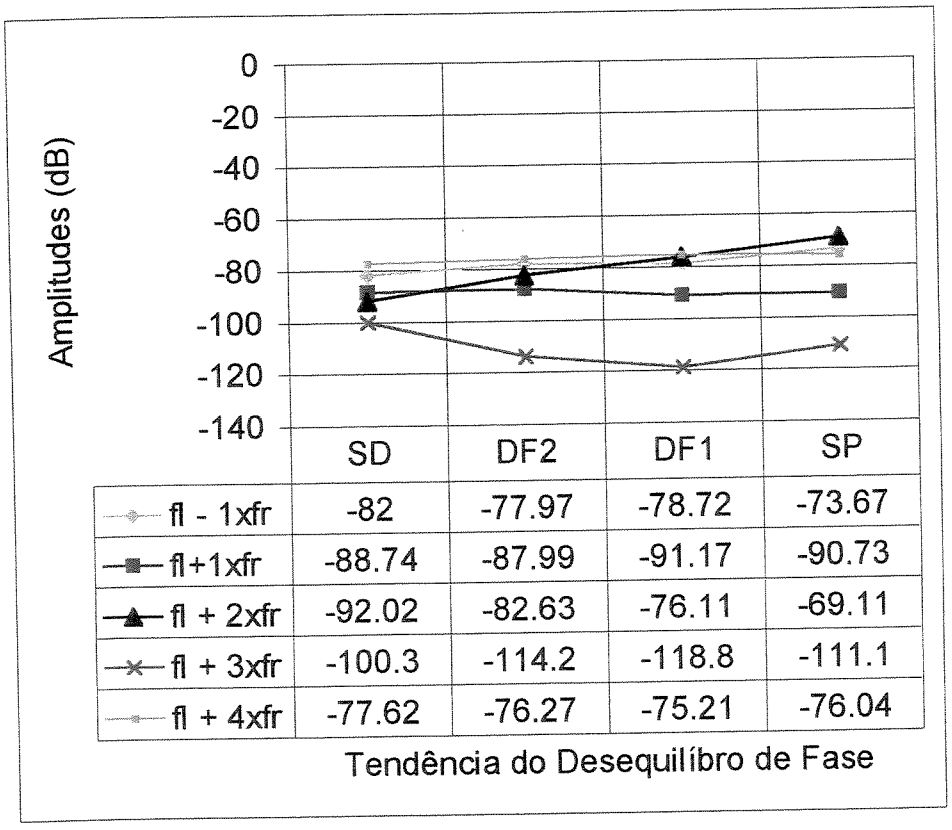
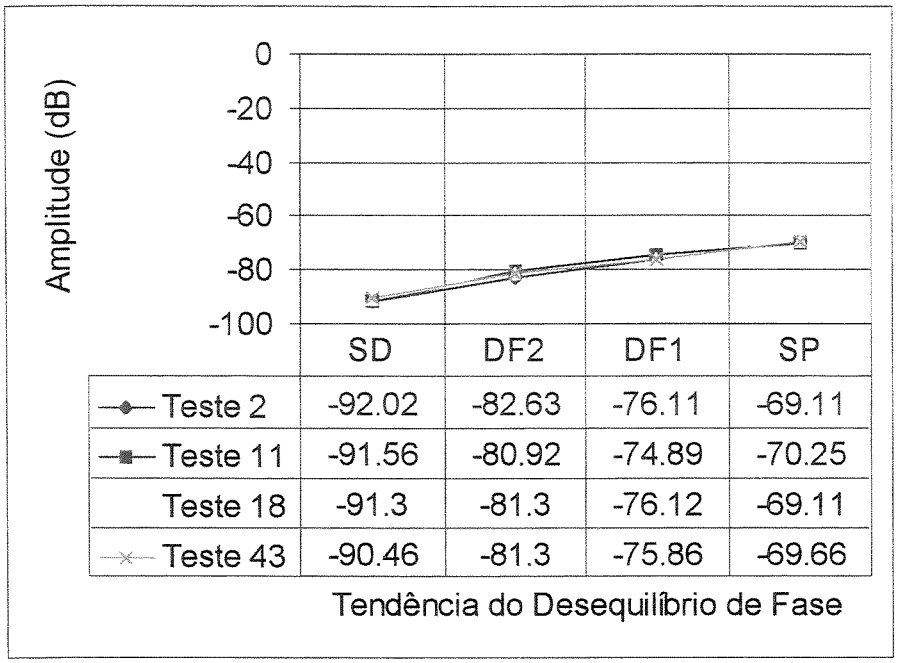


Figura 4.36 - Curvas de tendência do desequilíbrio de fase para o Teste 18.

Na Figura 4.37 tem-se as curvas de tendência para quatro testes escolhidos aleatoriamente. Percebe-se que a evolução do desequilíbrio de fase aumenta gradativamente até chegar ao *single phase*.



	SD	DF2	DF1	SP
Teste 2	-92.02	-82.63	-76.11	-69.11
Teste 11	-91.56	-80.92	-74.89	-70.25
Teste 18	-91.3	-81.3	-76.12	-69.11
Teste 43	-90.46	-81.3	-75.86	-69.66

Figura 4.37 - Curvas de tendência do desequilíbrio de fase - testes escolhidos aleatoriamente.

Na análise de fluxo magnético, é necessário um espectro de referência para, a partir dele, fazer o acompanhamento das freqüências determinísticas através de curvas de tendência. Na maioria das vezes os espectros de fluxo magnético são coletados com o motor apresentando alguma anomalia, como por exemplo os de origem mecânica que não são detectados por esta técnica, comprometendo o perfeito diagnóstico

Capítulo 5

Sistema Especialista *SE_MIT*

Neste capítulo apresenta-se uma introdução aos sistemas especialistas e a fundamentação teórica necessária para a construção do *SE_MIT (Sistema Especialista para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos)*, desenvolvido a partir da *shell Expert SINTA*. Através do *SE_MIT* é possível interpretar os espectros coletados através de técnicas preditivas (análise de vibração, análise de corrente e análise de fluxo magnético), apresentadas no Capítulo 4.

5.1 Introdução

Um especialista humano é alguém capaz de resolver, eficazmente, uma classe particular e complexa de problemas. É também consciente dos limites de seu conhecimento especializado. Dessa maneira, definem-se sistemas especialistas como programas de computadores que imitam o comportamento de especialistas humanos, dentro de um domínio de conhecimento específico. São programas particularmente relevantes para deduções de problemas que envolvem aspectos não estruturados. Assim como os especialistas humanos, estes sistemas usam lógica simbólica e heurística para encontrar soluções para problemas e, da mesma forma, podem cometer erros, Waterman (1986).

A heurística é uma palavra grega que significa *servir para descobrir*. Ou seja, usam-se informações que não são necessariamente definitivas, mas que podem levar à solução do problema muito mais rapidamente do que uma pesquisa a ser feita em todo o nível do conhecimento. Mesmo que haja solução, os métodos heurísticos não garantem uma solução ótima, mas freqüentemente produzem resultados satisfatórios num espaço de tempo razoável. A

heurística é uma exploração dirigida. É considerada uma abordagem inteligente do problema porque, em geral, exige menos esforço para atingir a solução. Porém, todos os métodos heurísticos devem contar com algum meio de saber quando a busca aproxima-se do objetivo, Gomes (1995).

Os sistemas especialistas (SE) possuem um corpo de conhecimentos de alto nível sobre um domínio limitado. São aplicáveis na resolução de problemas reais complexos, que exigem alta capacitação, Waterman (1986).

Durante a década de 60, com o objetivo de analisar espectrogramas de massa, foi desenvolvido o sistema especialista *DENTRAL*, Durkin (1996).

Em 1974, foi desenvolvido o *Mycin*, considerado o sistema especialista mais conhecido no mundo, Rabuske (1995). Foi desenvolvido para diagnosticar infecções bacteriológicas do sangue e prescrever as drogas para seu tratamento. A partir deste sistema, foi desenvolvida uma *shell*, chamada *Emycin* que serve para implementar outros sistemas especialistas, acrescentando ao *software* padrão apenas a base de conhecimentos.

Os sistemas especialistas e os sistemas baseados em conhecimento (SBC) começaram a surgir comercialmente no início da década de 80. Embora os Sistemas especialistas tenham sido durante quinze anos, uma mera curiosidade e um sub-campo da Inteligência Artificial, tornaram-se alvo de significativos esforços de desenvolvimento, tanto técnicos como comerciais.

Na década de 80, os sistemas especialistas ficaram em evidência graças ao seu ingrediente ativo - o conhecimento, Gomes (1995). A qualidade e a abrangência de sua base de conhecimento é diretamente responsável pelo seu sucesso, e não os formalismos e processos de inferência que ele emprega. Mas não é fácil introduzir o conhecimento em um computador. Vários pesquisadores de Inteligência Artificial têm dedicado grande parte de seu tempo às pesquisas de aprendizado das máquinas, ou seja, aos métodos de aquisição automática de conhecimentos.

Vários sistemas especialistas foram desenvolvidos ao longo dos últimos anos. A seguir, são apresentados alguns destes sistemas especialistas aplicados na resolução de problemas ligados à Engenharia.

O sistema especialista *SPERIL-I* realiza uma avaliação das estruturas que estão sujeitas a terremotos, Ishizuka *et al.* (1981). O sistema determina o quanto as estruturas estão danificadas a partir dos dados de inspeção e das medições de aceleração. A perícia deste sistema consiste em conhecimentos coletados de engenheiros civis experientes e inclui relações entre o amortecimento estrutural e a rigidez. O sistema usa fatores de certeza combinados com Lógica *Fuzzy* para calcular o quanto a estrutura está danificada.

O sistema especialista *REACTOR* auxilia os operadores na detecção e localização de defeitos e/ou falhas em reatores, Nelson (1982). Através das medições feitas pelos instrumentos de monitoramento (fluxo da água de alimentação e nível de radiação), este sistema procura desvios nas condições normais de operação. Quando o sistema detecta um desvio, ele estima a situação e recomenda uma ação apropriada. O sistema utiliza-se de conhecimentos sobre a configuração do reator, das relações funcionais de componentes e dos conhecimentos sobre o comportamento esperado do reator para condições anormais conhecidas.

O sistema especialista *NPPC* (*Nuclear Power Plant Consultant*), auxilia os operadores de usinas nucleares a determinar a causa de eventos anormais através da aplicação de regras e do modelo de operação da usina. O sistema usa um modelo primário do sistema de refrigeração para diagnosticar a causa de anormalidades ou acidentes. O sistema inclui bombas, reator, geração de vapor e sistema de refrigeração do núcleo de emergência. Baseado neste modelo, o sistema sugere procedimentos para a correção do problema, Underwood (1982).

O sistema especialista *DELTA* (*Diesel-Electric Locomotive Troubleshooting Aid*) foi desenvolvido para diagnosticar problemas em locomotivas, Marcus (1983). Este sistema orienta o usuário através de um procedimento lógico, apresentando os desenhos das partes e de subsistemas da locomotiva e a seqüência de reparo na forma de filmes.

O sistema especialista *STEAMER*, foi desenvolvido para instruir os estudantes de Engenharia Naval na operação da planta de propulsão de vapor da fragata classe 1078, Hollan *et al.* (1984). O sistema trabalha ligando uma simulação matemática da planta de propulsão com um sofisticado programa de interface gráfica que mostra diagramas dos subsistemas da planta. O estudante pode manipular válvulas, bombas e outros componentes, e observar os efeitos nos parâmetros da planta, como mudanças nas pressões, temperaturas e vazões.

Botelho (1991), relata diversas situações reais de aplicações de sistemas especialistas em empresas e organizações dos Estados Unidos da América. São sistemas para diagnóstico de falhas nas áreas de aviação, militar, automotiva, de comunicações telefônicas e locomotivas.

Lloyd *et al.* (1991) desenvolveram o sistema especialista *MICCA - Machine Insulation Condition Assessment Advisor*. Este sistema foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar os usuários de motores e geradores no diagnóstico da condição do isolamento. Este sistema fornece diagnósticos sobre a necessidade de reparo ou troca de componentes, além de manter uma base de dados para análises subsequentes.

A Petrobrás, em conjunto com a IBM do Brasil, desenvolveu o sistema especialista para análise de vibração - *EXPERTEC*, Mirshawka (1991). Este sistema avalia o estado dos equipamentos rotativos em refinarias. Suas características principais são a utilização de fatores de certeza de 0 a 1 e a possibilidade de atualização de sua base de conhecimento.

A CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais, desenvolveu o sistema especialista *RME-Proteção*, Cunha (1991). Este sistema automatiza, padroniza e facilita, significativamente, a coleta e atualização de dados sobre medições. O sistema abrange ensaios, inspeções e reparos nas manutenções corretivas e preventivas executadas em reles de proteção. As folhas de testes, consultas, relatórios e análises gerados pelo *RME-Proteção*, são importantes para a gestão dos milhares de itens abrangidos pelo banco de dados.

Molinari (1994), desenvolveu um método para o projeto normalizado de engrenagens de dentes retos e helicoidais, envolvendo técnicas de programação para sistemas especialistas integradas às técnicas convencionais de programação. O objetivo deste sistema é obter um alto nível de automatização e confiabilidade no projeto dessas engrenagens.

Gomes (1995), desenvolveu um sistema especialista para diagnosticar problemas em máquinas rotativas, baseado em uma representação do conhecimento de incertezas. Foi utilizada a teoria dos questionários a fim de se obter a otimização do processo de consulta.

O sistema especialista *Nspectr II - Automated Diagnostic Expert*, CSI (1995), é um programa baseado em conhecimento. Foi desenvolvido para diagnosticar, automaticamente,

problemas em máquinas rotativas. Este sistema também sugere ações corretivas para os problemas detectados.

Lacerda (1997), desenvolveu um protótipo de sistema especialista para auxílio e diagnóstico de defeitos de um conversor didático e modular. Neste sistema, foram utilizados diagramas e tabelas ordenados em passos, formando uma sugestão e metodologia para a construção de pequenos sistemas especialistas.

O sistema especialista *IDEA - Integrated Diagnostic Expert Assistant*, foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisa da FIAT em Turim, Itália, Sanseverino e Cascio (1997). Este sistema representa um exemplo significativo de aplicação em larga escala de diagnóstico baseado em modelo. Este sistema de diagnóstico localiza falhas elétricas, eletrônicas e mecânicas num veículo, e foi projetado para garantir a eficiência de equipamentos eletrônicos instalados nos carros modernos.

Khaparde e Jadid (1997), desenvolveram um sistema especialista para diagnóstico de falhas e restauração de uma rede de 400 KV. Este sistema leva de 1 a 3 segundos para diagnosticar a falha. O tempo de execução para restauração depende do tipo de falha e do estado da planta. O sistema pode ser facilmente modificado para possibilitar implementações de outras redes.

Krost *et al.* (1998) desenvolveram um sistema especialista autônomo para operação de sistemas de energia elétrica. Este sistema é baseado em um simulador, englobando todos os aspectos do comportamento físico do sistema. O sistema permite que profissionais sejam treinados para conhecimento de um sistema de potência operando sob condições normais e de restauração.

Flávio e Silva (1999), desenvolveram um sistema especialista para especificação de parafusos de união. O objetivo principal deste sistema é o dimensionamento e a especificação do conjunto parafuso e porca hexagonal, mais adequado às condições de operações especificadas pelo projetista. Também é possível fazer o estudo, para uma mesma montagem, das tensões atuantes nos elementos da junta, no parafuso e nos filetes da rosca, utilizando vários materiais disponíveis no programa.

França Jr. *et al.* (1999), desenvolveram um sistema especialista para dimensionamento de chavetas e estrias. O sistema permite aos projetistas variar desde o material da chaveta até a rotação do eixo utilizado, observando o coeficiente de segurança ou vice-versa.

Filho e Avilés (1999), desenvolveram um sistema especialista para dimensionamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos. O sistema permite analisar as tensões atuantes nos dentes para vários materiais distintos. Um desenho em formato *AutoCad*, em duas vistas e em escala adequada, é gerado no final do dimensionamento.

Brito *et al.* (2001), desenvolveram o Sistema Especialista *SE_MIT* partir da *shell Expert SINTA*, para diagnosticar problemas em motores de indução trifásico. Nesta versão inicial, o sistema é capaz de diagnosticar problemas de origem mecânica e a condição sem defeito. Na versão completa, que será vista neste capítulo, o sistema também identifica os problemas de origem elétrica).

5.2 Desenvolvimento do *SE_MIT* a partir do *Expert SINTA*

O *Expert SINTA* é uma *shell freeware*, desenvolvida no Laboratório de Inteligência Artificial da UFC - Universidade Federal do Ceará, Nogueira *et al.* (1996), que utiliza técnicas de Inteligência Artificial para geração automática de sistemas especialistas.

Esta ferramenta utiliza um modelo de representação do conhecimento baseado em regras de produção e probabilidades. Seu objetivo principal é simplificar o trabalho de implementação de sistemas especialistas através: do uso de uma máquina de inferência compartilhada; da construção automática de telas e menus; do tratamento probabilístico das regras de produção e da utilização de explicações sensíveis ao contexto da base de conhecimento modelada. Um sistema especialista baseado neste modelo é bastante útil em problemas de classificação. O usuário responde a uma seqüência de menus, e o sistema encarrega-se de fornecer respostas que se encaixem no quadro apontado pelo usuário.

Todas as informações necessárias para o desenvolvimento de novos sistemas especialistas estão no manual do *Expert SINTA*, disponível no site *www.lia.ufc.br*.

5.2.1 Arquitetura de um sistema especialista no *Expert SINTA*

A arquitetura de um sistema especialista caracteriza-se pela separação entre as estratégias de solução do problema e os algoritmos de controle do processamento da informação. Na Figura 5.1 tem-se uma arquitetura típica e simplificada proposta por Kowalski (1993).

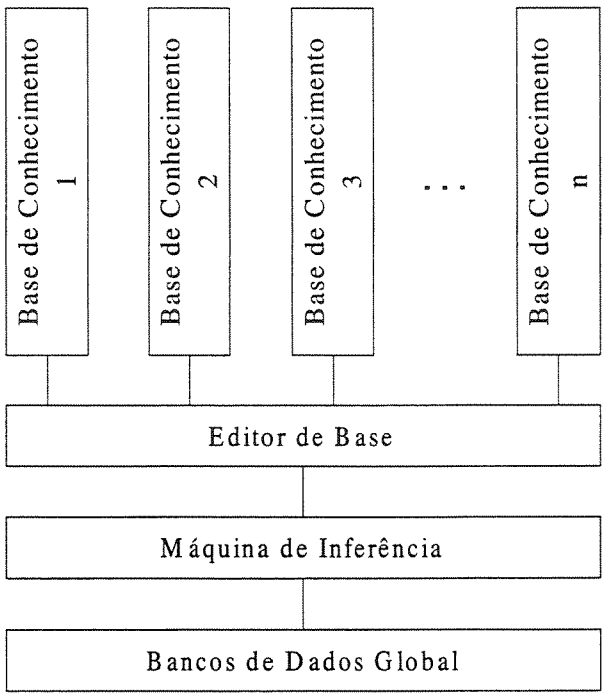


Figura 5.1 - Arquitetura simplificada.

A *base de conhecimento* é onde reside o conjunto de informações que codificam a estratégia de solução e representação do conhecimento. O *editor de bases* é o meio pelo qual a *shell* permite a implantação das bases desejadas. A *máquina de inferência* controla o processamento do sistema e aplica a base de conhecimento à base de dados, para obter novos dados e conhecimentos. É considerado o coração do sistema especialista. O *banco de dados geral* são as evidências apontadas pelo usuário do Sistema Especialista durante a consulta.

5.2.2 Definição da estratégia de diagnóstico

Em virtude da grande complexidade do assunto optou-se por definir uma estratégia de diagnóstico que separasse a origem dos defeitos. Essa estratégia é definida logo no início de uma consulta, através de uma série de perguntas. Na primeira ou segunda resposta fornecida pelo usuário, o *SE_MIT* é direcionado para buscar a origem da falha (mecânica ou elétrica).

A primeira pergunta define a tecnologia utilizada para aquisição dos sinais: *análise de vibração*, *análise de corrente* ou *análise de fluxo magnético*. A segunda define o eixo das amplitudes: *linear* ou *dB*.

No *SE_MIT* as análises de corrente e fluxo magnético são usadas somente no diagnóstico de falhas de origem elétrica. A análise de vibração, pode ser utilizada para diagnosticar falhas de origem elétrica e mecânica. As amplitudes dos espectros de origem mecânica estão na escala *linear* e os de origem elétrica em *dB*.

Estas duas perguntas não são suficientes para direcionar o *SE_MIT* na busca da origem da falha. Por exemplo, o *Desbalanceamento de Fase*, só será separado da seqüência de busca por defeitos mecânicos quando o conjunto de freqüências determinísticas for definido.

Na Figura 5.2 tem-se o fluxograma e seqüência para diagnóstico de falhas de origem elétrica e mecânica através da análise de vibração, amplitudes em mm/s.

- definição da posição dos sensores: *AVV* (acoplado, direção vertical, lado da ventoinha,), *AAV* (acoplado, direção axial, lado da ventoinha,), *AHV* (acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha,), *AVA* (acoplado, direção vertical, lado do acoplamento), *AAA* (acoplado, direção axial, lado do acoplamento), *AHA* (acoplado, direção horizontal, lado do acoplamento);

- freqüências determinísticas: são divididas em dois blocos. O primeiro está relacionado com as freqüências de rotação do motor ($1 \times f_r$, $2 \times f_r$, $3 \times f_r$ e $4 \times f_r$: defeitos mecânicos e $f_r \pm 2 \times f_s$: barras quebradas). O segundo está relacionado com as freqüências de linha ($2 \times f_l$ e $2 \times f_l \pm 1 \times f_r$: desequilíbrio de fase e $f_l \pm 2 \times f_s$: barras quebradas);

- diagnóstico: no primeiro bloco, as falhas de origem mecânica (desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica) são separados em: com defeito (> 0,5 mm/s) e sem defeito (< 0,5 mm/s). Para barras quebradas: se há ou não amplitudes. No segundo bloco, para desequilíbrio de fase, são separados em: com defeito (> 0,5 mm/s) e sem defeito (< 0,5 mm/s). Para barras quebradas: se há ou não amplitudes.

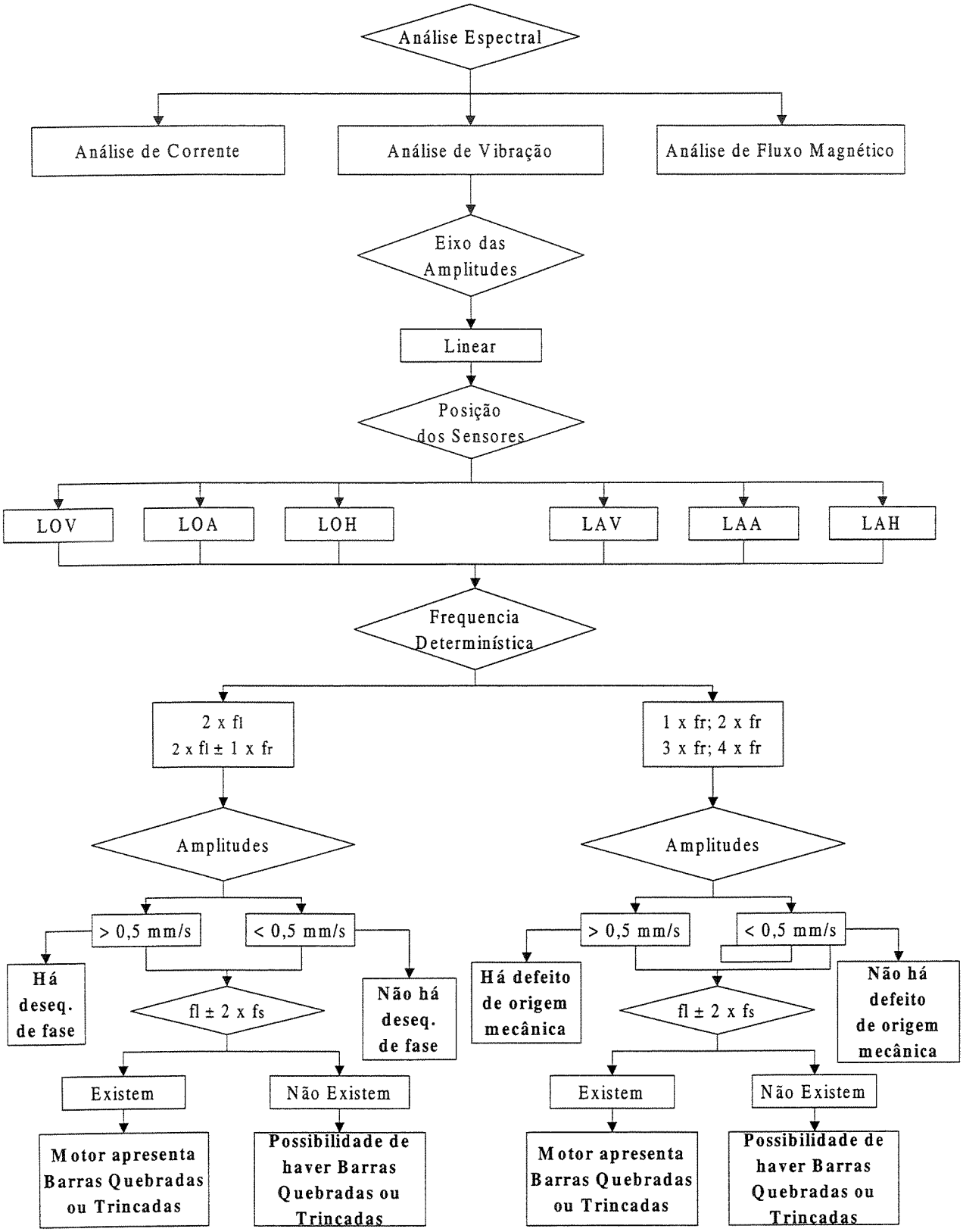


Figura 5.2 - Fluxograma para diagnóstico através da Análise de Vibração (mm/s).

Na Figura 5.3 tem-se o fluxograma e seqüência para diagnóstico de barras quebradas através da análise de vibração, amplitudes em dB.

- definição da posição dos sensores: *AVV, AAV, AHV, AVA, AAA* e *AHA*;
- freqüências determinísticas: $1 \times f_r \pm 2 \times f_s$;
- diagnóstico: diferença em dB do pico em $1 \times f_r$ e o maior de uma das bandas laterais espaçadas em $2 \times f_s$. A literatura não apresenta valores para definição dos níveis de vibração para as condições com e sem defeito, VDI 2056 (1964). Os valores apresentados são baseados em testes experimentais.

Na Figura 5.4 tem-se o fluxograma e seqüência para diagnóstico de barras quebradas através da análise de corrente, amplitudes em dB.

- freqüências determinísticas: $1 \times f_l \pm 2 \times f_s$;
- diagnóstico: diferença em dB do pico em $1 \times f_l$ e o maior de uma das bandas laterais espaçadas em $2 \times f_s$. Os valores apresentados são baseados na Tabela 4.3.

Na Figura 5.5 tem-se o fluxograma e seqüência para diagnóstico de barras quebradas através da análise de fluxo magnético, amplitudes em dB. Primeiro o Sistema Especialista *SE_MIT* faz o diagnóstico para desbalanceamento de fase. Após a conclusão deste diagnóstico, verifica se há ou não barras quebradas.

- freqüências determinísticas: para desequilíbrio de fase: $f_l \pm 1 \times f_r$, $f_l \pm 2 \times f_r$, $f_l \pm 3 \times f_r$ e $f_l \pm 4 \times f_r$ e para barras quebradas: $f_l \pm 2 \times f_s$.
- diagnóstico: para desequilíbrio de fase - aumento das amplitudes e para barras quebradas - diferença em dB da amplitude em $1 \times f_l \pm 2 \times f_s$. A literatura não apresenta valores para definição dos níveis de vibração para as condições com e sem defeito. Os valores apresentados são baseados em testes experimentais.

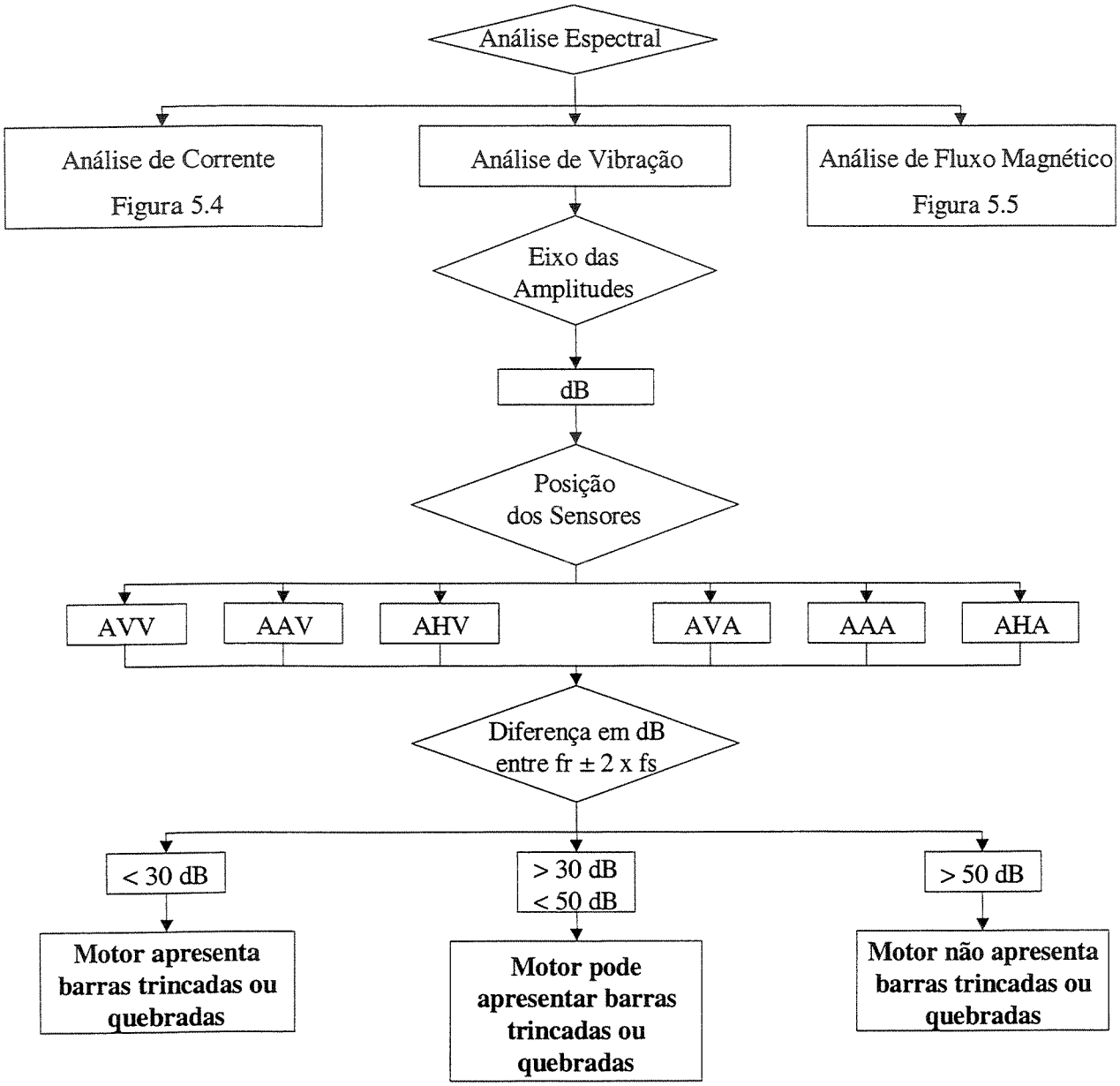


Figura 5.3 - Fluxograma para diagnóstico através da Análise de Vibração (*dB*).

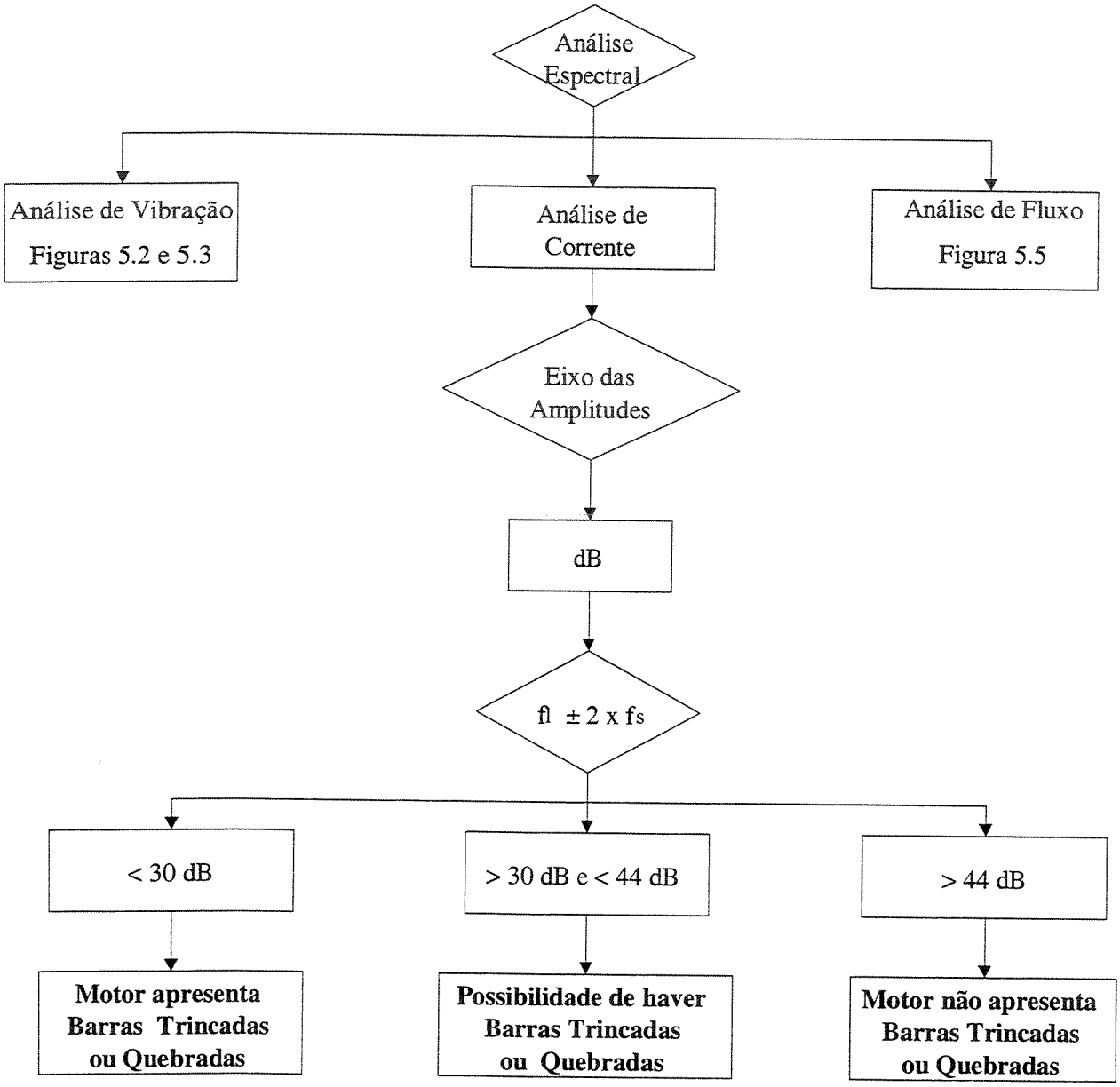


Figura 5.4 - Fluxograma para diagnóstico através da Análise de Corrente (*dB*).

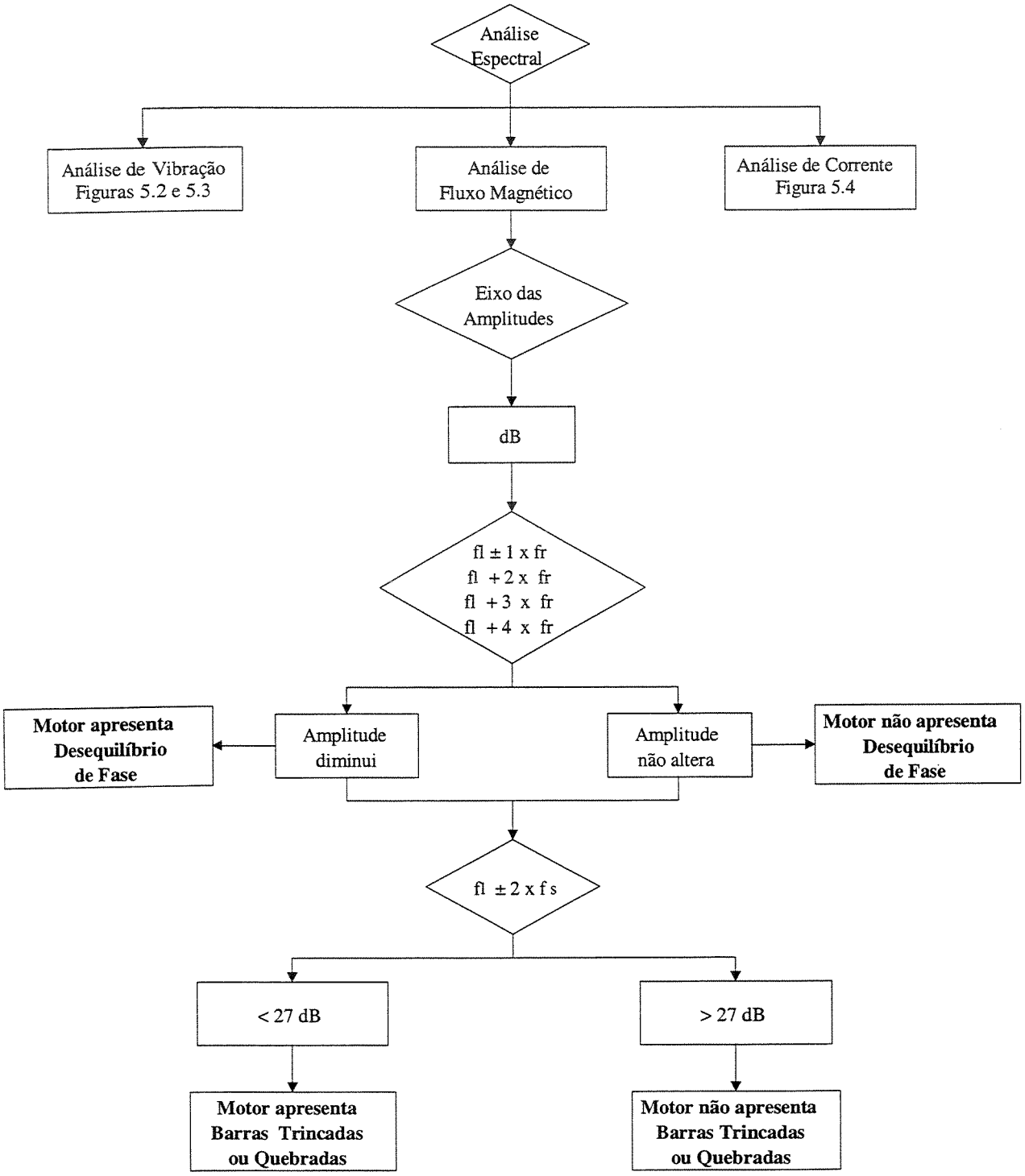


Figura 5.5 - Fluxograma para diagnóstico através da Análise de Fluxo Magnético (*dB*).

5.3 Aplicação do *SE_MIT*

A seguir serão apresentadas três aplicações do *SE_MIT*.

5.3.1 Aplicação do *SE_MIT* para o diagnóstico de desbalanceamento de 35,1g

Na Figura 5.6 tem-se o espectro de vibração para o desbalanceamento de 35,1g. A partir de uma série de perguntas e respostas, o *SE_MIT* chegará ao diagnóstico da falha.

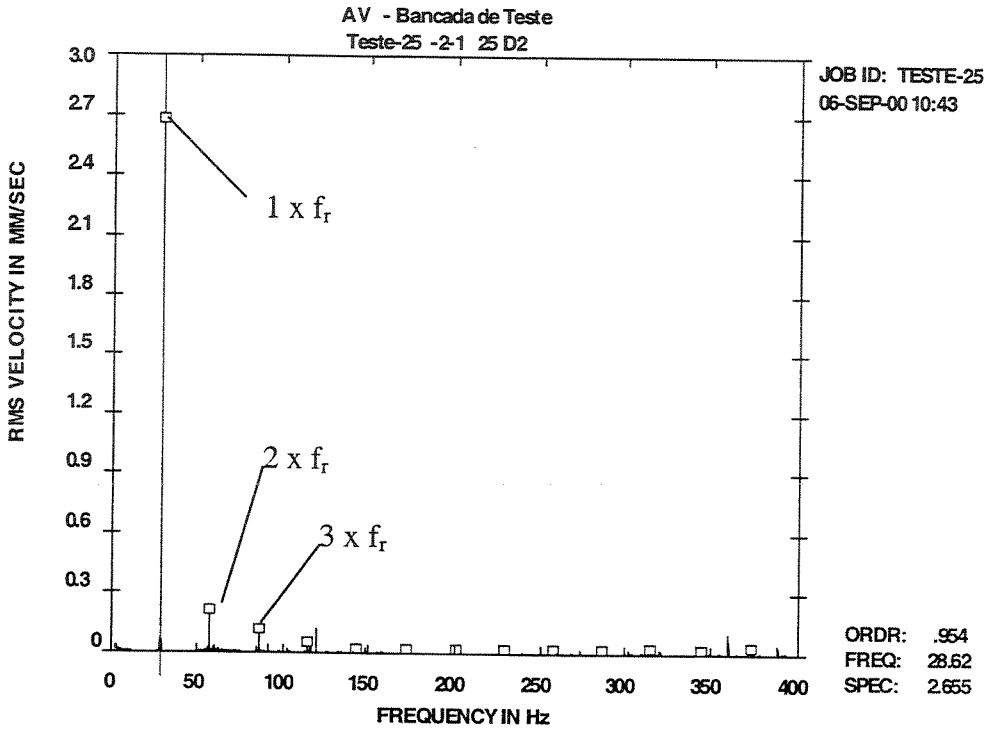


Figura 5.6 - Espectro de vibração para diagnóstico de desbalanceamento de 35,1g.

Na Figura 5.7 define-se o tipo de tecnologia (análise de vibração). Na Figura 5.8 define-se a unidade do eixo das amplitudes (linear), valor *RMS* (*root mean square*).

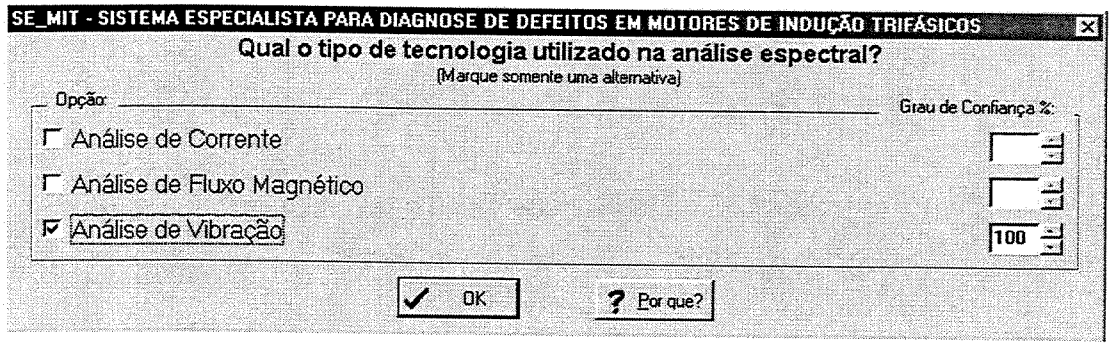


Figura 5.7 - Definição do tipo de tecnologia (Desb_35,1g).

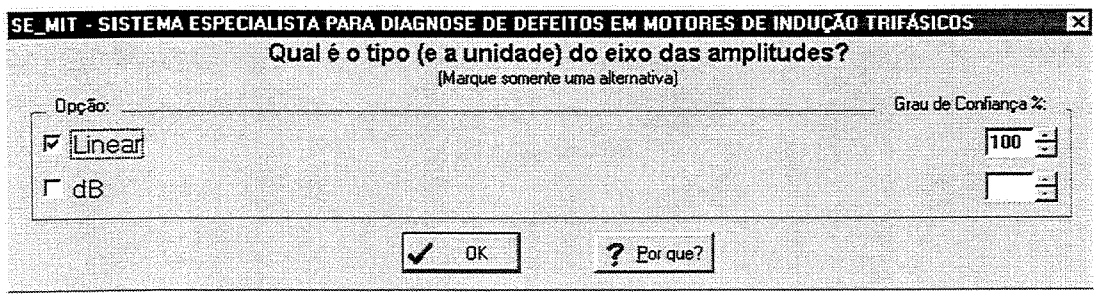


Figura 5.8 - Definição da unidade do eixo das amplitudes (Desb_35,1g).

Na Figura 5.9 define-se a posição do sensor (direção vertical, lado da ventoinha). Na Figura 5.10 define-se a freqüência que pode ser considerada determinística (1 x f_r).

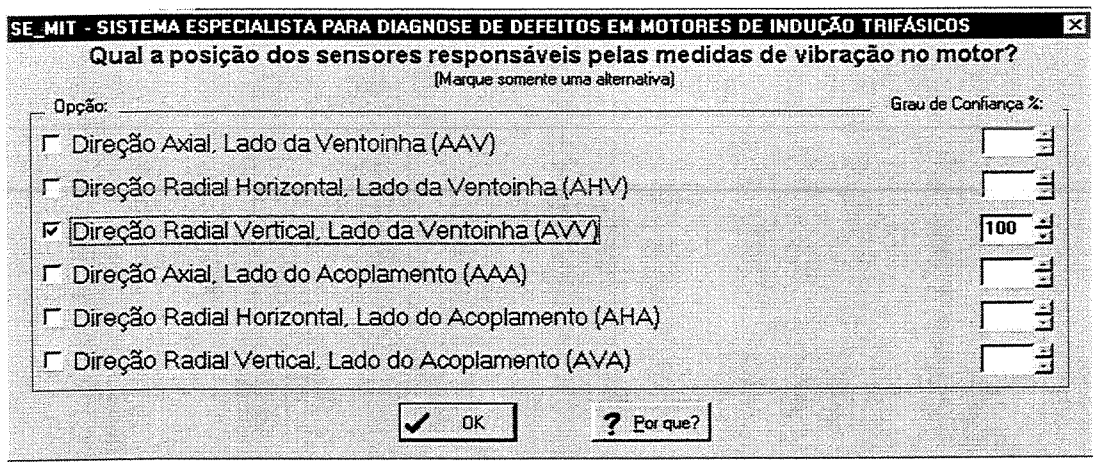


Figura 5.9 - Definição da posição do sensor (Desb_35,1g).

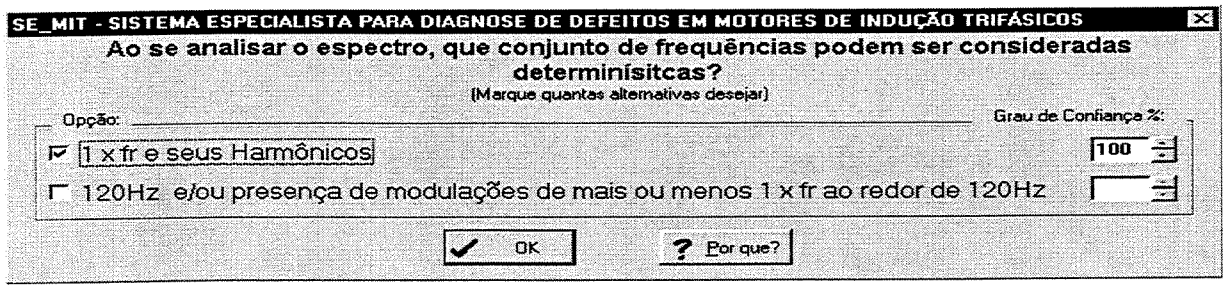


Figura 5.10 - Definição da freqüência determinística (Desb_35,1g).

Na Figura 5.11 define-se o comportamento das amplitudes nas freqüências determinísticas presentes no espectro (1 x f_r é a freqüência determinística e apresenta nível de energia maior que 0,5 mm/s). Na Figura 5.12 define-se a amplitude em 1 x f_r (amplitude de energia maior energia no espectro). Na Figura 5.13 define-se o comportamento da amplitude em 2 x f_r (semelhante a 3 x f_r).

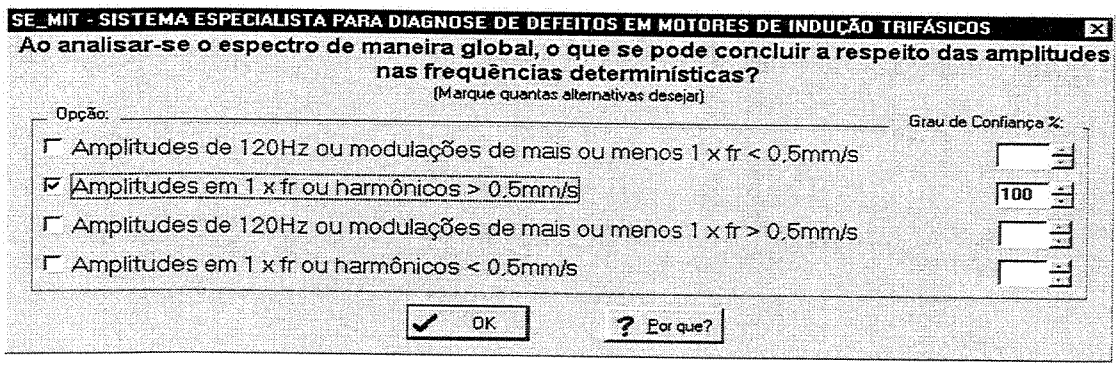


Figura 5.11 - Comportamento das amplitudes nas freqüências determinísticas (Desb_35,1g).

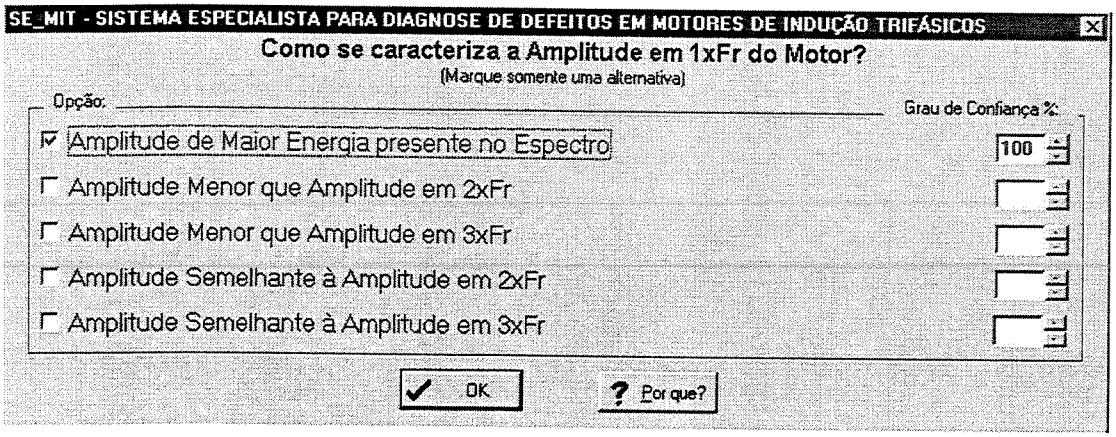


Figura 5.12 - Comportamento das amplitudes em 1 x f_r (Desb_35,1g).

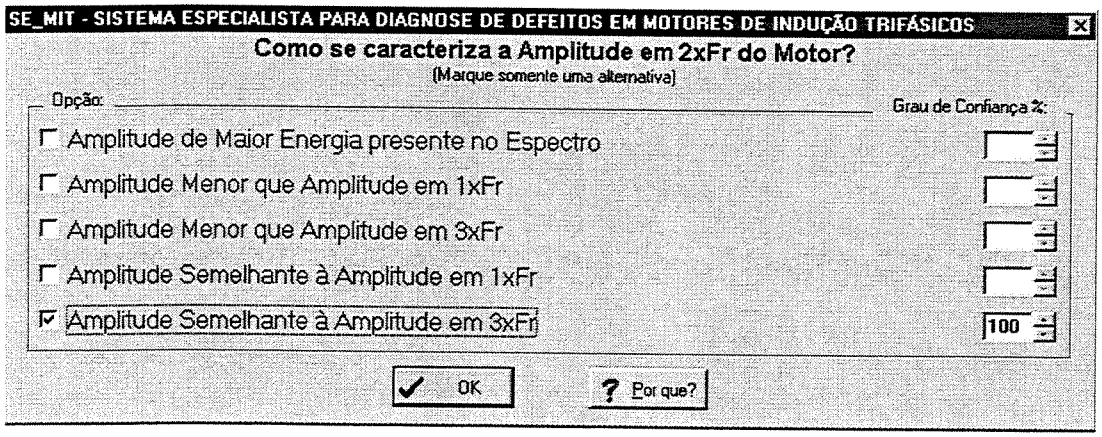


Figura 5.13 - Comportamento da amplitude em 2 x f_r (Desb_35,1g).

Na Figura 5.14 define-se o comportamento da amplitude em 3 x f_r (semelhante a 2 x f_r). Na Figura 5.15 define-se o comportamento das amplitudes dos harmônicos de 1 x f_r (menores que 30% da amplitude em 2 x f_r).

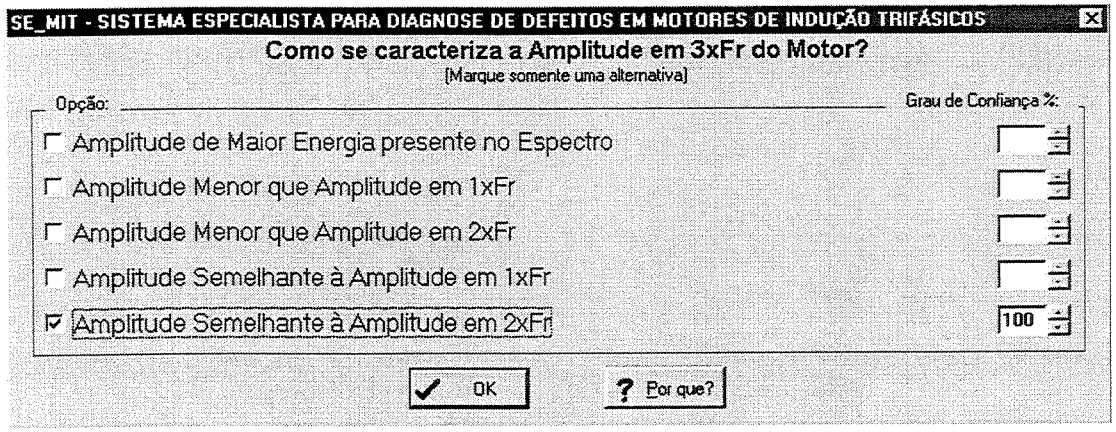


Figura 5.14 - Comportamento da amplitude em 3 x f_r (Desb_35,1g).

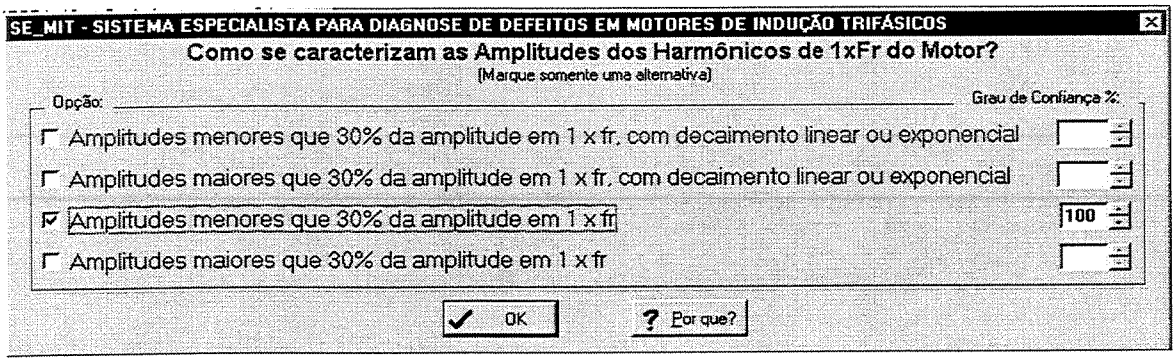


Figura 5.15 - Comportamento das amplitudes dos harmônicos em 1 x f_r (Desb_35,1g).

Na Figura 5.16 tem-se o resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico mecânico (*O Motor apresenta Desbalanceamento*). Na Figura 5.17 tem-se a confirmação do diagnóstico mecânico (*O Motor apresenta Desbalanceamento*) e a tela *Fim da consulta.*

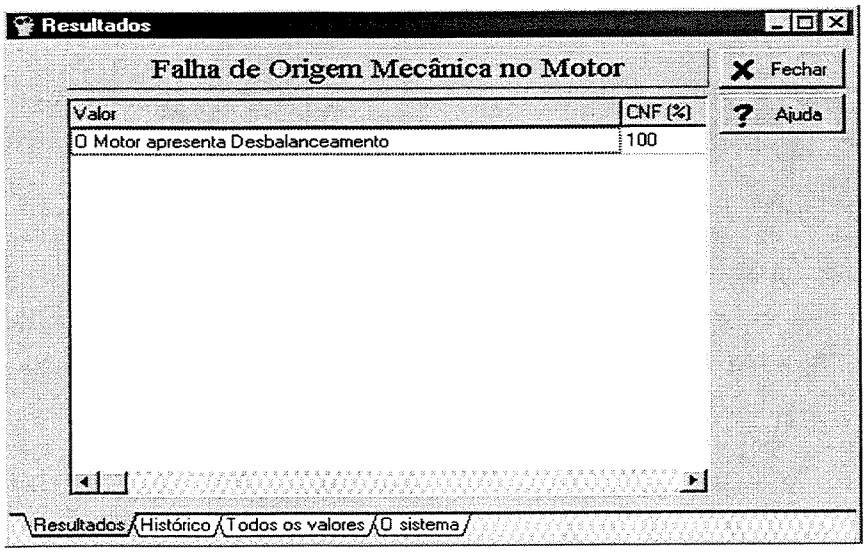


Figura 5.16 - Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico mecânico (Desb_35,1g).

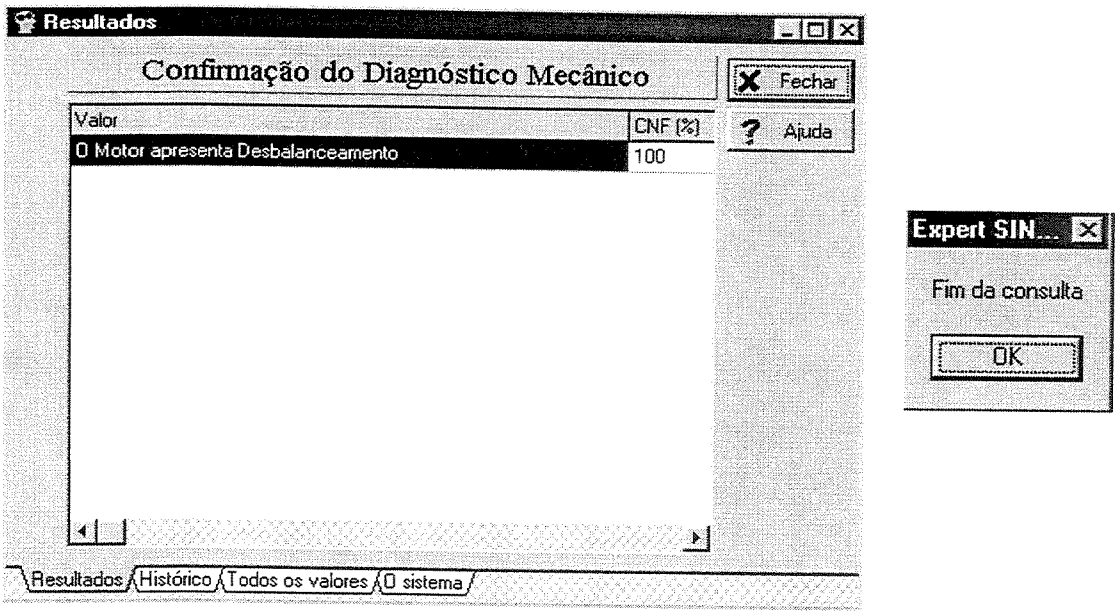


Figura 5.17 - Confirmação do diagnóstico mecânico (Desb_35,1g).

Na Figura 5.18 verifica-se a existência de defeito de origem elétrica através da presença de bandas laterais de 2 x f_s em torno de 1 x f_r (não há bandas laterais).

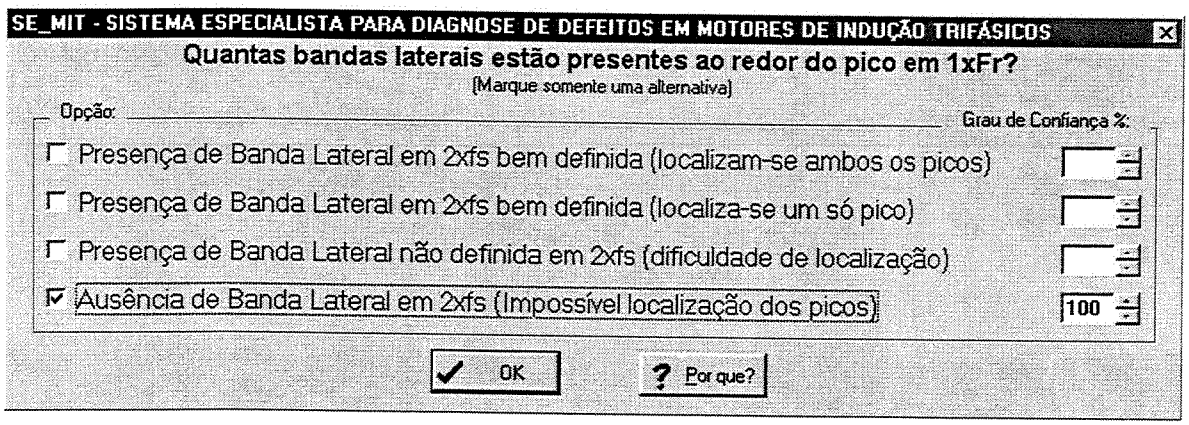


Figura 5.18 - Presença de bandas laterais em torno de 1 x f_r (Desb_35,1g).

Na Figura 5.19 tem-se o resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico elétrico (*O pode ou não apresentar Barras Quebradas e/ou Trincadas*). Na Figura 5.20 tem-se a confirmação do diagnóstico mecânico (*Aplique zoom em torno de 1 x f_r. Havendo picos, utilize AC ou AF*) e a tela *Fim da consulta.*

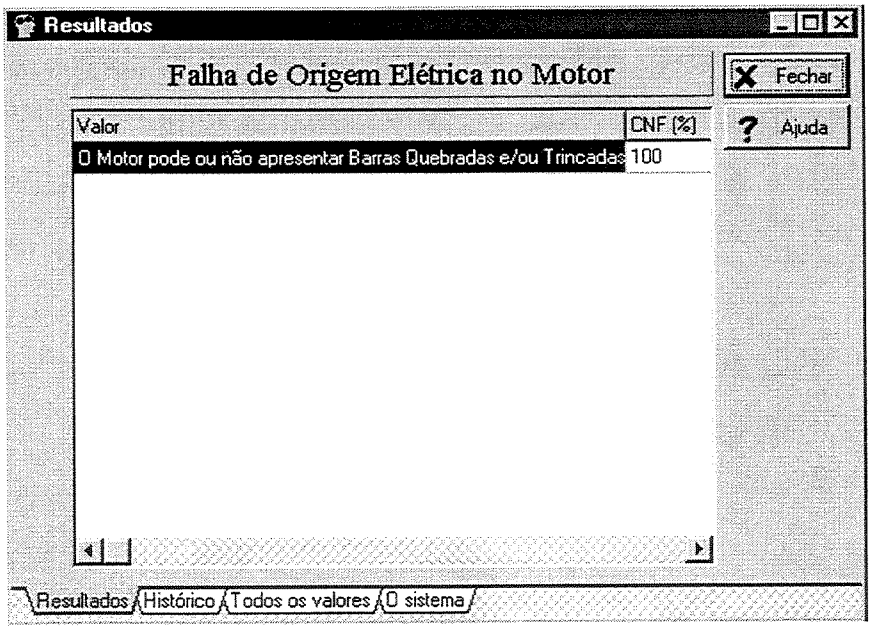


Figura 5.19 - Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico elétrico.

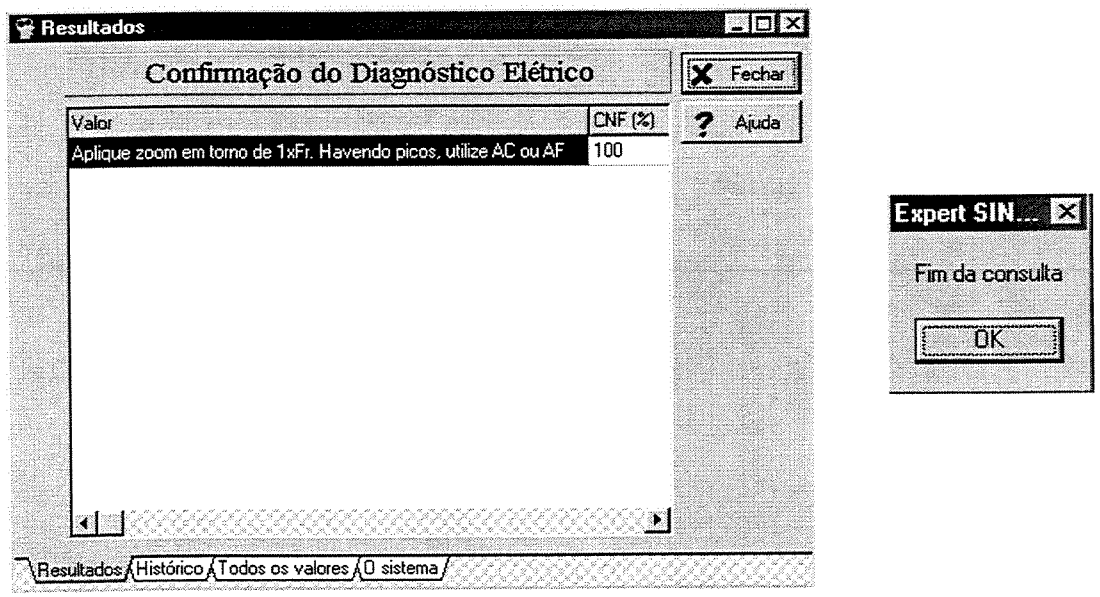


Figura 5.20 - Confirmação do diagnóstico elétrico.

5.3.2 Aplicação do *SE_MIT* para o diagnóstico de 7 barras quebradas.

Na Figura 5.21 tem-se o espectro de corrente para sete barras quebradas. A partir de uma série de perguntas e respostas, o *SE_MIT* chegará ao diagnóstico da falha.

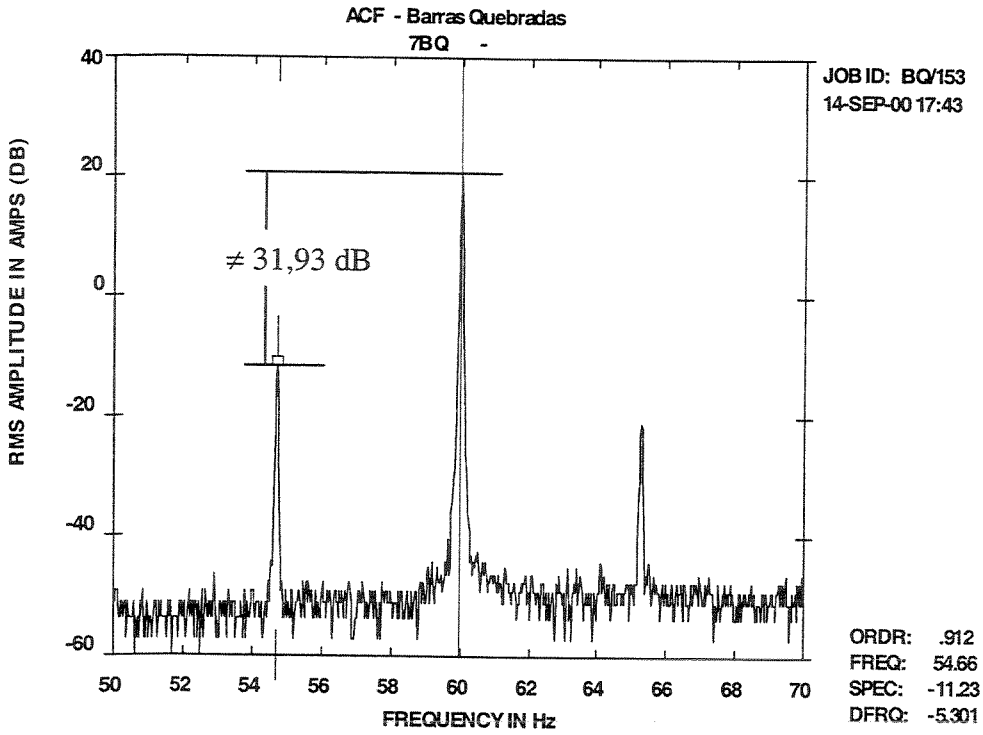


Figura 5.21 - Espectro de corrente para sete barras.

Na Figura 5.22 define-se o tipo de tecnologia (análise de corrente).

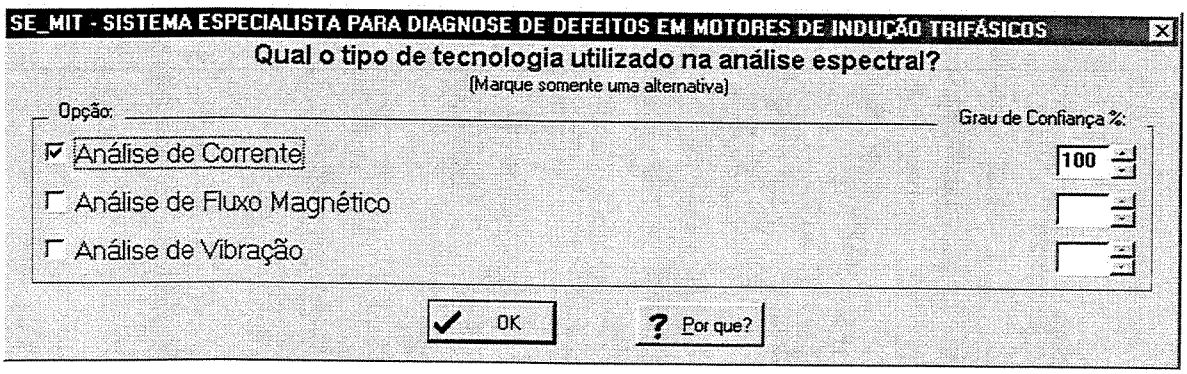


Figura 5.22 - Definição do tipo de tecnologia (7_bq).

Na Figura 5.23 tem-se o resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico mecânico (*AC e AF não estão sendo usadas na detecção de falhas mecânicas*). Na Figura 5.24 tem-se a confirmação do diagnóstico mecânico (*Utilize AV em "linear" para diagnóstico de defeitos mecânicos*).

Figura 5.23 - Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico mecânico.

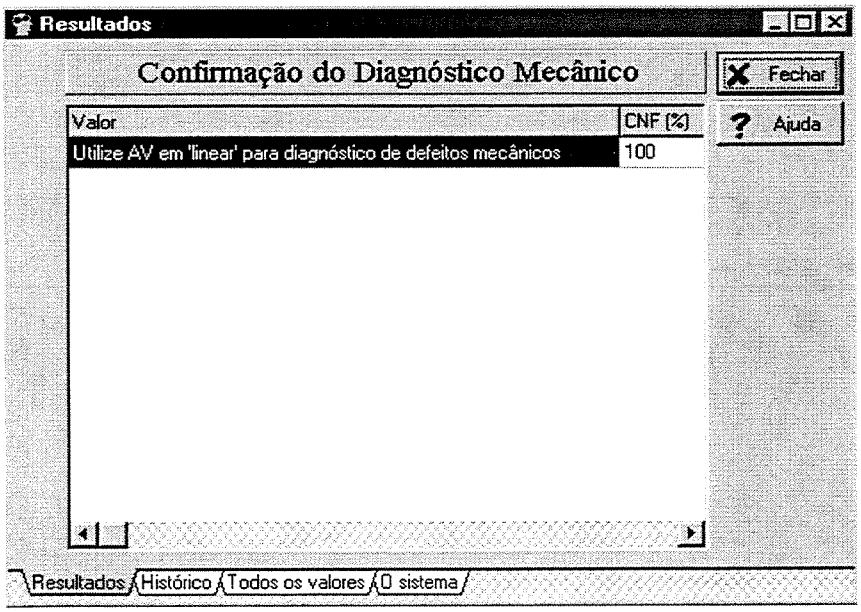


Figura 5.24 - Confirmação do diagnóstico mecânico.

Na Figura 5.25 define-se a unidade do eixo das amplitudes (*dB*), valor *RMS* (*root means square*). Na Figura 5.26 tem-se a diferença das amplitudes de $1x\ f_l$ e $1x\ f_l - 2 \times f_s$.

Na Figura 5.27 tem-se o resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico elétrico (*O Motor apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas*).

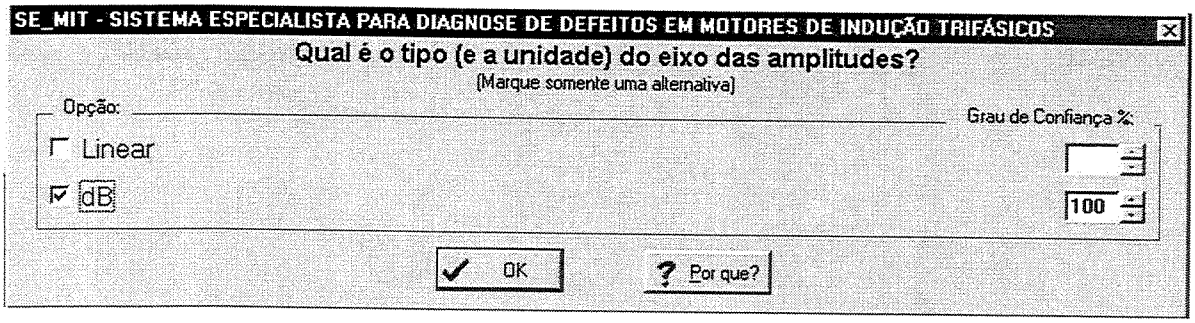


Figura 5.25 - Definição da unidade do eixo das amplitudes (7_bq).

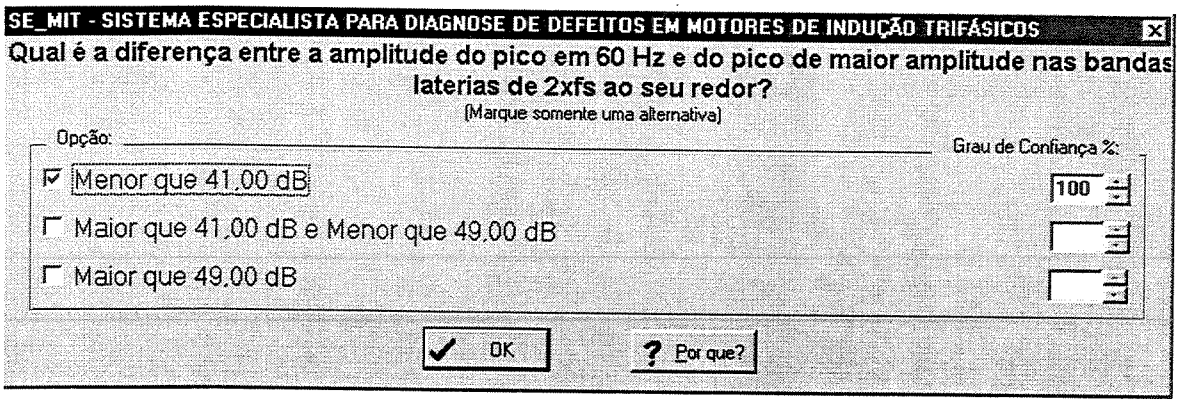


Figura 5.26 - Diferença as amplitudes de 1x f_l e 1x f_l - 2 x f_s (7_bq).

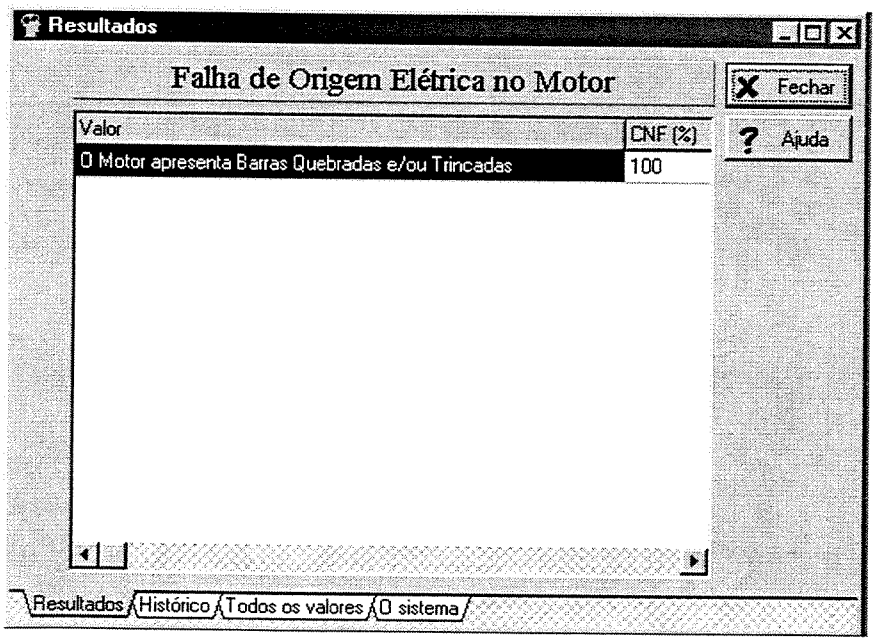


Figura 5.27 - Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico elétrico (7_bq).

Na Figura 5.28 tem-se a confirmação do diagnóstico elétrico (*Quanto < for a diferença em dB > será o número de barras quebradas*) e a tela *Fim da consulta.*

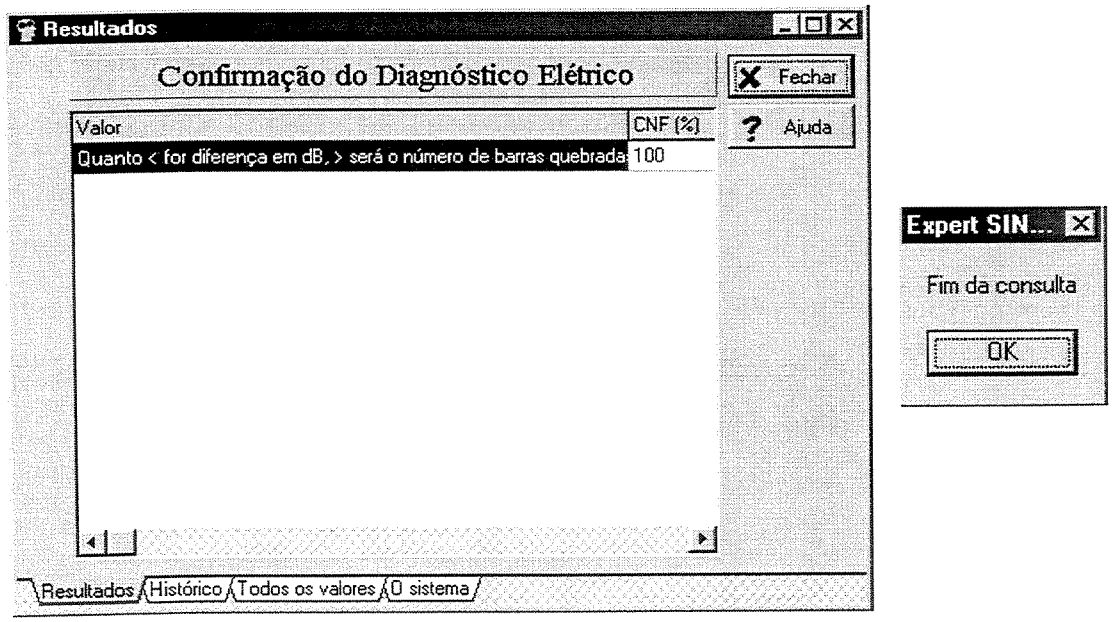


Figura 5.28 - Confirmação do diagnóstico elétrico (7_bq).

5.3.3 Aplicação do *SE_MIT* para o diagnóstico de desequilíbrio de fase (*single phase*).

Na Figura 5.29 tem-se o espectro de fluxo para *single phase*. A partir de uma série de perguntas e respostas, o *SE_MIT* chegará ao diagnóstico da falha.

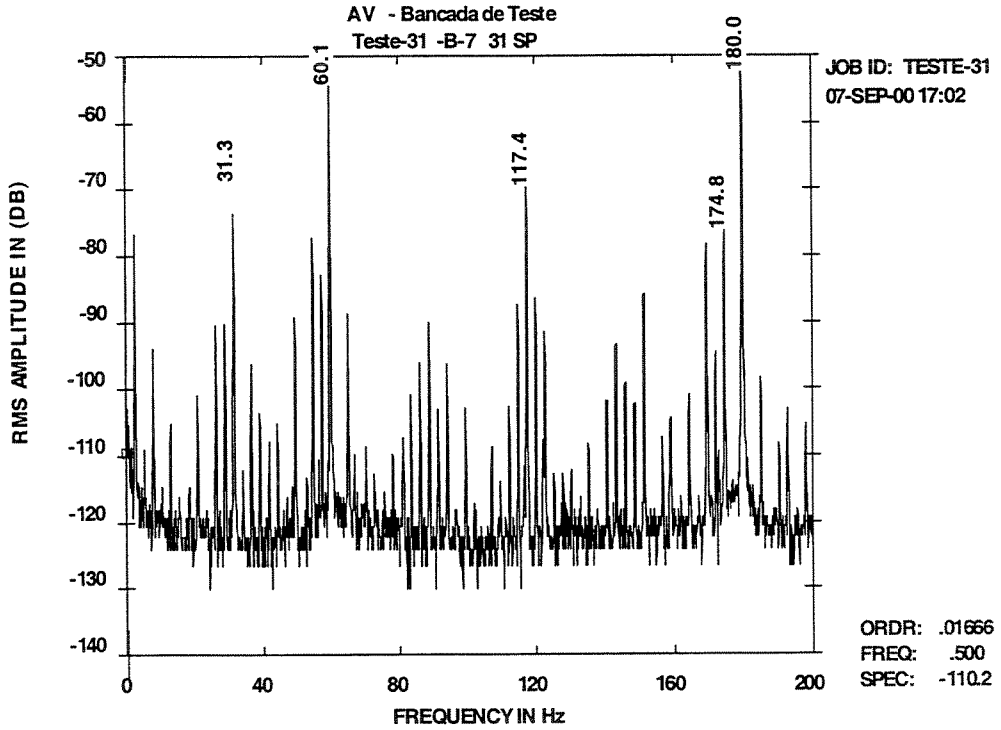


Figura 5.29 - Espectro de fluxo para *single phase*.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Na Figura 5.30 define-se o tipo de tecnologia (análise de fluxo magnético).

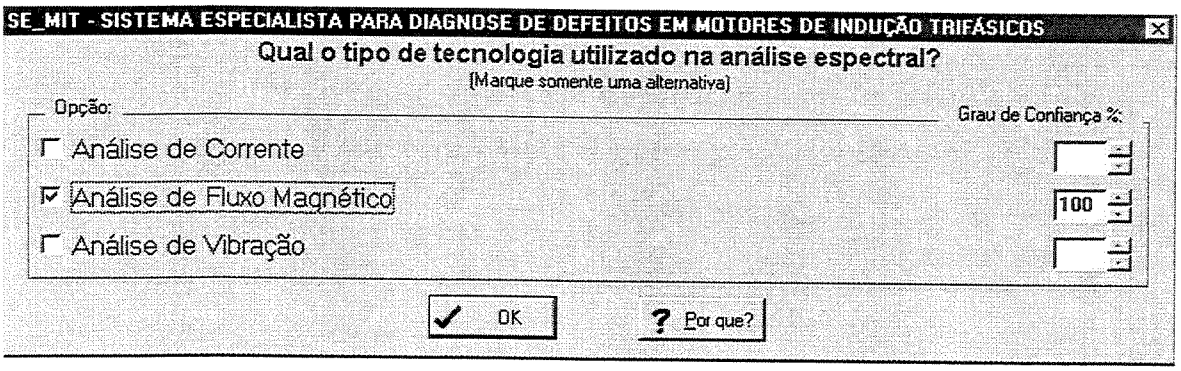


Figura 5.30 - Definição do tipo de tecnologia (*single phase*).

Na Figura 5.31 tem-se o resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico mecânico (*AC e AF não estão sendo usadas na detecção de falhas mecânicas*).

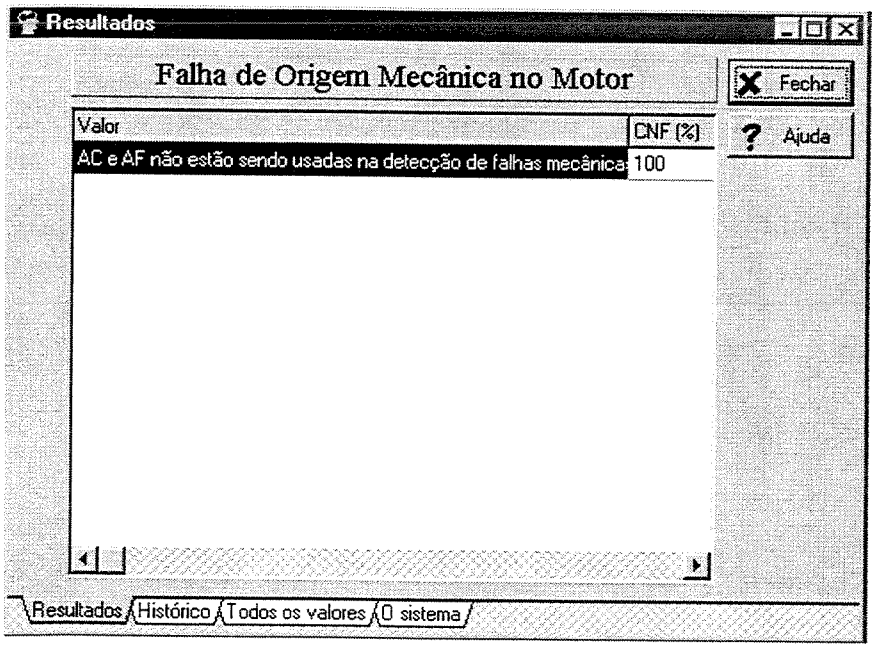


Figura 5.31 - Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico mecânico.

Na Figura 5.32 tem-se a confirmação do diagnóstico mecânico (*Utilize AV em "linear" para diagnóstico de defeitos mecânicos*).

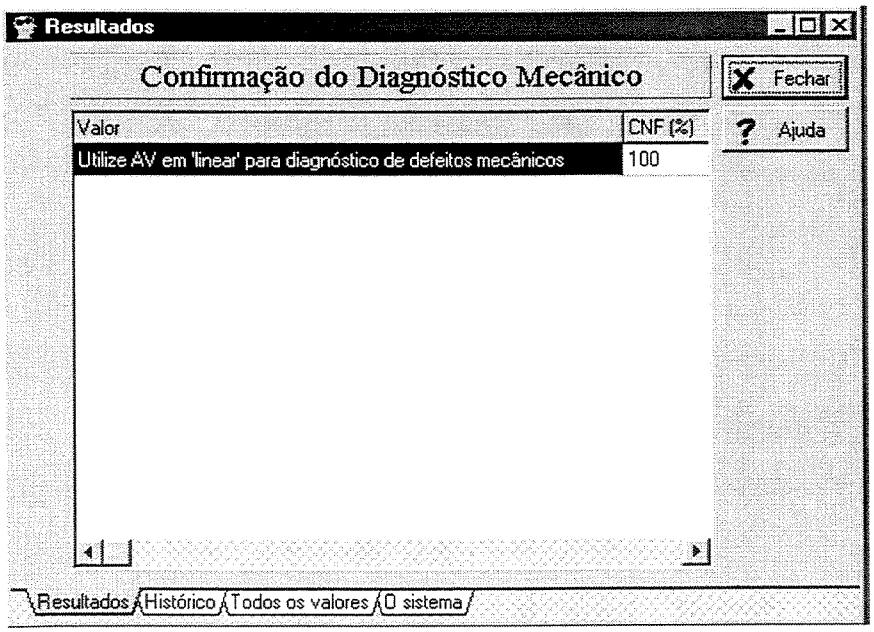


Figura 5.32 - Confirmação do diagnóstico mecânico.

Na Figura 5.33 define-se a unidade do eixo das amplitudes (*dB*), valor *RMS* (*root means square*). Na Figura 5.34 tem-se a comparação das amplitudes de 1 x f_l + 2 x f_r entre os espectros com e sem defeito (a energia aumentou).

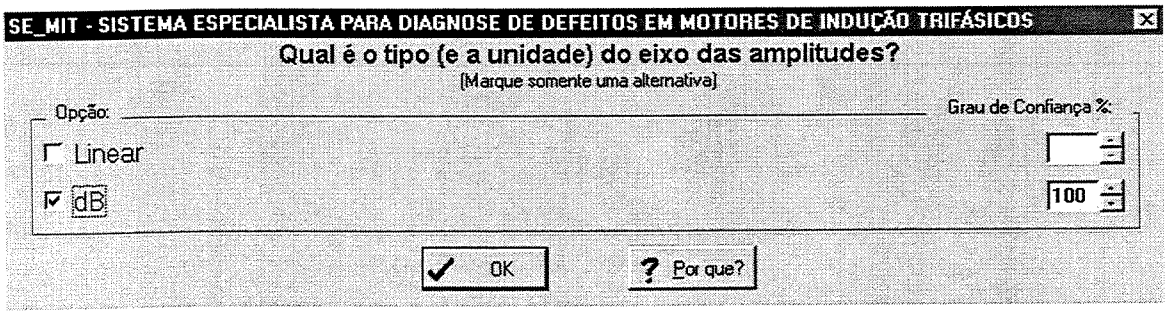


Figura 5.33 - Definição da unidade do eixo das amplitudes (*single phase*).

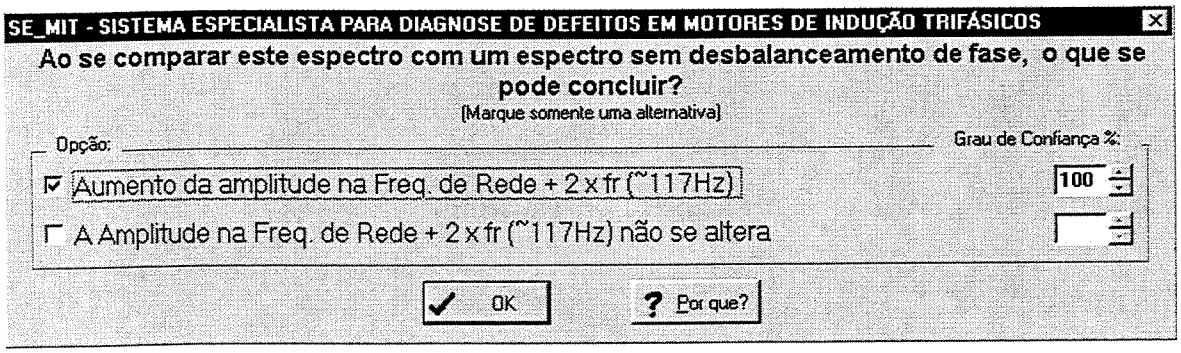


Figura 5.34 - Comparação das amplitudes de 1 x f_l + 2 x f_r (*single phase*).

Na Figura 5.35 verifica-se a presença de barras quebradas através da diferença entre f_l - 2 x f_s (maior que 27 dB).

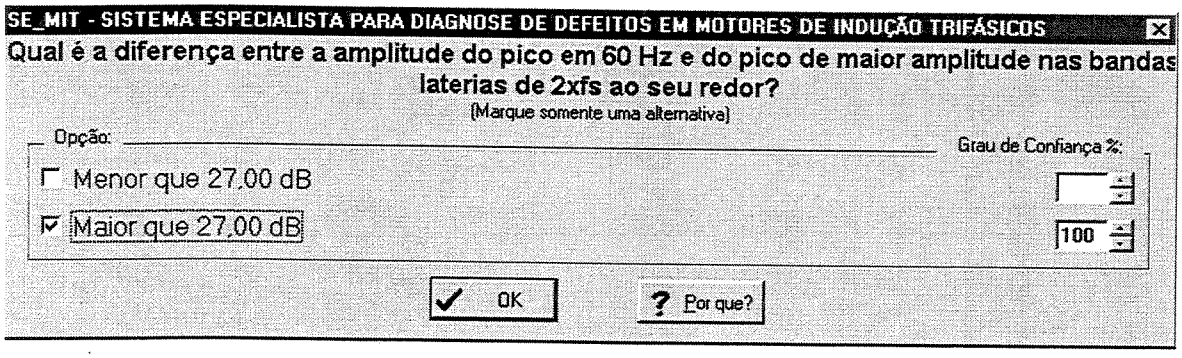


Figura 5.35 - Verificação de barras quebradas, diferença entre f_l - 2 x f_s (*single phase*).

Na Figura 5.36 tem-se o resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico elétrico (*O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas. O Motor apresenta Desbalanceamento de Fase*).

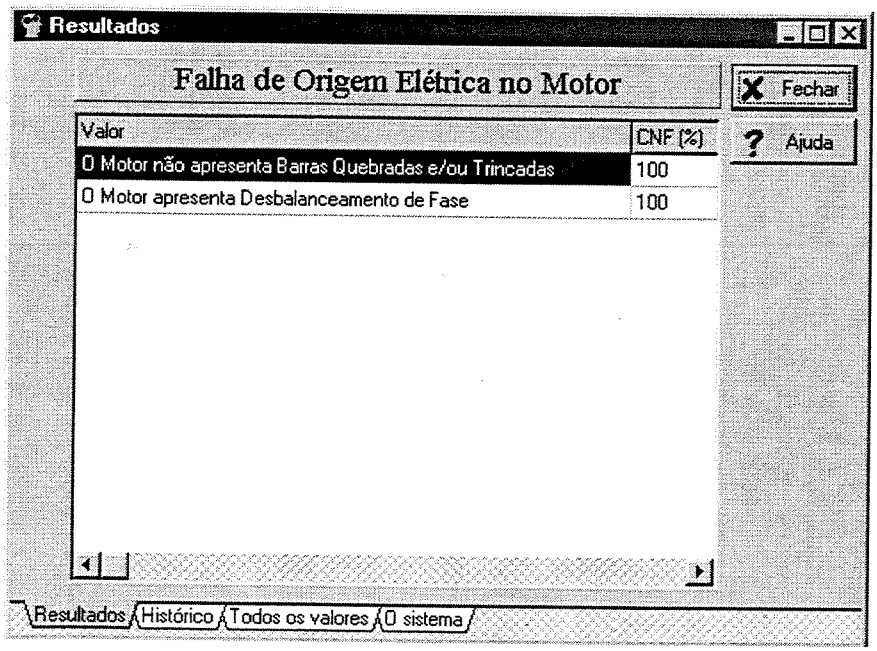


Figura 5.36 - Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico elétrico (*single phase*).

Na Figura 5.37 tem-se a confirmação do diagnóstico elétrico (*Acompanhar curvas de tendência*) e a tela *Fim da consulta.*

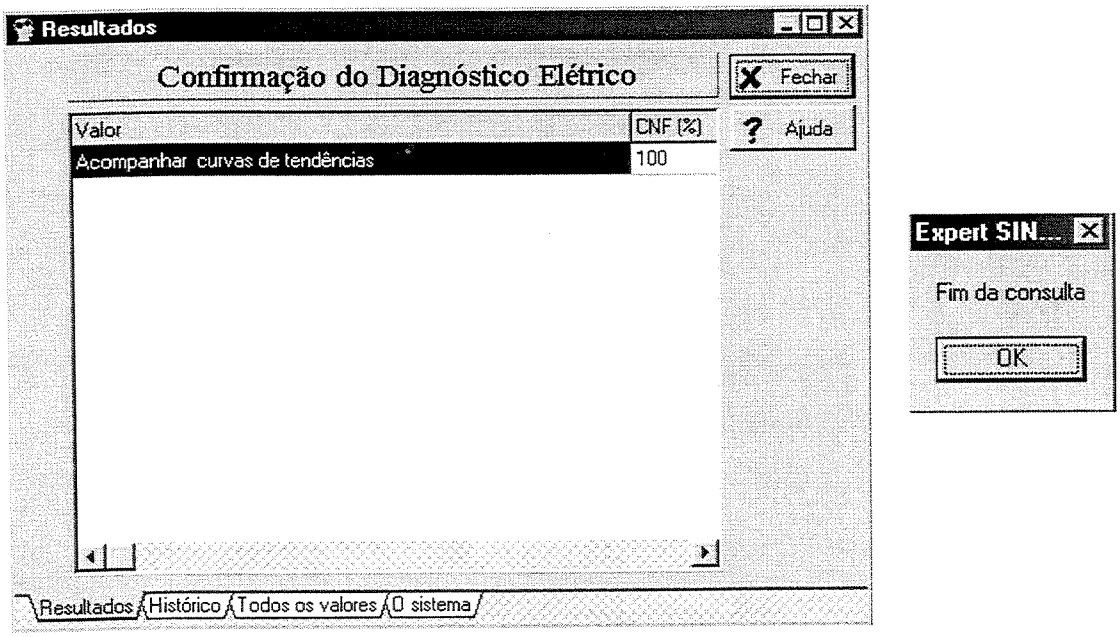


Figura 5.37 - Confirmação do diagnóstico elétrico (*single phase*).

5.4 Comentários

O Sistema Especialista *SE_MIT* é composto de 67 regras: 31 regras para diagnóstico de defeitos de origem mecânica através de *Análise de Vibração*, 4 regras para diagnóstico de defeitos elétricos através de *Análise de Corrente*, 4 regras para diagnóstico de defeitos elétricos através de *Análise de Fluxo Magnético*, 24 regras para diagnóstico de defeitos elétricos através de *Análise de Vibração* e 4 regras utilizadas como auxílio ao usuário quando as respostas não forem satisfatórias. No Anexo III tem-se as regras do *SE_MIT*.

Os problemas presentes nos motores de indução trifásico se mostram adequados para representação por meios de regras de produção. Com o auxílio do *Expert SINTA*, o desenvolvimento do Sistema Especialista *SE_MIT* se deu sem quaisquer dificuldades de implementação e teste. A implementação das regras foram baseadas no conhecimento dos especialistas deste grupo de pesquisa, além da colaboração de especialistas externos.

Capítulo 6

Desenvolvimento do Sistema Híbrido *HY_NES*

Neste capítulo apresenta-se uma introdução às Redes Neurais Artificiais (*RNA*) e a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do sistema *HY_NES* (*Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos*).

6.1 Introdução

O trabalho em redes neurais artificiais, usualmente denominadas redes neurais, tem sido motivado, desde o início, pelo reconhecimento de que o cérebro humano processa informações de uma forma inteiramente diferente do computador digital convencional.

O cérebro é um "computador" (sistema de processamento de informação) altamente complexo, não-linear e paralelo. Ele tem a capacidade de organizar seus constituintes estruturais, conhecidos por neurônios, de forma a realizar certos processamentos muito mais rapidamente que o mais rápido computador digital existente.

Um neurônio em desenvolvimento é sinônimo de um cérebro flexível. A flexibilidade permite que o sistema nervoso em desenvolvimento se adapte ao seu meio ambiente. Assim como a flexibilidade parece ser essencial para o funcionamento dos neurônios como unidades de processamento de informação do cérebro humano, também ela o é com relação às redes neurais construídas com neurônios artificiais, Haykin (2001).

Na sua forma mais geral, uma rede neural é uma máquina projetada para mimetizar a maneira como o cérebro realiza uma tarefa particular ou função de interesse. A rede é,

normalmente, implementada utilizando-se componentes eletrônicos, ou é simulada por programação em um computador digital.

Um dos recursos mais conhecidos em ciências exatas consiste no ajuste de modelos matemáticos a dados experimentais. O caso mais comum é o da regressão, linear ou não, para uma única ou várias variáveis independentes.

Este último tipo de ajuste é de natureza estatística e permite fazer previsão para casos não experimentados na prática. As Redes Neurais estão relacionadas a este tipo de técnica, sendo aplicada a uma ampla variedade de problemas práticos. As Redes Neurais são expressões matemáticas com uma estrutura conveniente. Elas se ajustam melhor a dados experimentais e têm mais capacidade de reproduzi-los (previsão), Spandri (2000).

O nome redes neurais foi dado a tais estruturas matemáticas pela sua semelhança com a estrutura e funcionamento das células e tecidos nervosos. As células nervosas possuem terminações (axônios e dendritos), sendo que substâncias denominadas neuro-transmissores participam da transferência de sinais de natureza elétrica dentro da célula.

Um sinal elétrico chega à célula nervosa percorrendo suas terminações. Estas podem atenuar ou amplificar o sinal. A fisiologia da célula também altera ainda mais o sinal. Este sinal modificado vai para outra célula.

Diferentes terminações modulam o sinal de entrada de modo diferente, conforme seu comprimento e comportamento. Diferentes terminações pesam diferentemente a transmissão do sinal.

A bioquímica celular também altera a transmissão do sinal. Há padrões gerais definidos para transferência, em função de características gerais válidas para classes de células. Para uma mesma função de transferência, a alteração depende de particularidades da célula, ou seja, de parâmetros da função.

Todas as redes neurais são compostas por elementos matemáticos denominados neurônios. Um neurônio, Figura 6.1, recebe como entrada um sinal (número) p multiplicado por um peso w

(*weight*) e um termo linear *b* (*bias*). Estas entradas são somadas e tratadas por uma função *F* do neurônio, produzindo um sinal de saída *a*, expresso pela Equação 6.1, Spandri (2000).

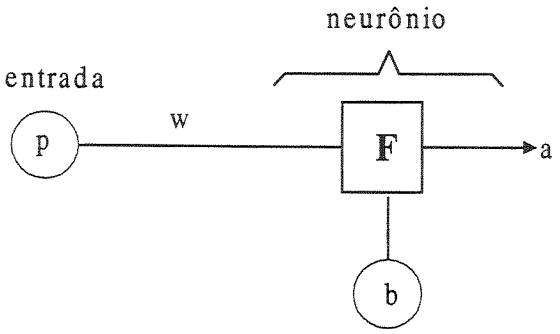


Figura 6.1 - Esquema representativo de um neurônio.

$$a = F(wp + b) \tag{6.1}$$

Os sinais de um neurônio vão para um ou mais neurônios seguintes. Nestes, há novamente alteração do sinal com outros pesos, *bias* e a função *F* que dependem da natureza da célula.

Uma rede neural pode ser treinada utilizando-se grandes quantidades de exemplos significativos, o que contribui para a obtenção de um desempenho elevado. Ou seja, a avaliação é modelada através de exemplos de aplicações bem ou mal sucedidas, através de modelos objetivos ou quantificáveis desta operação.

Desta forma, a rede neural é capaz de encontrar relações entre as diversas informações. Estes sistemas são mais flexíveis, ou seja, quando mudanças são necessárias, pode-se alterar apenas o conjunto de exemplos de treinamento, sem requerer mudanças estruturais no sistema. Estes sistemas podem até mesmo detectar a necessidade e realizar um novo treinamento. Por serem utilizados em diferentes áreas e operados por pessoal sem experiência nas mesmas, estes sistemas são considerados consistentes e eficientes.

Genericamente, as redes neurais apresentam as seguintes vantagens:

- menor necessidade de se determinar, a priori, quais são os fatores determinantes sobre o modelo que está sendo desenvolvido;

- permite a interferência de múltiplos fatores de entrada (múltiplas variáveis) e um inter-relacionamento muito mais complexo entre elas;
- alta tolerância a falhas, uma vez que é permitida a entrada de grande número de parâmetros;
- modelagem direta do problema, sem a necessidade de se seguir um modelo pré estabelecido, como no caso da regressão estatística.

As redes neurais apresentam as seguintes limitações:

- falta de significado da sua estrutura. Uma rede nada mais é do que um conjunto de pesos (representados por números reais) e a observação destes números não traz muitas conclusões sobre a natureza do problema que está sendo resolvido;
- o tempo requerido em sua fase de aprendizado, particularmente nas do tipo Rummelhart, que utilizam o método da retropropagação. Quanto mais sutis as relações entre as variáveis e maior a precisão requerida nos resultados, maior será o tempo de treinamento;
- dificuldade na escolha da melhor arquitetura para treinamento das redes neurais artificiais.

Os campos de aplicação para as redes neurais são amplos: análise e processamento de sinais, controle de processos, classificação de dados, reconhecimento de padrões, análise de imagens, diagnóstico médico, entre outros. Na área industrial, destacam-se as redes neurais utilizadas na prevenção de desvios de processos e em sistemas híbridos, associados às técnicas de lógica *fuzzy* e sistemas especialistas, para detecção de problemas de manutenção. Tratam-se, normalmente, de problemas com quantificação matemática difícil, ineficaz ou até mesmo impossível. A seguir, destaca-se a aplicação de redes neurais no diagnóstico e detecção de falhas em motores elétricos.

Chow e Yee (1990) descreveram várias arquiteturas de redes neurais artificiais para detecção de falhas incipientes em tempo real em máquinas de indução. O desempenho das redes foi baseado em medições *on-line*, sem a necessidade dos rigorosos modelos matemáticos. O

projeto das redes variaram em complexidade e precisão e no modelo mais complexo foi considerado o ruído.

Chow e Yee (1991) apresentaram um novo enfoque para detecção de falhas incipientes *on-line* em um motor de indução monofásico usando redes neurais artificiais. O sistema também pode ser aplicado a qualquer outro tipo de máquina rotativa. Neste trabalho, as pesquisas ficaram restritas à falha no isolamento e ao desgaste nos mancais.

Chow *et al.* (1991) desenvolveram um detector de falhas incipientes baseado em redes neurais para motores elétricos de pequeno e médio porte. Neste trabalho, as pesquisas ficaram restritas a simulação de uma falha de isolamento provocada no enrolamento do estator.

Chow *et al.* (1993[a,b]) apresentaram as considerações gerais do projeto de redes neurais *feedforward* para detecção de falhas em motores elétricos abordando: desempenho, implementação e treinamento (tamanho do conjunto dos dados, valores dos parâmetros e critério de parada). Apresentaram também a aplicação da lógica *fuzzy* em conjunto com as redes neurais, tornando o sistema mais otimizado. Neste trabalho, as pesquisas ficaram restritas à detecção de falha devido a um motor de indução com rotor em curto-circuito.

Goode e Chow (1993) e Chow e Goode (1993) apresentaram um sistema híbrido, lógica *fuzzy* e redes neurais artificiais para detectar falhas incipientes em motores de indução monofásico. Este sistema, além de ter uma desempenho melhor na detecção das falhas incipientes, também permite uma interpretação heurística do processo de detecção de falhas através das redes neurais. Neste trabalho, as pesquisas ficaram restritas a falha devido ao desgaste nos mancais.

Chow (1994) descreveu as vantagens e desafios da aplicação de redes neurais artificiais e lógica *fuzzy* na detecção de falhas em motores elétricos. Diferente das técnicas convencionais, as redes neurais e lógica *fuzzy*, além de eficientes, não são invasoras, não requerem equipamentos caros para coleta dos sinais e não necessitam de modelos matemáticos complexos.

Goode *et al.* (1995[a,b]) apresentam um sistema híbrido neuro-*fuzzy* que une as tecnologias de redes neurais e lógica *fuzzy* para detectar falhas em motores de indução. O uso da lógica *fuzzy*

tem o objetivo de fornecer o raciocínio heurístico, uma vez que as redes neurais são consideradas caixas pretas e não fornecem a interpretação heurística da solução. O desempenho do sistema foi avaliado através da introdução de falhas nos mancais de rolamento e no isolamento de um motor de indução monofásico.

Schoen *et al.* (1995) apresentaram um novo método para detecção de falhas em motores de indução trifásicos *on-line*. O sistema utiliza *RNA* para aprender, *on-line*, as características espectrais de um motor operando em perfeitas condições. Os espectros, continuamente monitorados, contêm muitos harmônicos. Para reduzi-los a um número adequado para o treinamento das redes foi utilizado um filtro seletivo. A combinação do filtro de freqüência baseado em regras (sistema especialista) e as redes neurais, tornaram o sistema mais eficaz na detecção de pequenas mudanças no espectro produzidas por falhas incipientes no motor. Neste trabalho, as pesquisas ficaram restritas aos espectros de corrente das falhas: deformação da gaiola do rolamento e desbalanceamento de massa.

Gulez *et al.* (1996) projetaram uma rede neural artificial para detectar falhas em motores de indução trifásicos com aplicação do processador digital de sinal (*DSP - Digital Signal Processor*). Os resultados apresentaram erros de 0,8% para falhas introduzidas no isolamento e 3,5% nos rolamentos.

Li *et al.* (1997) apresentam uma nova técnica baseada em conhecimento para aumentar o desempenho do detector de falhas em motores através do uso de redes neurais artificiais. Essa técnica pré-processa os dados de treinamento, aumenta significativamente o desempenho, diminui o tempo de treinamento e torna a escolha dos dados de treinamento menos dependente do que no método convencional.

Fiorenzo *et al.* (1998) apresentaram uma revisão das técnicas desenvolvidas no campo de diagnósticos de máquinas e acionamentos elétricos baseados na Inteligência Artificial. Esta revisão cobre as aplicações de sistemas especialistas, redes neurais e lógica *fuzzy*, que podem ser integradas entre si, e também com a maioria das técnicas tradicionais para resolver problemas específicos.

Altug *et al.* (1999) desenvolveram dois sistemas de inferência neuro-*fuzzy* para detectar falhas e diagnosticar problemas em motores de indução trifásicos: *FALCON* (*Fuzzy Adaptive Learning Control/Decision Network*) e *ANFIS* (*Adaptive Network Based Fuzzy Inference System*). Ambas estruturas mostram-se adequadas sendo a segunda ligeiramente mais precisa. Altug e Chow (1997) apresentaram uma análise comparativa destes dois sistemas.

Neste trabalho, apresenta-se o sistema híbrido *HY_NES*, uma nova abordagem baseada em técnicas de inteligência artificial (redes neurais artificiais e sistemas especialistas) para diagnosticar falhas de origem mecânica (desbalanceamento com 21g, desbalanceamento com 35,1g, desalinhamento e folga mecânica), origem elétrica (2, 3, 4 e 5 barras quebradas, desequilíbrio de fase com 200V e 210V e *single phase*) e a condição normal de operação.

As forças de excitação aplicadas em um motor de indução trifásico são caracterizadas utilizando-se redes neurais artificiais, arquitetura *8x5x3*, treinadas a partir dos sinais de vibração experimentais. Os sinais foram coletados, aleatoriamente, nas direções vertical, axial e horizontal, lado do acoplamento e lado da ventoinha, formando um banco de dados de 50 testes para cada condição de falha. Através de um filtro seletivo é possível reduzir o número de parâmetros capazes de representar os sinais utilizados para o treinamento das redes neurais artificiais. Através das regras implementadas no sistema especialista, é possível obter o diagnóstico das falhas incipientes nos seis pontos de coleta dos sinais.

Este sistema difere dos demais pela sua modularidade, pelos tipos de excitações estudadas, pelo número significativo de espectros que compõem o banco de dados e pelo uso da análise de vibração como técnica utilizada para a coleta dos sinais.

6.2 Desenvolvimento do Sistema Híbrido *HY_NES*

6.2.1 Arquitetura do sistema *HY_NES*

Na Figura 6.2 tem-se a arquitetura do programa *HY_NES* desenvolvido em linguagem C^{++}, orientada a objeto, o que possibilita uma melhor documentação e manipulação para futuras modificações.

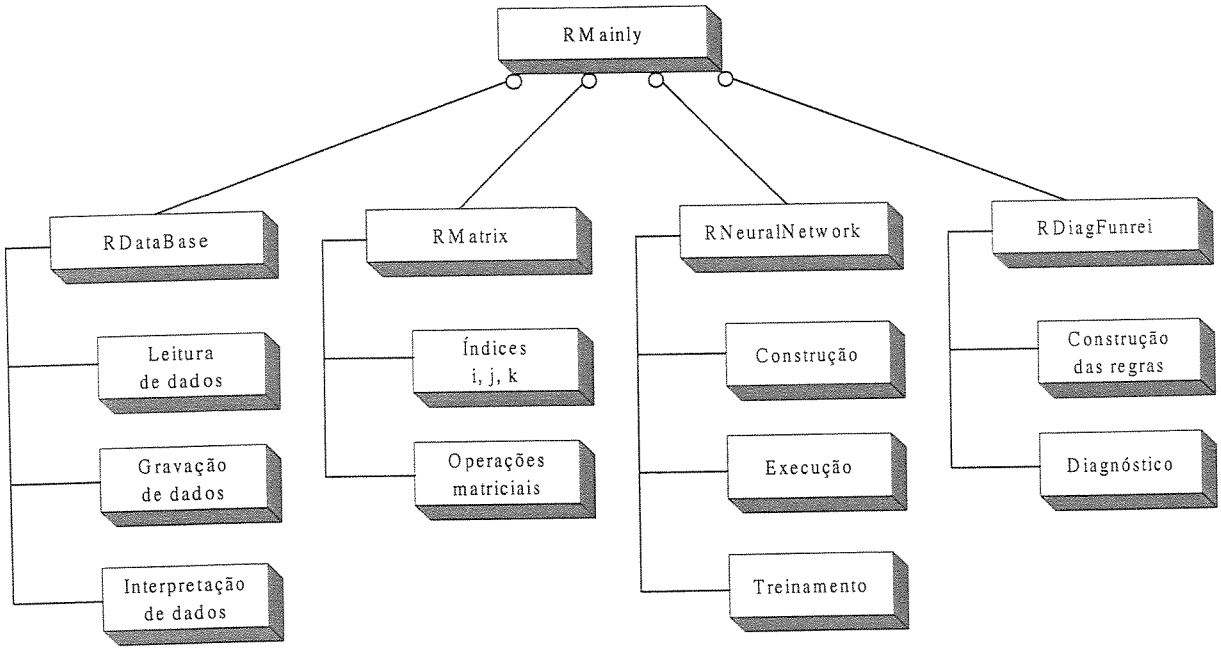


Figura 6.2 - Arquitetura do programa *HY_NES*.

O módulo *RDataBase* está relacionado com a interface do programa e é responsável pela leitura e gravação dos dados dos arquivos, do tipo *ASCII*. Estes arquivos são responsáveis pela definição da arquitetura (número de camadas, número de neurônios por camada, função de ativação, pesos, *bias*, método de propagação, método de treinamento, erro de treinamento, taxa de aprendizagem, taxa de inércia, entre outros.) e interpretação de dados. A entrada de dados baseia-se em palavras chaves que o programa interpreta e pode definir a estrutura da rede. Tem-se também as opções para treinar ou apenas executar os arquivos de dados.

O módulo *RMatrix* faz a implementação de uma matriz de três índices, onde são processadas todas as operações. O índice *i* refere-se à camada, o índice *j* ao neurônio e o índice *k* ao neurônio anterior, ou ao teste que está sendo realizado.

O módulo *RNeuralNetwork* está relacionado com a rede neural propriamente dita. Neste módulo implementou-se vários parâmetros: funções de ativação (*sigmoidal*, *sigmoidal expandida* e *tanh*); métodos de treinamento (padrão-a-padrão e batelada, com e sem a variação da taxa de aprendizagem) e método de execução (*feedforward*). Neste módulo processa-se toda parte matemática (erro, gradiente e variação da taxa de aprendizagem). No processo de treinamento

monitora-se a evolução do erro permitindo, através de processos multitarefas (*threads*), finalizar o programa a qualquer momento com um ótimo desempenho.

O módulo *RDiagFunrei* está relacionado com o sistema especialista. Neste módulo implementou-se as 199 regras para o diagnóstico das falhas incipientes nas seis posições dos sensores.

Na Figura 6.3 tem-se a tela de apresentação do programa *HY_NES*.

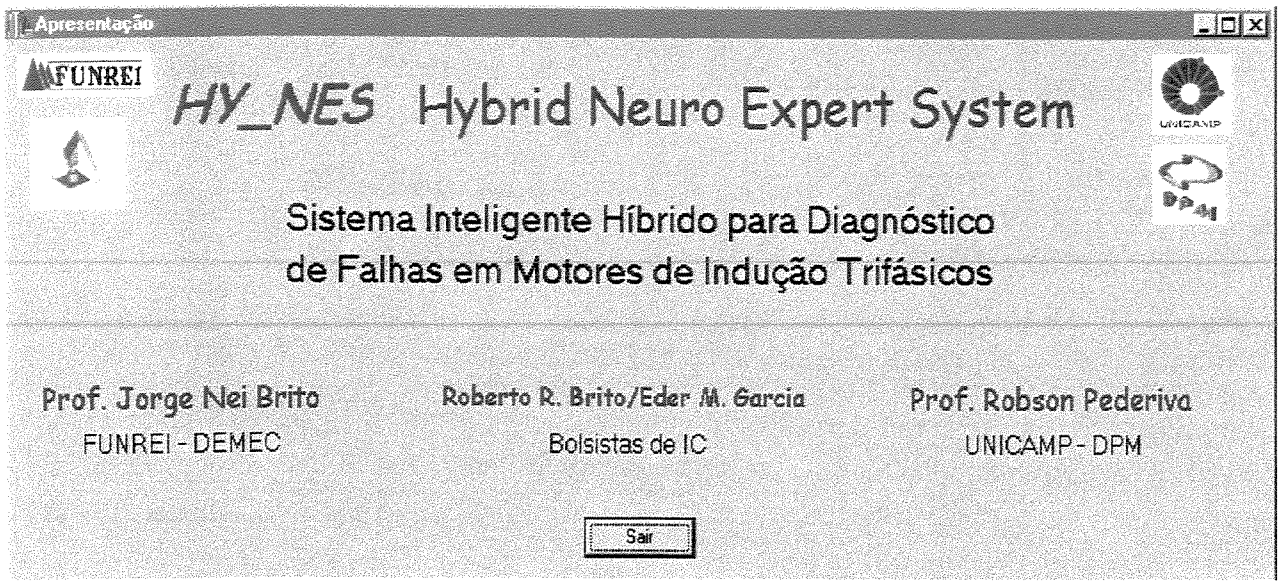


Figura 6.3 - Tela de apresentação do programa *HY_NES*.

6.2.2 Módulo *Pré processamento*

No uso de redes neurais a definição de sua arquitetura e de seu treinamento são etapas que dependem diretamente da quantidade e da qualidade dos dados utilizados. A qualidade dos dados é importante, principalmente, em redes neurais de classificação e em aplicações de identificação de forças de excitação em sistemas mecânicos complexos, Lépore *et al.* (2000).

Os dados obtidos para treinamento, através da análise de vibração, trazem no espectro, além das informações relacionadas com os defeitos propriamente ditos, ou seja, suas freqüências determinísticas, várias outras informações que podem ser descartadas, inclusive ruídos.

Geralmente, os sinais de entrada para o processo de aprendizado das redes neurais são compactados, aumentando sua eficiência e seu desempenho computacional.

Oliveira (1999) aplicou uma técnica estatística de compactação de sinais baseada na análise dos autovalores da matriz de covariância dos dados.

Lépore e Santos (1999) e Lépore *et al.* (2000), utilizaram a técnica de decomposição *wavelet* para promover a redução do número de parâmetros capazes de representar os sinais utilizados para o treinamento das redes neurais.

Schoen *et al.* (1995) utilizaram um filtro de freqüência seletivo baseado em regras (sistema especialista), que determinava quais freqüências deveriam ser monitoradas pela rede neural.

Baseado no trabalho de Schoen *et al.* (1995), implementou-se no programa *HY_NES* o módulo *Pré-processamento* composto dos submódulos: *Separação*, *Filtrar* e *Agrupar*, Figura 6.4.

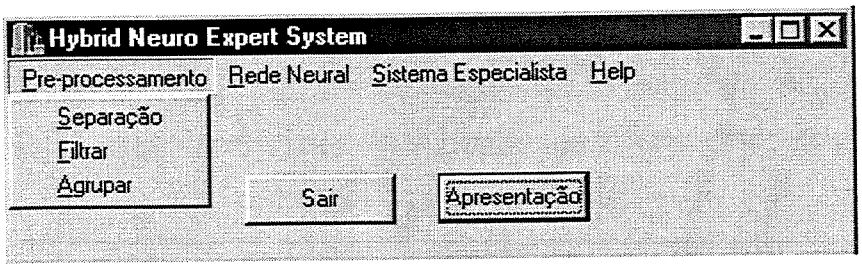


Figura 6.4 - Tela do módulo *Pré processamento*.

Os sinais coletados através do *UltraSpec 8000* foram transferidos para o computador através do *software UltraManager*. O arquivo completo é composto de cinqüenta séries de testes, Figura 6.5.

Cada série é composta de 12 testes (condição sem defeito, quatro falhas de origem mecânica e sete falhas de origem elétrica), sendo os sinais coletados em seis posições, Figura 6.6. Através da opção *Analyze Reports*, Figura 6.7, é possível transformar os sinais num arquivo *txt*, Figura 6.8.

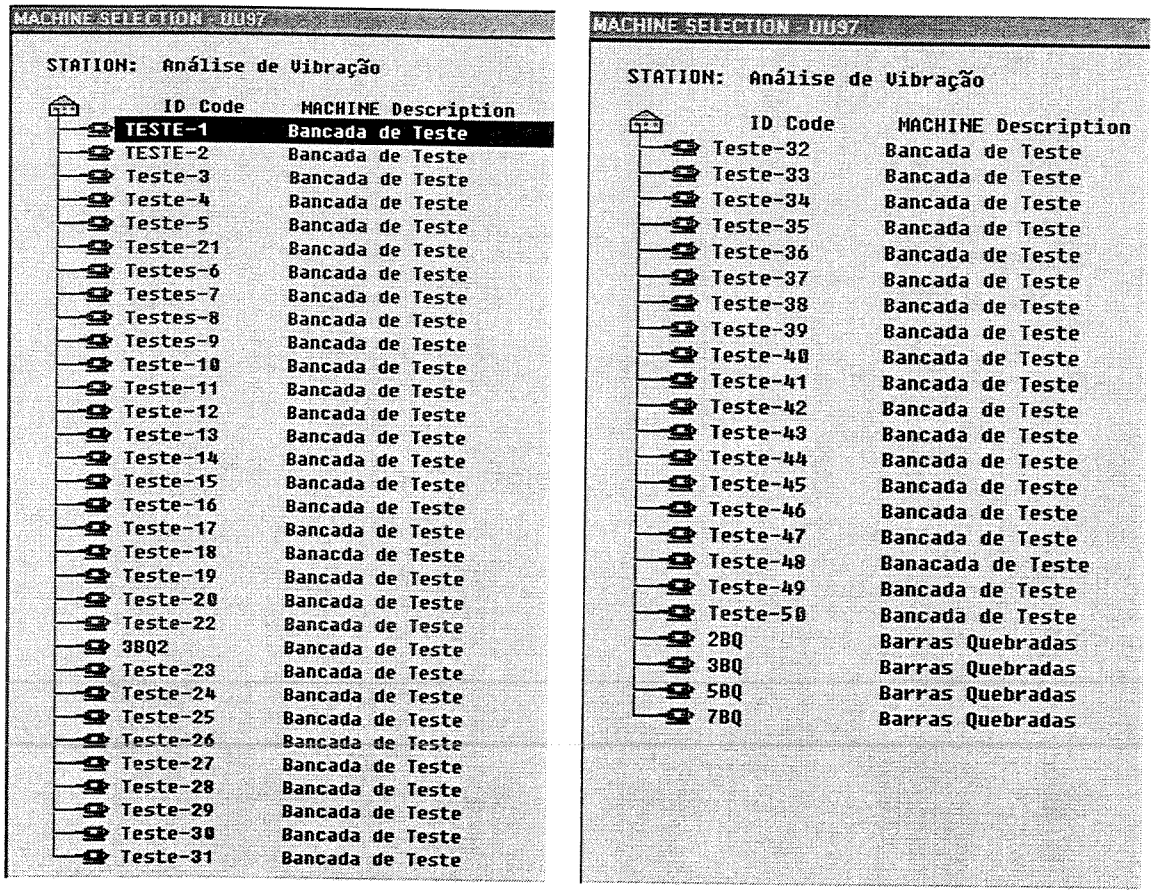


Figura 6.5 - Testes realizados no módulo *Analyze* do *UltraSpec 8000*.

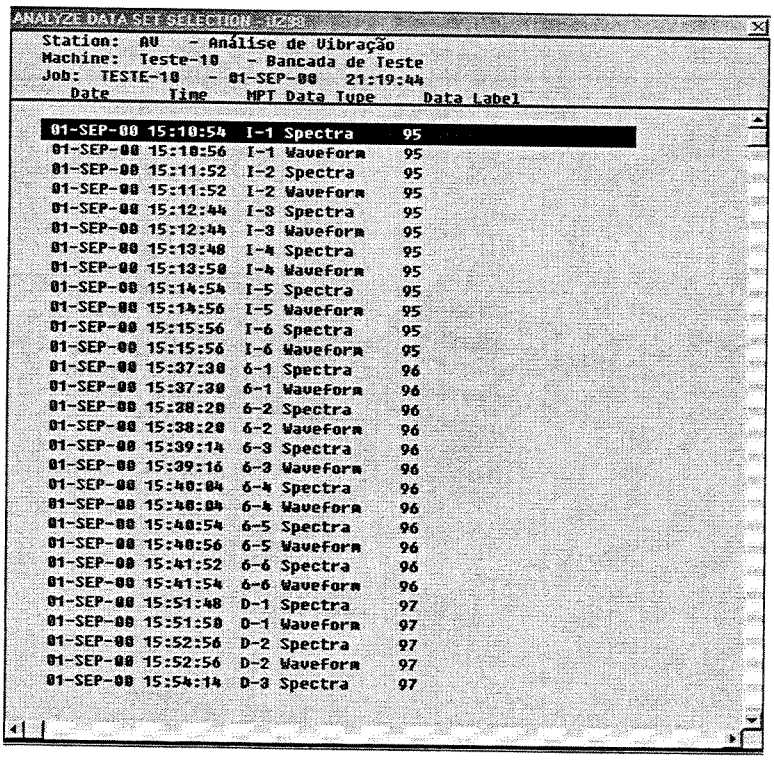


Figura 6.6 - Detalhamento dos espectros do Teste 10.

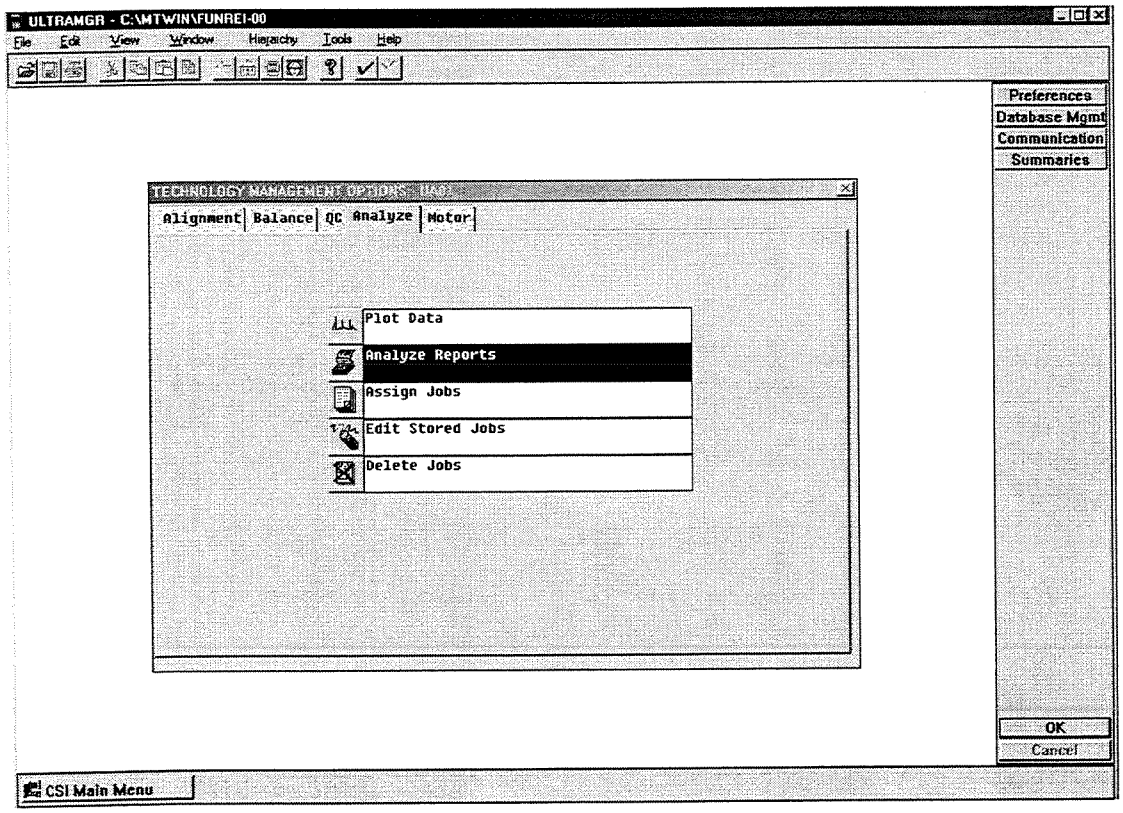


Figura 6.7 - Tela do *UltraManager* com a opção *Analyze Reports* ativada.

Desalinhamento_E-2 Tese

DATA SET 3 ----- SPECTRA DATA
Measurement Point: E-2
29-AUG-00 22:57:56

FREQUENCY Hz	AMPLITUDE MM/SEC RMS	FREQUENCY Hz	AMPLITUDE MM/SEC RMS	FREQUENCY Hz	AMPLITUDE MM/SEC RMS
.00	.0000	133.36	.0062	266.72	.0157
.12	.0051	133.48	.0054	266.84	.0203
.25	.3973	133.61	.0014	266.97	.0068
.37	.3173	133.73	.0008	267.09	.0013
.50	.0993	133.86	.0017	267.22	.0013
.62	.1959	133.98	.0012	267.34	.0015
.75	.1200	134.11	.0006	267.47	.0017
.87	.1435	134.23	.0010	267.59	.0019
1.00	.0303	134.36	.0010	267.72	.0021
1.12	.1145	134.48	.0011	267.84	.0018
1.25	.0745	134.61	.0019	267.97	.0012
1.37	.1324	134.73	.0019	268.09	.0009
1.50	.0510	134.86	.0019	268.22	.0015
1.62	.0793	134.98	.0041	268.34	.0011
1.75	.0455	135.11	.0124	268.47	.0004
1.87	.0586	135.23	.0084	268.59	.0014

Figura 6.8 - Exemplo de um arquivo gerado pelo *Analyze Reports*.

Na opção *Analyze Reports* gerou-se vários arquivos *txt* que foram separados por tipo de excitação. No submódulo *Separação*, de cada dez séries de testes, fez-se aleatoriamente a separação destes arquivos, sendo:

- seis séries de testes para *treinamento*, num total de 2.160 espectros;
- duas séries de testes para *validação das redes neurais*, num total de 720 espectros;
- duas séries de testes para *validação do sistema híbrido*, num total de 720 espectros.

No submódulo *Filtrar*, fez-se a filtragem das freqüências determinísticas de interesse através do filtro seletivo. Este procedimento reduziu significativamente o número de informações a ser enviado para as redes neurais, eliminando ruídos, redundâncias e melhorando a qualidade dos dados a serem treinados. A grande dificuldade foi identificar estas freqüências, sendo requerido uma análise exaustiva de todos os espectros.

As falhas de origem mecânica foram apresentadas nos Capítulo 2 e 4, sendo identificadas nos espectros de vibração pela freqüência de rotação (f_r) e seus harmônicos. Brito *et al.* (2001[b]), realizaram um estudo através da média e variância, onde observou-se que após o quarto harmônico não havia mais variação da freqüência determinística com a falha. Este estudo definiu as freqüências de interesse ($1 \times f_r$, $2 \times f_r$, $3 \times f_r$ e $4 \times f_r$) para treinamento das redes neurais devido às excitações de origem mecânica.

As falhas de origem elétrica, através da análise de vibração, foram apresentadas no Capítulo 4. Através de um trabalho exaustivo, após análise minuciosa dos espectros, detectou-se as freqüências determinísticas para treinamento das redes neurais devido às excitações de origem elétrica. As freqüências de interesse para barras quebradas ($2 \times f_r \pm 2 \times f_s$ e $2 \times f_l$) também foram apresentadas por Brito *et al.* (2001[c]), onde f_s é a freqüência de escorregamento e f_l é a freqüência de linha. As freqüências de interesse para desequilíbrio de fase ($2 \times f_l \pm 2 \times f_r$ e $2 \times f_l$) também foram apresentadas por Baccarini *et al.* (2001).

No módulo *Agrupar*, estas freqüências são agrupadas e gravadas na forma matricial para alimentação do programa de treinamento.

6.2.3 Módulo *Rede Neural*

Na Figura 6.9 tem-se a tela do módulo *Rede Neural*, composto dos submódulos: *Treinar Rede Neural*, *Validar Rede Neural* e *Diagnóstico*.

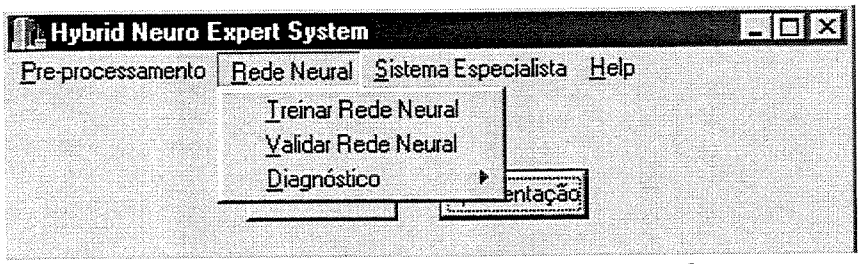


Figura 6.9 - Tela do módulo *Rede Neural*.

Implementou-se as funções de transferência: *Linear* (função linear), *LogSigExp* (função sigmóide expandida), *LogSig* (função sigmóide) e *TanH* (função tangente hiperbólica). A função de transferência converte a soma de ativação das entradas em ativação de saída. Esta função é um fator básico da diferenciação entre os neurônios. Ela decide, baseada no potencial interno do neurônio, qual o valor a ser enviado aos demais neurônios. Neste trabalho, utilizou-se a função tangente hiperbólica.

Implementou-se o método de propagação *FeedForward*. Uma rede unidirecional obrigatoriamente é estruturada em camadas. No caso da rede neural multicamadas unidirecionais, cada camada recebe os sinais provenientes da camada anterior, processa-os e fornece os sinais de saída para a camada subsequente, estabelecendo-se assim o fluxo de informações. Neste tipo de rede não existe ligações entre neurônios de uma mesma camada. O primeiro neurônio é chamado de *neurônio de entrada* e sua única função é receber o vetor de entrada e transmiti-lo à rede neural. O último neurônio é chamado de *neurônio de saída* e, geralmente, é onde coloca-se uma função de ativação. Os neurônios intermediários são conhecidos como *neurônios invisíveis*.

Os pesos (w), são valores que representam o grau de importância que determinada entrada possui em relação aquele determinado neurônio. Ou seja, o valor do peso muda em função da intensidade do sinal de entrada e, dessa forma, muda seu valor representativo para a rede. Isto significa que, quando uma entrada é bastante estimulada, também acaba estimulando o peso correspondente à sua conexão. Quanto mais estimulado, mais o peso influenciará no sinal de saída.

A inicialização dos pesos da rede é importante. Dependendo dos valores de inicialização, a convergência dos parâmetros da rede pode ocorrer adequadamente. Como ainda não há uma maneira de se saber quais são os pesos ideais para cada entrada dos neurônios, normalmente opta-se por iniciá-los aleatoriamente. O método de inicialização aleatória dos pesos tem sido mais utilizado devido a sua facilidade de aplicação e praticidade. Por outro lado, muitas vezes este método não resolve o problema e o treinamento tem que ser reiniciado com novos pesos.

Vários autores têm estudado as metodologias de inicialização dos pesos para redes neurais artificiais multicamadas: Castro e Von Zuben (1998), Kim e Ra (1991), Wessels e Barnard (1992), Hernandez e Fernandez (2001), Hertz *et al.* (1991), Kolen e Pollack (1990), Weymaere e Martens (1994), Nguyen e Widrrow (1990), Thimm e Fiesler (1997), Wessels e Barnard (1992) e Chen e Nutter (1991).

Implementou-se dois métodos para treinamento das redes:

- *Treinamento Seqüencial* (*Padrão-a-Padrão*): a operação de ajuste de pesos é feita após a apresentação de cada exemplo do treinamento. Nestes casos, a ordem de escolha dos exemplos para a apresentação deve ser aleatória.

- *Treinamento Cumulativo* (*Batelada*): os pesos são adaptados somente após um conjunto de exemplos de treinamento ter sido apresentado. Essa quantidade é geralmente igual ao número total de exemplos de treinamento. Os erros de cada neurônio são acumulados sobre todos os exemplos de treinamento. Estes são reajustados de uma só vez, obtendo-se uma média dos vetores gradientes para cada exemplo de treinamento. Este método foi usado neste trabalho e apresenta uma aproximação mais precisa do gradiente de erro.

No *HY_NES* tem-se a opção de trabalhar com o *momentum*, técnica utilizada para tentar escapar dos mínimos locais. A inércia dos pesos na direção do mínimo mais global é alterada, com base na etapa anterior de correção dos pesos. Este procedimento permite velocidades maiores de aprendizado sem correr o risco do algoritmo ignorar o problema dos mínimos locais.

A estrutura flexível do *HY_NES* permite inserir e excluir neurônios nas estruturas das redes neurais que estão em construção e acompanhar a evolução do erro e calcular as médias (x) e as variâncias (s) dos dados treinados.

A validação das redes neurais é feita através dos dados exclusivamente separados para esta finalidade. Cada um dos 120 arquivos de dados *txt*, num total de 720 espectros, contém informações relativas aos seis espectros coletados (três no lado do acoplamento e três no lado da ventoinha, nas direções vertical, axial e horizontal).

O arquivo *7bq_v_8.txt*, referente ao oitavo teste de validação para sete barras quebradas, foi escolhido aleatoriamente para explicação dos passos seguintes. Este arquivo, com os seis espectros foi passado em todas as redes neurais. Na rede sem defeito as entradas correspondem às 9 freqüências determinísticas. Nas redes mecânicas, às 4 freqüências determinísticas relacionadas com as falhas de origem mecânica. Nas redes elétricas, às 6 freqüências determinísticas relacionadas com as falhas de origem elétrica. O programa identifica automaticamente estas freqüências nos arquivos *txt*, através do filtro seletivo.

Na Figura 6.10 tem-se o arquivo *Resposta_7bq_v_8.txt* da matriz de resposta do diagnóstico das redes neurais artificiais (*RNA*). A matriz resposta das redes neurais tem três índices i, j e k. A identificação das excitações é feita através dos valores do índice k: sem defeito de 1 a 6, folga mecânica de 10 a 15, desbalanceamento 35,1g de 20 a 25, desbalanceamento 21g de 30 a 35, desalinhamento de 40 a 45, *single phase* de 50 a 55, desbalanceamento de fase 2 (200V) de 60 a 65, desbalanceamento de fase 1 (210V) de 70 a 75, 2 barras quebradas de 80 a 85, 3 barras quebradas de 90 a 95, 5 barras quebradas de 100 a 105 e 7 barras quebradas de 110 a 115.

Para o arquivo *7bq_v_8.txt* a resposta deve ser maior ou igual 0,5 nos dígitos 110 a 115 e menor que 0,5 para os demais. No arquivo *Resposta_7bq_v_8.txt*, Figura 6.10, os valores para os dígitos 110 a 115 apresentaram valores superiores a 0,5. Isto significa que a rede neural foi capaz de diagnosticar corretamente a falha. Devido a complexidade de interpretação deste arquivo resposta implementou-se módulo *Sistema Especialista.*

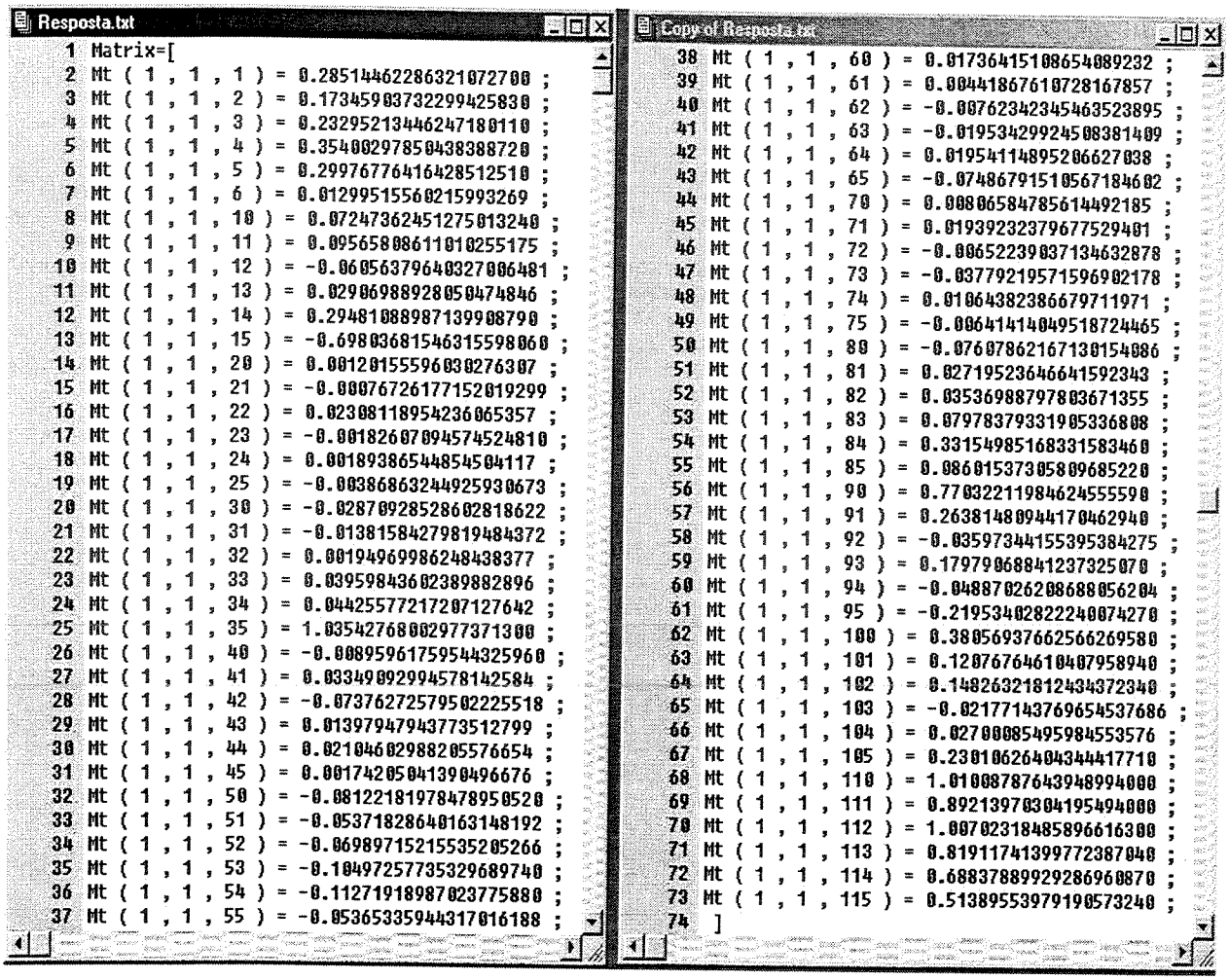


Figura 6.10 - Arquivo *Resposta_7bq_v_8.txt* da matriz de resposta do diagnóstico das *RNA*.

6.2.4 Módulo *Sistema Especialista*

O *Sistema Especialista* é composto de 199 regras: de 1 a 38 para o sensor P-1 (*AVV*), de 39 a 67 para o sensor P-2 (*AAV*), de 68 a 100 para o sensor P-3 (*AHV*), de 101 a 133 para o sensor P-4 (*AVA*), de 134 a 170 para o sensor P-5 (*AVV*) e de 171 a 199 para o sensor P-6 (*AVV*).

Para o arquivo *7bq_v_8.txt*, a rede neural *sem defeito* deve apresentar uma resposta *P<0,5*. As redes neurais: folga mecânica, desbalanceamento 35,1g, desbalanceamento 21g, desalinhamento, *single phase*, desbalanceamento de fase 2 (200V), desbalanceamento de fase 1 (210V), 2 barras quebradas, 3 barras quebradas, e 5 barras quebradas devem apresentar uma resposta *P<0,5* e *P>1,0*. A rede neural 7 barras quebradas deve apresentar resposta no intervalo *0,5<P<1,0*.

Na Figura 6.11 tem-se a tela do módulo *Sistema Especialista* com todos os sensores selecionados. Na Figura 6.12 tem-se a resposta do *Sistema Especialista* para o arquivo *7bq_v_8.txt*. O diagnóstico aparece para cada sensor, identificando o número da regra e o *Grau de Ponderação*, definido a partir das respostas dos arquivos de validação.

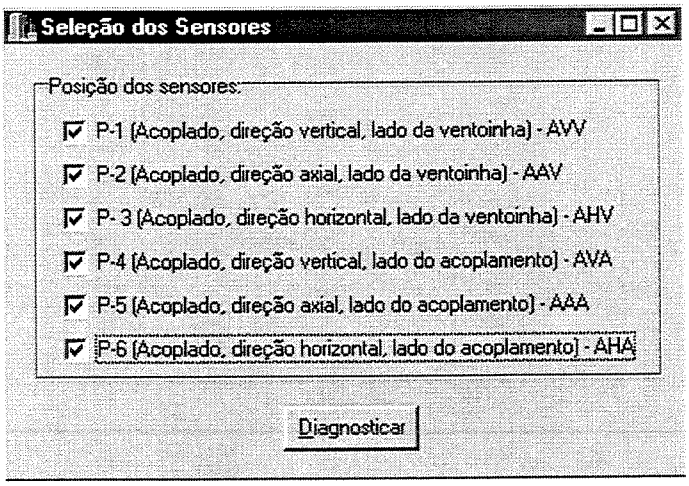


Figura 6.11 - Tela do módulo *Sistema Especialista.*

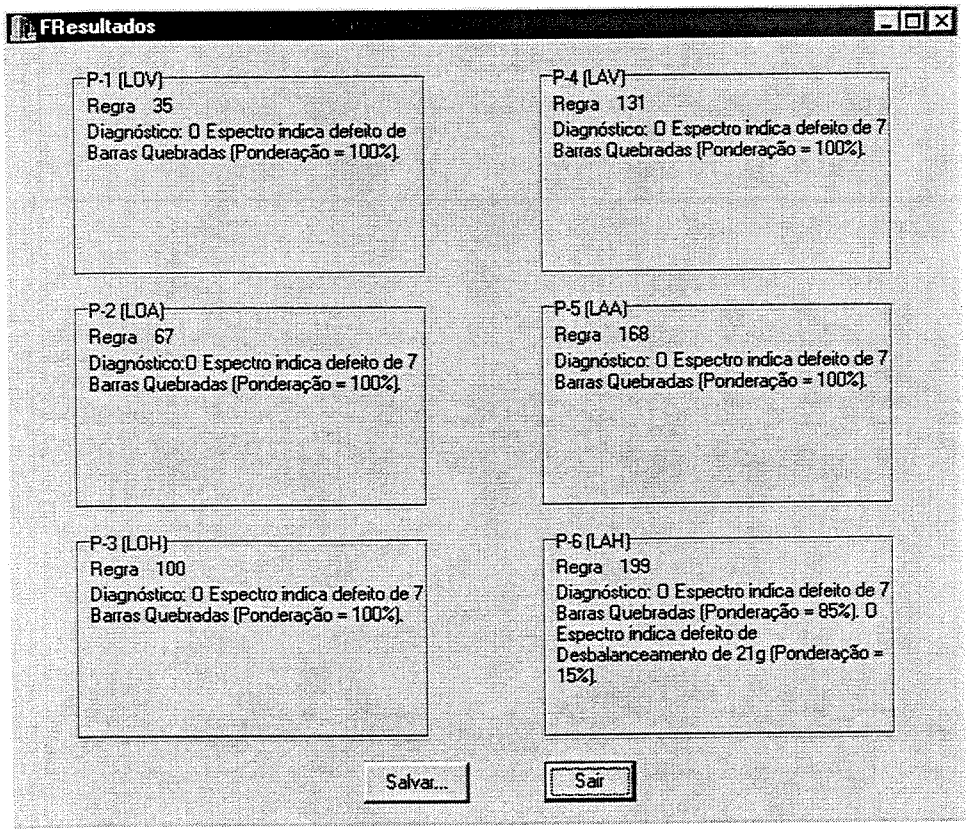


Figura 6.12 - Tela da resposta do *Sistema Especialista* para o arquivo *7bq_v_8.txt*.

6.3 Resultados do Sistema Híbrido *HY_NES*

As redes neurais foram treinadas através do aprendizado supervisionado. Neste processo de implementação da aprendizagem é necessário uma base de dados extremamente grande, uma vez que o treinamento se baseia em ensinar a rede a reconhecer padrões. Além disto, é necessário que esses dados sejam limpos, livres de ruídos e que contenham apenas dados relevantes ao estudo.

A entrada de dados é um ponto de extrema importância, influenciando na velocidade de convergência. Se a base de dados não for bem construída a rede neural pode apresentar problemas de convergência. Para isto, fez-se um planejamento detalhado dos procedimentos de testes, procurando minimizar ambigüidades e erros na coleta dos dados. Os testes foram realizados no Laboratório de Conversão de Energia da Funrei, conforme descrito no Capítulo IV.

Os dados coletados formaram a base de dados idealizada cobrindo amplamente o domínio do problema. Foram realizados, aleatoriamente, 50 séries de testes para cada uma das seguintes condições: condição normal de funcionamento do motor, excitações de origem mecânica (desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica) e excitações de origem elétrica (desequilíbrio de fase e barras quebradas).

Os dados coletados, normalmente são separados em duas categorias: dados de treinamento e dados de teste. Neste trabalho, eles foram divididos em três categorias: dados de *treinamento* utilizados para treinamento das redes neurais (2.160 espectros), dados de *validação* (validação intermediária) utilizados para verificação da desempenho das redes neurais (666 espectros) e dados para *validação do sistema híbrido* (validação final) utilizados para verificação da desempenho do sistema *HY_NES* (666 espectros).

De cada série de 10 testes separou-se, aleatoriamente, 6 para treinamento, 2 para validação intermediária e 2 para validação final. Este procedimento evita tendências associadas à ordem de apresentação dos dados.

Os espectros individuais de cada medição têm um número significativo de pontos (*3200*), sendo que a maioria não contém informações relevantes à falha em estudo. Uma entrada de dados

acima de 100 pontos torna difícil o treinamento da rede neural artificial. Através do filtro seletivo obteve-se uma redução de 99,72% dos dados originais. Com essa compactação, foram fornecidos às redes somente as freqüências e amplitudes determinísticas relacionadas às falhas estudadas, tornando possível o treinamento com arquiteturas menores e mais rápidas.

Visando o sistema híbrido, construiu-se uma rede neural para detectar cada uma das doze excitações, em cada uma das seis posições do sensor de medição, num total de setenta e duas redes, Figura 6.13. Este procedimento permite a formação de uma base de conhecimento para melhorar a confiabilidade dos resultados. Esta estrutura requer redes menores que são mais fáceis de serem treinadas.

Na fase de treinamento das redes neurais foram realizados vários testes visando à obtenção de uma arquitetura que apresentasse os melhores resultados. Para cada uma das redes foram testadas várias arquiteturas. Os testes iniciados com uma camada intermediária não atingiram os resultados desejados. Novos testes, com três camadas intermediárias, apresentaram os primeiros resultados satisfatórios. Na Tabela 6.1, tem-se os resultados correspondentes aos erros obtidos após uma semana de treinamento num computador Toshiba, *Satellite Pro 4600*, 850 MHz, 128 MB de memória *RAM*.

Tabela 6.1 - Testes para obtenção da melhor arquitetura.

Arquitetura das redes	*EQM* Treinamento Ann_Error	*EQM* Qualificação Ann_TesteError	Número de Iterações
3 x 3	4,23	11,81	21.630
3 x 3 x 3	3,96	8,47	17.020
3 x 5 x 3	4,38	9,93	10.504
3 x 5 x 8	4,95	9,47	9.456
5 x 10 x 5	5,29	11,52	4.425
5 x 5	4,74	10,71	12.654
5 x 5 x 5	4,53	11,29	9.406
8 x 3	4,49	9,59	10.678
8 x 3	4,85	10,76	8.771
8 x 5 x 3	3,57	7,85	8.067

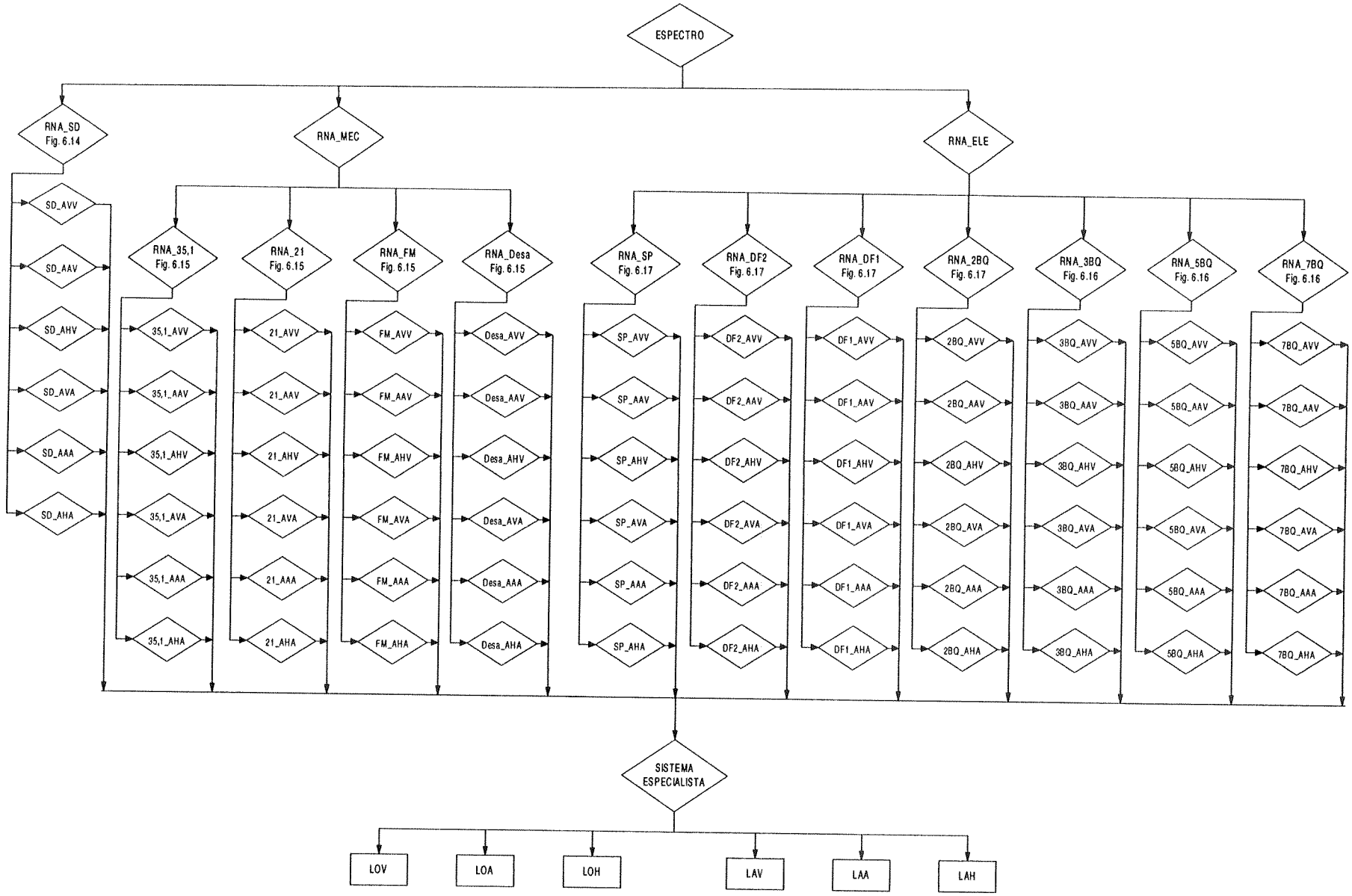


Figura 6.13 - Fluxograma do processo de diagnóstico.

O erro quadrático médio (*EQM*), é uma medida da distância entre os dados emitidos pela rede e idealizados pelo usuário. Este erro serve tanto para avaliar o treinamento quanto à qualificação da rede. Este erro é calculado pela Equação 7.3, onde n é o número de dados de treinamento ou de qualificação, y_l é a saída da rede e yd_l é a saída desejada, Oliveira (1999).

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^{n} (y_l - yd_l)^2 \tag{7.3}$$

Nas Figuras 6.14 e 6.15 têm-se, respectivamente, as estruturas utilizadas nos treinamentos das redes neurais artificiais para a condição normal de funcionamento e excitações de origem mecânica.

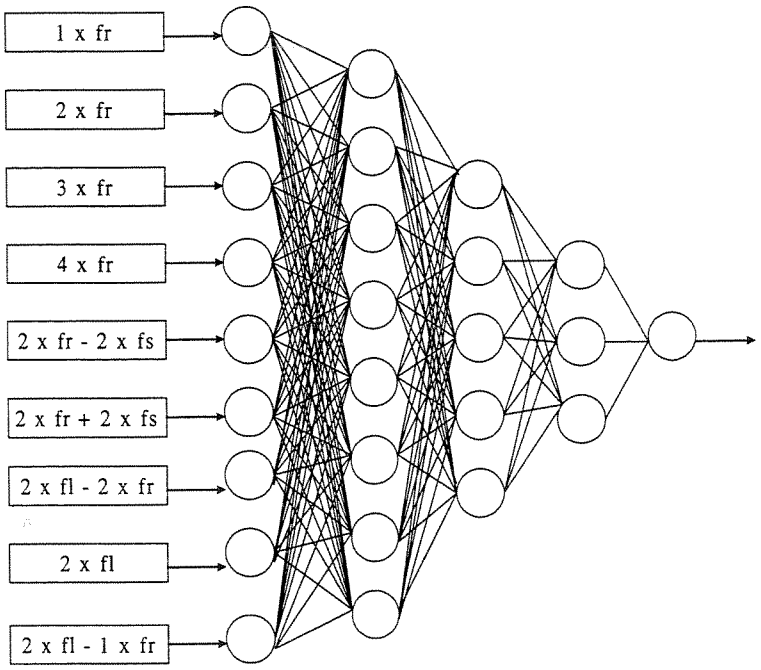


Figura 6.14 - Arquitetura da *RNA 8x5x3* para condição normal de funcionamento.

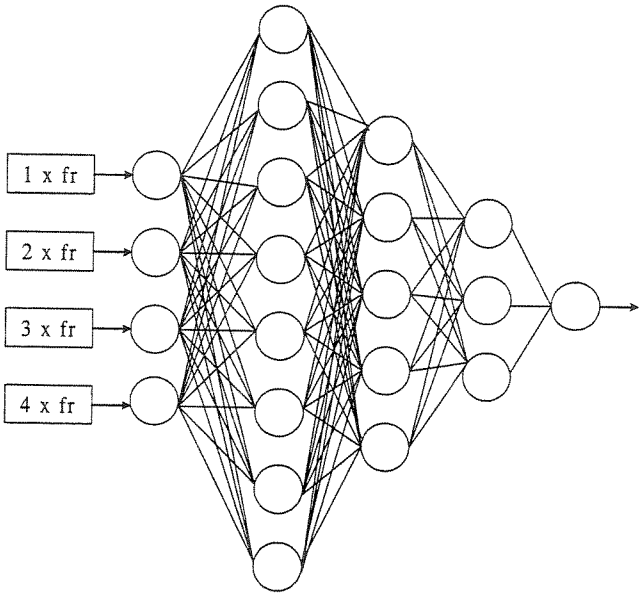


Figura 6.15 - Arquitetura da *RNA 8x5x3* para as excitações de origem mecânica.

Na Figura 6.16 têm-se as estruturas utilizadas nos treinamentos das redes neurais artificiais para as excitações de origem elétrica (3, 5 e 7 barras quebradas) e na Figura 6.17 para as excitações (2 barras quebradas, *single phase*, desbalanceamento de fase 200V e desbalanceamento de fase 210V).

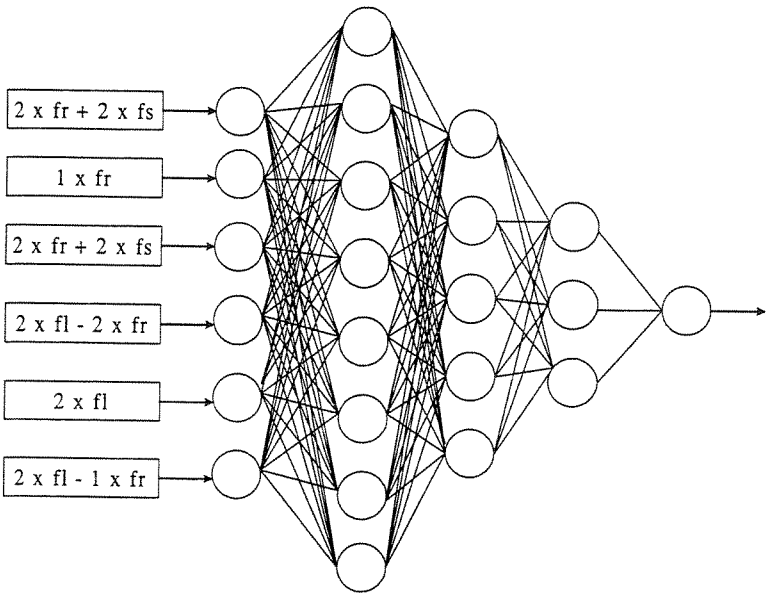


Figura 6.16 - Arquitetura da *RNA 8x5x3* para 3, 5 e 7 barras quebradas.

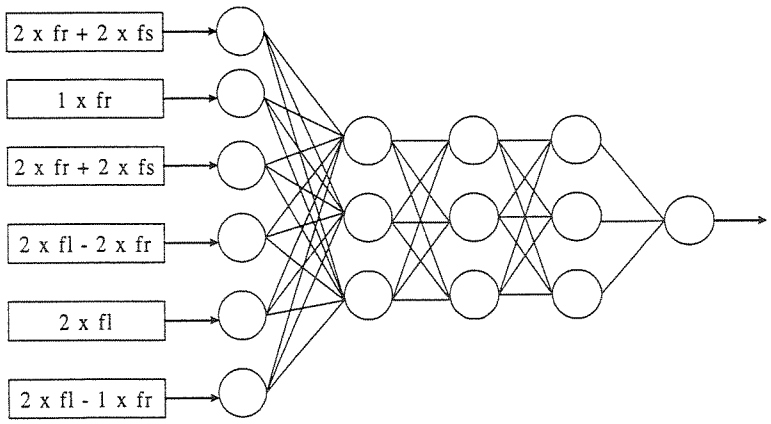


Figura 6.17 - Arquitetura da *RNA 3x3x3* para 2 barras quebradas, *single phase*, desbalanceamento de fase 200V e desbalanceamento de fase 210V.

As primeiras redes foram treinadas com arquiteturas *8x5x3* e erros de treinamento 1%. Através do acompanhamento diário dos treinamentos e analisando os resultados das redes neurais treinadas, percebeu-se que baixos valores para erro de treinamento não necessariamente levava a melhores resultados. Passou-se a variar este valor aproximadamente até 4%, sendo também usada a arquitetura *3x3x3*, diminuindo o tempo de treinamento.

6.3.1 Respostas do Sistema *HY_NES* para os dados de treinamento e validação intermediária

6.3.1.1 Resposta para identificação da condição normal de funcionamento

Na Tabela 6.2 tem-se os valores do erro quadrático médio (*EQM*) dos treinamentos e qualificação das redes neurais artificiais para a condição normal de funcionamento nas seis posições dos sensores. A arquitetura e as entradas desta rede são mostradas na Figura 6.14.

Os valores do *EQM* para os seis sensores mostram que as redes neurais reconheceram os dados reservados para qualificação, com índices de erros inferiores a 10%. Os sensores *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha) e *P-6* (*AHA* - acoplado, direção horizontal, lado do acoplamento) apresentaram os melhores resultados, com os índices de qualificação praticamente iguais aos de treinamento.

Tabela 6.2 - *EQM* de treinamento e qualificação - condição normal de funcionamento.

Defeito	Posição	*EQM* Treinamento Ann_Error [%]	*EQM* Qualificação Ann_TesteError [%]	Número de Iterações
Sem defeito 8x5x3	P-1	4,44	5,90	23.865
	P-2	4,00	8,41	29.084
	P-3	4,00	4,16	1.091
	P-4	4,00	7,56	37.887
	P-5	4,00	5,93	7.911
	P-6	4,00	4,16	1.091

Na Tabela 6.3 tem-se o percentual de acerto para as respostas das doze redes neurais. No caso da condição normal de funcionamento, *acerto* é quando a rede neural tem saída $P<0,5$ na rede sem defeito e $P>0,5$ para as demais redes. Exemplificando-se, a rede sem defeito apresentou 100% de acerto para o sensor *P-3* e a rede *single phase* 100% em todos os sensores.

Tabela 6.3 - Desempenho das regras - condição normal de funcionamento.

Sem Defeito		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		75	50	100	87,5	62,5	87,5
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	100	100	87,5	100	100	100
	35,1g	100	100	100	87,5	100	100
	21g	100	87,5	100	87,5	100	100
	Desali.	100	100	100	100	100	100
Rede *elétricos*	*SP*	100	100	100	100	100	100
	DF_2	100	87,5	100	100	100	100
	DF_1	100	100	100	100	87,5	100
	2 BQ	87,5	100	100	62,5	62,5	87,5
	3 BQ	75	75	100	75	100	87,5
	5 BQ	100	100	100	100	100	100
	7 BQ	75	100	62,5	87,5	100	12,5

Na Figura 6.18 tem-se o resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_SemDefeito_V2*. Devido a aplicação prática, os espectros foram passados em todas as redes neurais e tanto a capacidade de acerto do diagnóstico como a rejeição, são considerados na taxa de acerto.

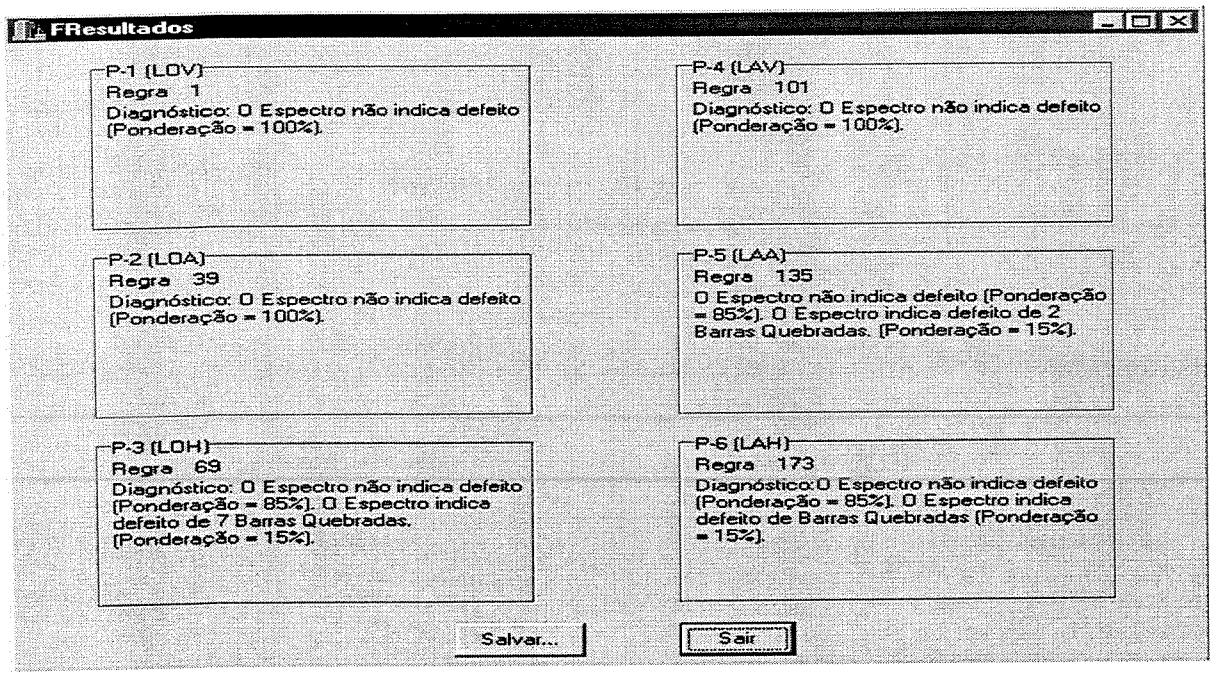


Figura 6.18 - Resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_SemDef_V2*.

Na Tabela 6.4 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. Os sensores *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha) e *P-6* (*AHA* - acoplado, direção horizontal, lado do acoplamento) foram os que tiveram melhor desempenho com 100% e 87,5 % de acerto, respectivamente.

A classificação *falha diagnosticada*, significa que a excitação foi diagnosticada corretamente. A classificação *falha não diagnosticada*, significa que foi diagnosticada uma excitação diferente da testada. A classificação *diagnóstico indefinido*, significa que a análise é não conclusiva, ou seja, que nenhuma regra foi capaz de identificar a excitação.

Tabela 6.4 - Desempenho das regras - condição normal de funcionamento.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	75	12,5	12,5
P-2	50	25	25
P-3	100	-	-
P-4	75	-	25
P-5	75	12,5	12,5
P-6	87,5	-	12,5

6.3.1.2 Resposta para identificação da excitação devido à folga mecânica

Na Tabela 6.5 tem-se os valores do erro quadrático médio dos treinamentos e qualificação das redes neurais artificiais para a excitação devido à folga mecânica nas seis posições dos sensores. A arquitetura e as entradas desta rede são mostradas na Figura 6.15.

Tabela 6.5 - *EQM* de treinamento e qualificação - folga mecânica.

Defeito	Posição	*EQM* Treinamento Ann_Error [%]	*EQM* Qualificação Ann_TesteError [%]	Número de Iterações
Folga Mecânica *8x5x3*	P-1	1,72	17,72	200.219
	P-2	1,00	8,43	176.437
	P-3	1,00	23,32	113.812
	P-4	1,00	10,11	12.390
	P-5	1,00	9,87	69.438
	P-6	1,00	22,30	79.175

Os valores do *EQM* para os seis sensores mostram que as redes neurais reconheceram os dados reservados para qualificação, com índices de erros inferiores a 24%. Os sensores *P-2* (*AAV* - acoplado, direção axial, lado da ventoinha) e *P-5* (*AAA* - acoplado, direção axial, lado do acoplamento) apresentaram os melhores resultados, com os índices de qualificação inferiores a 10%.

Na Tabela 6.6 tem-se o percentual de acerto para as respostas das doze redes neurais para a excitação devido à folga mecânica. Na Figura 6.19 tem-se o resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_FolMec_V7*.

Tabela 6.6 - Resposta das redes neurais - folga mecânica.

Folga Mecânica		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		87,5	75	87,5	87,5	87,5	100
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	62,5	62,5	50	75	100	62,5
	35,1g	100	87,5	75	87,5	100	87,5
	21g	100	100	75	100	87,5	87,5
	Desali.	100	100	100	100	100	100
Rede *elétricos*	*SP*	100	100	100	100	100	100
	DF2	50	100	75	100	100	100
	DF1	100	100	100	100	100	100
	2 BQ	100	87,5	87,5	75	12,5	100
	3 BQ	100	100	100	100	100	100
	5 BQ	100	100	62,5	100	87,5	75
	7 BQ	87,5	100	100	12,5	100	100

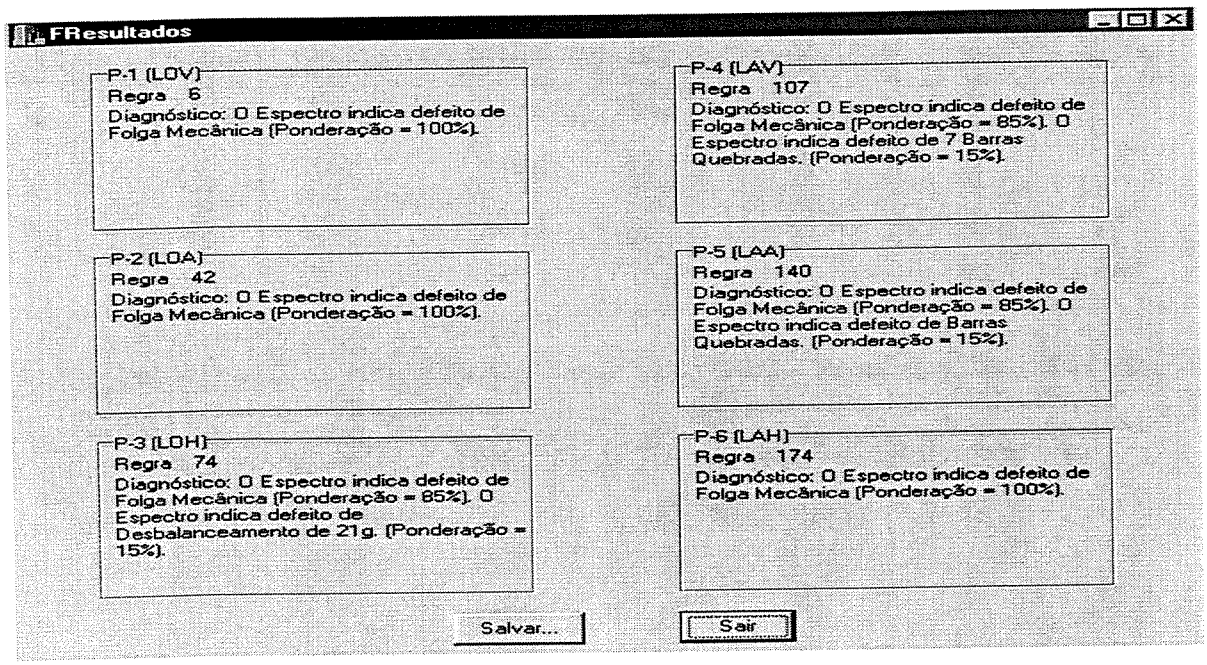


Figura 6.19 - Resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_FolMec_V7*.

Na Tabela 6.7 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. O sensor *P-5* (*AAA* - acoplado, direção axial, lado do acoplamento) foi o que teve melhor desempenho, com 100% de acerto.

Tabela 6.7 - Desempenho das regras - folga mecânica.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	75	-	25
P-2	50	12,5	37,5
P-3	50	12,5	37,5
P-4	75	-	25
P-5	100	-	-
P-6	62,5	25	12,5

6.3.1.3 Resposta para identificação da excitação devido ao desbalanceamento 35,1g

Na Tabela 6.8 tem-se os valores do erro quadrático médio dos treinamentos e qualificação das redes neurais artificiais para a excitação devido ao desbalanceamento 35,1g nas seis posições dos sensores. A arquitetura e as entradas desta rede são mostradas na Figura 6.15.

Tabela 6.8 - *EQM* de treinamento e qualificação - desbalanceamento 35,1g.

Defeito	Posição	*EQM* Treinamento Ann_Error [%]	*EQM* Qualificação Ann_TesteError [%]	Número de Iterações
Desbalanceamento 35,1g 8x5x3	P-1	1,00	7,28	698.719
	P-2	1,00	4,19	106.221
	P-3	1,00	6,77	461.892
	P-4	1,00	2,00	297.130
	P-5	1,00	5,95	313.751
	P-6	1,00	4,69	51.829

Os valores do *EQM* para os seis sensores mostram que as redes neurais reconheceram os dados reservados para qualificação, com índices de erros inferiores a 8%. O sensor *P-2* (*AAV* - acoplado, direção axial, lado da ventoinha) apresentou o melhor resultado, com índice de qualificação 2%.

Na Tabela 6.9 tem-se o percentual de acerto para as respostas das doze redes neurais para a excitação devido ao desbalanceamento 35,1g.

Tabela 6.9 - Resposta das redes neurais - desbalanceamento 35,1g.

Desb. 35,1g		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		100	87,5	100	100	87,5	100
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	100	100	100	87,5	100	100
	35,1g	87,5	87,5	100	100	87,5	100
	21g	100	100	100	100	87,5	100
	Desali.	100	100	100	100	100	100
Rede *elétricos*	*SP*	100	100	100	100	100	100
	DF2	0	87,5	100	100	100	100
	DF1	100	100	100	100	100	100
	2 BQ	100	100	100	100	0	100
	3 BQ	100	100	100	100	100	100
	5 BQ	100	100	100	100	100	100
	7 BQ	100	100	100	12,5	100	100

Na Figura 6.20 tem-se o resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ Desb35,1g _V7*. As redes correspondentes aos sensores *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha) e *P-6* (*AHA* - acoplado, direção horizontal, lado do acoplamento), tiveram 100% de acerto.

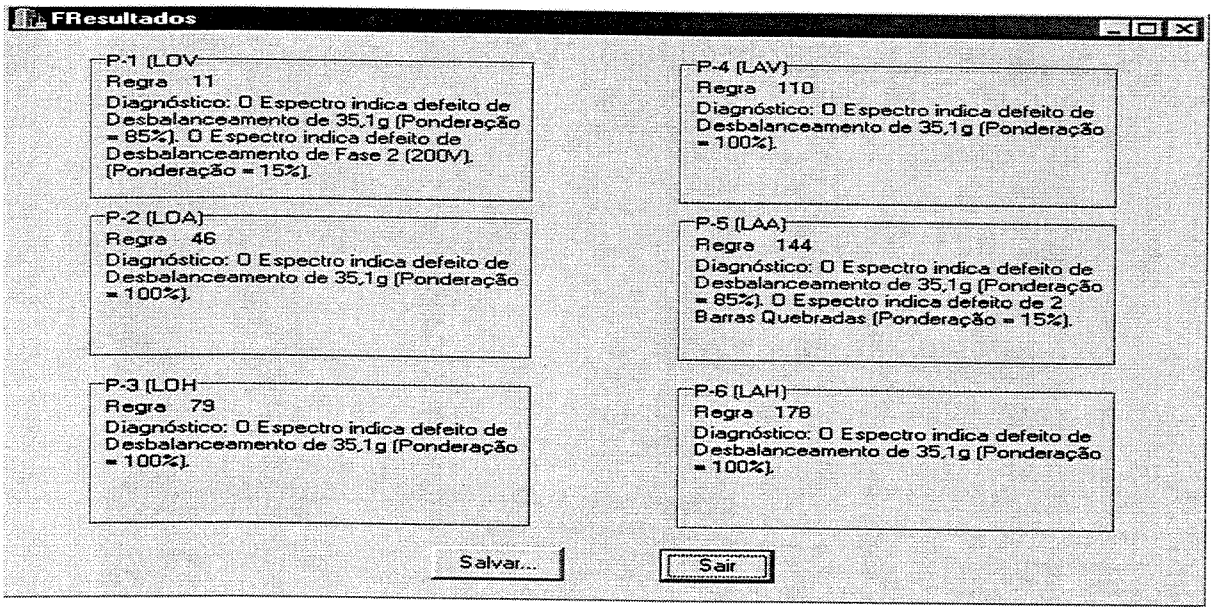


Figura 6.20 - Resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_Desb35,1g_V7.*

Na Tabela 6.10 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. Os sensores *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha), *P-4* (*AVA* - acoplado, direção vertical, lado do acoplamento) e *P-6* (*AHA* - acoplado, direção horizontal, lado do acoplamento) foram os que tiveram melhor desempenho, com 100% de acerto.

Tabela 6.10 - Desempenho das regras - desbalanceamento 35,1g.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	87,5	-	12,5
P-2	87,5	-	12,5
P-3	100	-	-
P-4	100	-	-
P-5	87,5	-	12,5
P-6	100	-	-

6.3.1.4 Resposta para identificação da excitação devido ao desbalanceamento 21g

Na Tabela 6.11 tem-se os valores do erro quadrático médio dos treinamentos e qualificação das redes neurais artificiais para a excitação devido ao desbalanceamento 21g nas seis posições dos sensores. A arquitetura e as entradas desta rede são mostradas na Figura 6.15.

Tabela 6.11 - *EQM* de treinamento e qualificação - desbalanceamento 21g.

Defeito	Posição	*EQM* Treinamento Ann_Error [%]	*EQM* Qualificação Ann_TesteError [%]	Número de Iterações
Desbalanceamento 21g 8x5x3	P-1	4,00	2,70	568
	P-2	1,70	4,75	237.198
	P-3	1,00	6,30	16.045
	P-4	4,00	10,61	66.804
	P-5	1,00	10,31	95.499
	P-6	4,00	11,08	16.483

Os valores do *EQM* para os seis sensores mostram que as redes neurais reconheceram os dados reservados para qualificação, com índices de erros inferiores a 8%. Os sensores e *P-1* (*AVV* - acoplado, direção vertical, lado da ventoinha) e *P-2* (*AAV* - acoplado, direção axial, lado da ventoinha) apresentaram os melhores resultados, com índice de qualificação inferiores a 5%.

Na Tabela 6.12 tem-se o percentual de acerto para as respostas das doze redes neurais para a excitação devido ao desbalanceamento 21g.

Na Figura 6.21 tem-se o resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ Desb21g _V5*.

Tabela 6.12 - Resposta das redes neurais - desbalanceamento 21g.

Desb. 21g		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		100	75	100	87,5	100	100
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	75	100	100	100	100	100
	35,1g	87,5	100	87,5	100	87,5	87,5
	21g	87,5	75	87,5	62,5	37,5	75
	Desali.	100	100	100	100	100	100
Rede *elétricos*	*SP*	100	100	100	100	100	100
	DF2	25	100	100	100	87,5	100
	DF1	100	100	100	100	87,5	100
	2 BQ	100	100	100	87,5	25	62,5
	3 BQ	100	100	100	100	100	100
	5 BQ	100	100	100	100	87,5	87,5
	7 BQ	100	100	100	75	100	100

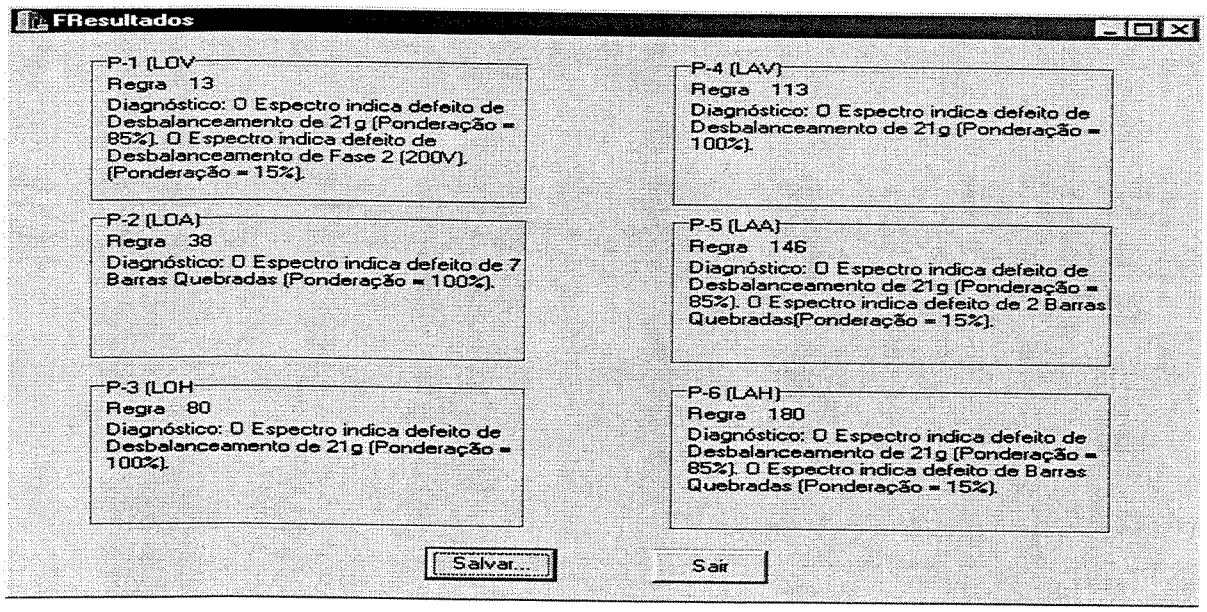


Figura 6.21 - Resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_Desb21g_V5*.

Na Tabela 6.13 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. O sensor *P-1* (*AVV* - acoplado, direção vertical, lado da ventoinha) foi o que teve melhor desempenho, com 100% de acerto.

Tabela 6.13 - Desempenho das regras - desbalanceamento 21g.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	100	-	-
P-2	37,5	12,5	50
P-3	87,5	12,5	-
P-4	62,5	25	12,5
P-5	37,5	-	62,5
P-6	87,5	12,5	-

6.3.1.5 Resposta para identificação da excitação devido ao desalinhamento

Na Tabela 6.14 tem-se os valores do erro quadrático médio dos treinamentos e qualificação das redes neurais artificiais, para a excitação devido ao desalinhamento, nas seis posições dos sensores. A arquitetura e as entradas desta rede são mostradas na Figura 6.15.

Tabela 6.14 - *EQM* de treinamento e qualificação - desalinhamento.

Defeito	Posição	*EQM* Treinamento Ann_Error [%]	*EQM* Qualificação Ann_TesteError [%]	Número de Iterações
Desalinhamento *8x5x3*	P-1	1,00	13,84	36.025
	P-2	1,00	5,19	52.590
	P-3	1,00	3,04	67.990
	P-4	1,00	6,14	48.957
	P-5	1,00	5,11	91.476
	P-6	1,00	5,61	9.913

Os valores do *EQM* para os seis sensores mostram que as redes neurais reconheceram os dados reservados para qualificação, com índices de erros inferiores a 14%. O sensor *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha) apresentou o melhor resultado, com índice de qualificação de 3%.

Na Tabela 6.15 tem-se o percentual de acerto para as respostas das doze redes neurais para a excitação devido ao desalinhamento.

Tabela 6.15 - Resposta das redes neurais - desalinhamento.

Desalinhamento		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		87,5	75	75	75	87,5	75
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	87,5	100	100	100	100	100
	35,1g	100	100	100	100	100	100
	21g	100	100	100	100	100	100
	Desali.	87,5	62,5	100	62,5	100	87,5
Rede *elétricos*	*SP*	100	100	100	100	100	100
	DF2	100	75	100	100	100	100
	DF1	100	100	100	100	87,5	100
	2 BQ	87,5	100	100	87,5	100	100
	3 BQ	87,5	75	100	100	62,5	100
	5 BQ	100	100	100	100	100	100
	7 BQ	87,5	100	100	100	75	100

Na Figura 6.22 tem-se o resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ Desali _V7*.

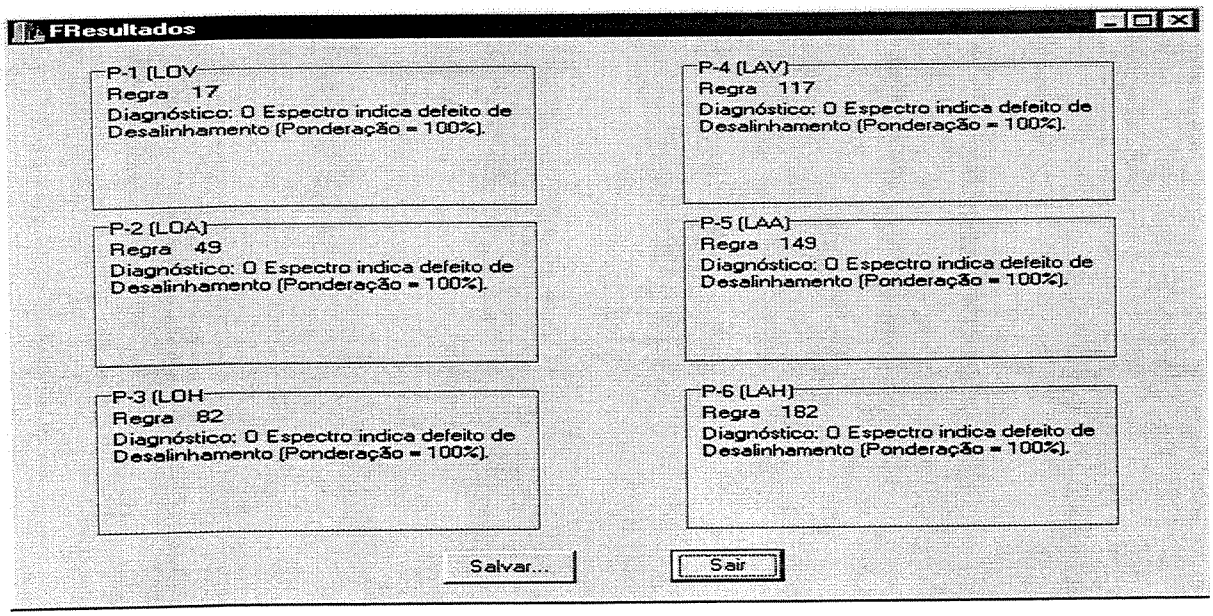


Figura 6.22 - Resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_Desali_V7*.

Na Tabela 6.16 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. Os sensores *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha), *P-4* (*AVA* - acoplado, direção vertical, lado do acoplamento) e *P-5* (*AAA* - acoplado, direção axial, lado do acoplamento) foram os que tiveram melhor desempenho, com 100% de acerto.

Tabela 6.16 - Desempenho das regras - desalinhamento.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	87,5	12,5	-
P-2	62,5	-	37,5
P-3	100	-	-
P-4	62,5	37,5	-
P-5	100	-	-
P-6	87,5	12,5	-

6.3.1.6 Resposta para identificação da excitação devido ao *single phase*

Na Tabela 6.17 tem-se os valores do erro quadrático médio dos treinamentos e qualificação das redes neurais artificiais para a excitação devido ao *single phase* nas seis posições dos sensores. A arquitetura e as entradas desta rede são mostradas na Figura 6.17.

Tabela 6.17 - *EQM* de treinamento e qualificação - *single phase*.

Defeito	Posição	*EQM* Treinamento Ann_Error [%]	*EQM* Qualificação Ann_TesteError [%]	Número de Iterações
Single phase 3x3x3	P-1	4,00	2,88	677
	P-2	4,00	3,99	145
	P-3	4,06	4,16	216
	P-4	4,00	2,86	214
	P-5	4,23	3,12	278
	P-6	4,08	4,07	267

Os valores do *EQM* para os seis sensores mostram que as redes neurais reconheceram os dados reservados para qualificação, com índices inferiores a 5%. Os sensores e *P-1* (*AVV* - acoplado, direção vertical, lado da ventoinha) e *P-4* (*AVA* - acoplado, direção vertical, lado do acoplamento) apresentaram os melhores resultados, com índice de qualificação inferiores a 3%.

Na Tabela 6.18 tem-se o percentual de acerto para as respostas das doze redes neurais para a excitação devido ao *single phase*.

Na Figura 6.23 tem-se o resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ SP_V7*.

Tabela 6.18 - Resposta das redes neurais - *single phase*.

Single phase		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		75	50	0	37,5	37,5	100
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	100	75	50	87,5	75	75
	35,1g	100	100	100	100	87,5	100
	21g	100	100	100	100	100	100
	Desali.	75	62,5	100	87,5	75	87,5
Rede *elétricos*	*SP*	87,5	100	87,5	100	100	100
	DF2	100	100	100	100	100	100
	DF1	100	100	100	100	87,5	87,5
	2 BQ	100	100	100	100	100	100
	3 BQ	100	100	100	100	100	100
	5 BQ	100	100	100	100	100	100
	7 BQ	100	100	100	100	100	100

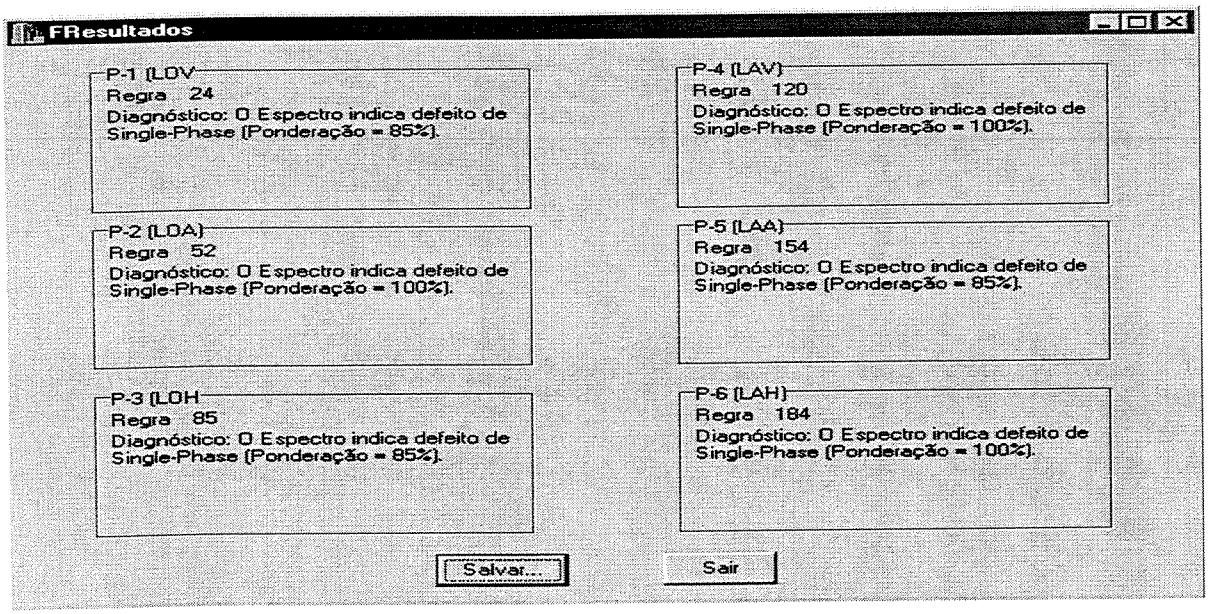


Figura 6.23 - Resultado do *Sistema Especialista* para os testes de qualificação *SE_SP_V7*.

Na Tabela 6.19 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. O sensor *P-2* (*AAV* - acoplado, direção axial, lado da ventoinha) foi o que teve melhor desempenho, com 100% de acerto.

Tabela 6.19 - Desempenho das regras - *single phase*.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	87,5	-	12,5
P-2	100	-	-
P-3	87,5	-	12,5
P-4	87,5	-	12,5
P-5	87,5	-	12,5
P-6	62,5	12,5	12,5

6.3.1.7 Resposta para identificação da excitação devido ao desbalanceamento de fase DF_2

Na Tabela 6.20 tem-se os valores do erro quadrático médio dos treinamentos e qualificação das redes neurais artificiais para a excitação devido ao desbalanceamento de fase DF_2 nas seis posições dos sensores. A arquitetura e as entradas desta rede são mostradas na Figura 6.17.

Tabela 6.20 - *EQM* de treinamento e qualificação - desbalanceamento de fase DF_2.

Defeito	Posição	*EQM* Treinamento Ann_Error [%]	*EQM* Qualificação Ann_TesteError [%]	Número de Iterações
Desb. Fase 2 (200V) 3x3x3	P-1	4,00	8,81	21.558
	P-2	4,00	15,00	48.386
	P-3	4,00	4,18	12.927
	P-4	4,00	8,21	116.222
	P-5	4,00	9,44	79.917
	P-6	4,00	4,94	53.954

Os valores do *EQM* para os seis sensores mostram que as redes neurais reconheceram os dados reservados para qualificação, com índices de erros inferiores a 15%. Os sensores *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha) e *P-6* (*AHA* - acoplado, direção horizontal, lado do acoplamento) apresentaram os melhores resultados, com índice de qualificação inferiores a 5%.

Na Tabela 6.21 tem-se o percentual de acerto para as respostas das doze redes neurais para a excitação devido ao desbalanceamento de fase DF_2. Na Figura 6.24 tem-se o resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ DF_2_V4*.

Tabela 6.21 - Resposta das redes neurais - desbalanceamento de fase DF_2.

Desb. Fase 2		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		25	87,5	12,5	12,5	12,5	100
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	87,5	100	87,5	87,5	100	87,5
	35,1g	100	100	100	100	100	100
	21g	100	100	100	100	100	100
	Desali.	100	87,5	100	100	100	100
Rede *elétricos*	*SP*	100	87,5	100	100	100	100
	DF2	62,5	37,5	75	0	62,5	0
	DF1	75	100	75	75	62,5	75
	2 BQ	100	100	100	100	100	100
	3 BQ	100	100	100	100	100	100
	5 BQ	100	100	100	100	100	100
	7 BQ	100	100	100	100	100	100

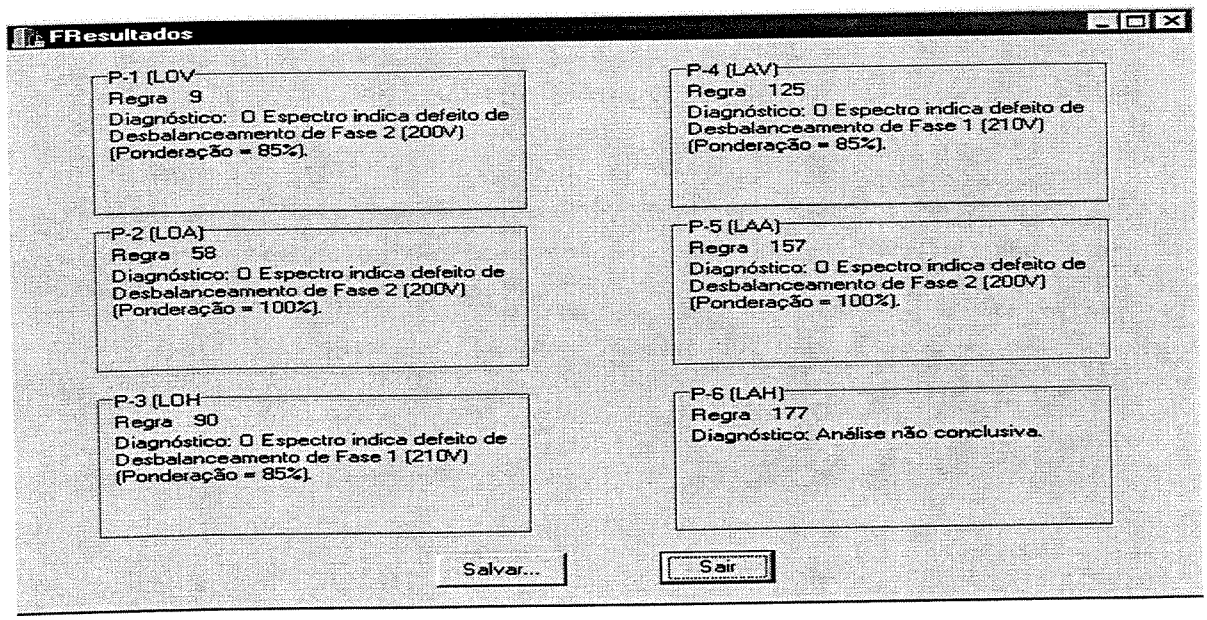


Figura 6.24 - Resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ DF_2_V4*.

Na Tabela 6.22 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. O sensor *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha) foi o que teve melhor desempenho, com 100% de acerto.

Tabela 6.22 - Desempenho das regras - desbalanceamento de fase DF_2.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	87,5	-	12,5
P-2	50	25	25
P-3	100	-	-
P-4	25	-	75
P-5	75	12,5	12,5
P-6	25	50	25

6.3.1.8 Resposta para identificação da excitação devido ao desbalanceamento de fase DF_1

Na Tabela 6.23 tem-se os valores do erro quadrático médio dos treinamentos e qualificação das redes neurais artificiais para a excitação devido ao desbalanceamento de fase DF_1 nas seis posições dos sensores. A arquitetura e as entradas desta rede são mostradas na Figura 6.17.

Tabela 6.23 - *EQM* de treinamento e qualificação - desbalanceamento de fase DF_1.

Defeito	Posição	*EQM* Treinamento Ann_Error [%]	*EQM* Qualificação Ann_TesteError [%]	Número de Iterações
Desb. Fase 1 (210V) *3x3x3*	P-1	4,00	7,19	83.821
	P-2	4,00	10,16	280.271
	P-3	4,00	5,63	79.910
	P-4	4,00	7,45	23.205
	P-5	4,00	10,94	73.924
	P-6	4,00	6,64	74.134

Os valores do *EQM* para os seis sensores mostram que as redes neurais reconheceram os dados reservados para qualificação, com índices de erros inferiores a 11%. Os sensores *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha) e *P-6* (*AHA* - acoplado, direção horizontal, lado do acoplamento) apresentaram os melhores resultados, com índice de qualificação inferiores a 7%.

Na Tabela 6.24 tem-se o percentual de acerto para as respostas das doze redes neurais para a excitação devido ao desbalanceamento de fase DF_1.

Tabela 6.24 - Resposta das redes neurais - desbalanceamento de fase DF_1.

Desb. Fase 1		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		62,5	-	0	25	50	-
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	87,5	100	87,5	87,5	100	100
	35,1g	100	100	100	100	100	100
	21g	100	100	100	100	87,5	100
	Desali.	87,5	87,5	100	100	100	87,5
Rede *elétricos*	*SP*	87,5	100	100	100	100	100
	DF2	87,5	75	75	100	62,5	100
	DF1	50	12,5	62,5	75	50	75
	2 BQ	62,5	75	100	100	100	100
	3 BQ	100	100	100	100	100	100
	5 BQ	100	100	100	100	100	100
	7 BQ	100	100	100	100	100	100

Na Figura 6.25 tem-se o resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ DF_1_V4*.

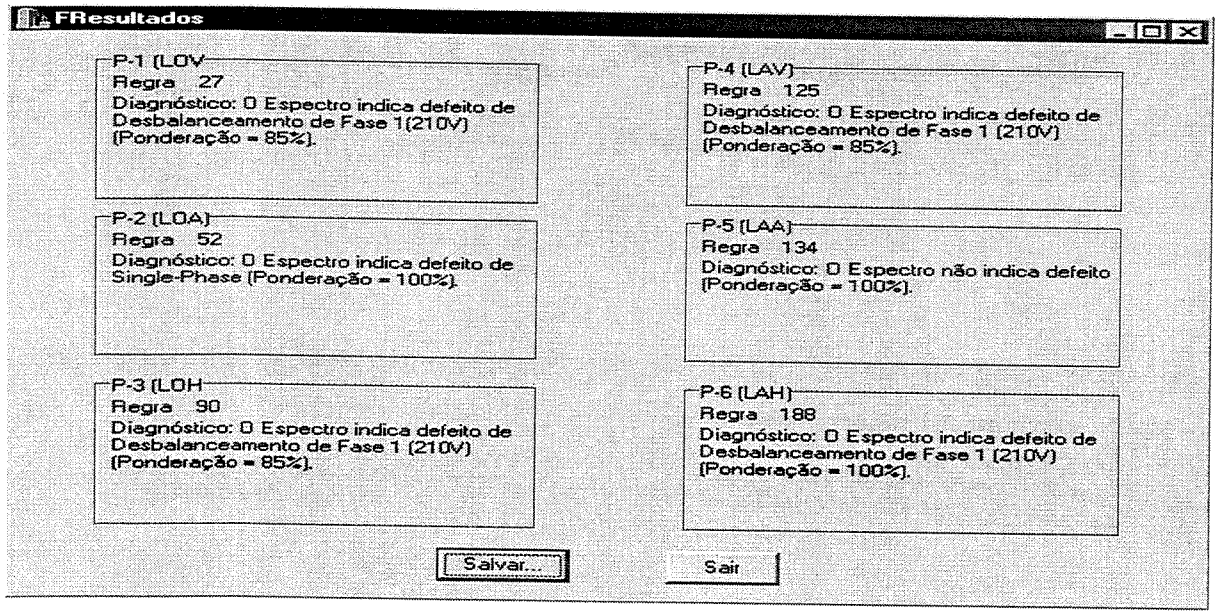


Figura 6.25 - Resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ DF_1_V4*.

Na Tabela 6.25 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. O sensor *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha) foi o que teve melhor desempenho, com 85% de acerto.

Tabela 6.25 - Desempenho das regras - desbalanceamento de fase DF_1.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	50	-	50
P-2	37,5	37,5	25
P-3	87,5	-	12,5
P-4	62,5	12,5	25
P-5	62,5	-	37,5
P-6	75	25	-

6.3.1.9 Resposta para identificação da excitação devido a 2 barras quebradas

Na Tabela 6.26 tem-se os valores do erro quadrático médio dos treinamentos e qualificação das redes neurais artificiais para a excitação devido a 2 barras quebradas nas seis posições dos sensores. A arquitetura e as entradas desta rede são mostradas na Figura 6.17.

Tabela 6.26 - *EQM* de treinamento e qualificação - 2 barras quebradas.

Defeito	Posição	*EQM* Treinamento Ann_Error [%]	*EQM* Qualificação Ann_TesteError [%]	Número de Iterações
2 barras quebradas *3x3x3*	P-1	4,00	13,41	33.245
	P-2	4,00	4,55	1.959
	P-3	4,00	3,75	6.579
	P-4	4,00	9,89	27.128
	P-5	4,00	4,51	4.565
	P-6	4,00	4,22	4.283

Os valores do *EQM* para os seis sensores mostram que as redes neurais reconheceram os dados reservados para qualificação, com índices de erros inferiores a 14%. Os sensores *P-2* (*AAV* - acoplado, direção axial, lado da ventoinha), *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha), *P-6* (*AHA* - acoplado, direção horizontal, lado do acoplamento) apresentaram os melhores resultados, com índice de qualificação inferiores a 7%. Na Tabela 6.27 tem-se o percentual de acerto para as respostas das doze redes neurais para a excitação devido a 2 BQ.

Tabela 6.27 - Resposta das redes neurais - 2 barras quebradas.

2 BQ		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		87,5	87,5	37,5	50	50	87,5
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	100	50	87,5	100	50	100
	35,1g	100	100	100	100	100	100
	21g	100	100	100	100	100	62,5
	Desali.	87,5	100	100	100	100	100
Rede *elétricos*	*SP*	100	100	100	100	100	100
	DF2	100	100	100	100	100	100
	DF1	100	100	100	100	100	100
	2 BQ	62,5	50	87,5	75	50	50
	3 BQ	87,5	62,5	75	100	75	87,5
	5 BQ	62,5	87,5	100	100	100	100
	7 BQ	100	100	100	100	100	100

Na Figura 6.26 tem-se o resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ 2BQ_V1*.

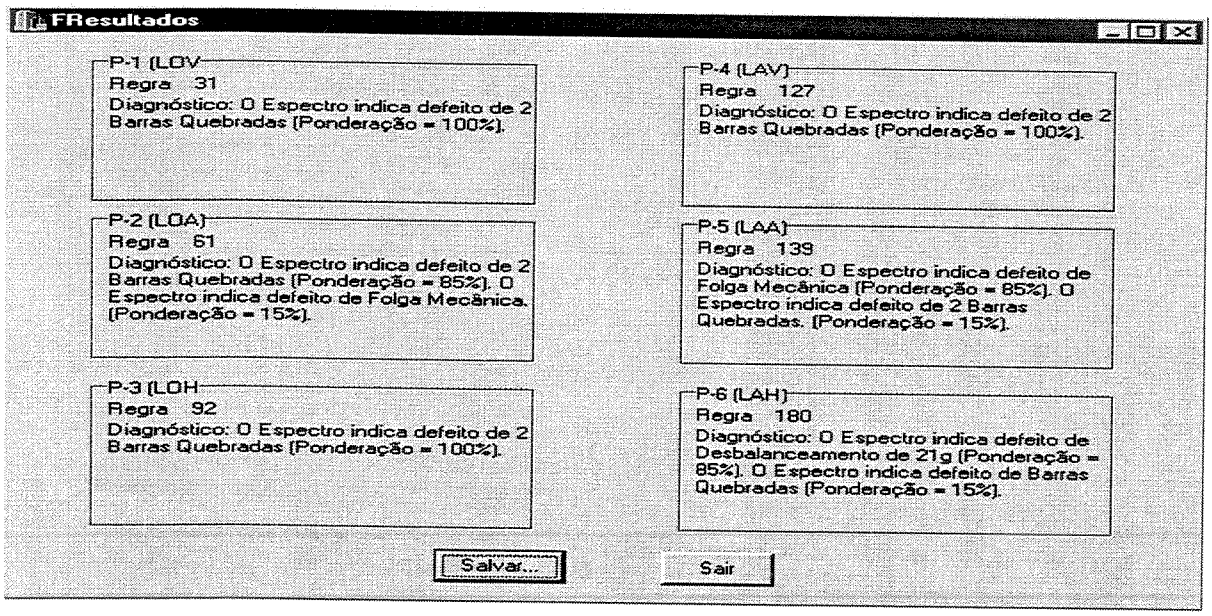


Figura 6.26 - Resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ 2BQ_V1*.

Na Tabela 6.28 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. Os sensores *P-1* (*AVV* - acoplado, direção vertical, lado da ventoinha), *P-2* (*AAV* - acoplado, direção axial, lado da ventoinha) e *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha) foram os que tiveram melhor desempenho, com 85% de acerto.

Tabela 6.28 - Desempenho das regras - 2 barras quebradas.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	87,5	-	12,5
P-2	87,5	12,5	-
P-3	87,5	-	12,5
P-4	75	-	25
P-5	75	-	25
P-6	62,5	25	12,5

6.3.1.10 Resposta para identificação da excitação devido a 3 barras quebradas

Na Tabela 6.29 tem-se os valores do erro quadrático médio dos treinamentos e qualificação das redes neurais artificiais para a excitação devido a 3 barras quebradas nas seis posições dos sensores. A arquitetura e as entradas desta rede são mostradas na Figura 6.16.

Tabela 6.29 - *EQM* de treinamento e qualificação - 3 barras quebradas.

Defeito	Posição	*EQM* Treinamento Ann_Error [%]	*EQM* Qualificação Ann_TesteError [%]	Número de Iterações
3 barras quebradas 8x5x3	P-1	4,00	8,18	175.246
	P-2	4,00	7,29	197.466
	P-3	4,00	4,71	311.792
	P-4	5,02	4,52	90.854
	P-5	4,00	8,51	279.080
	P-6	5,97	5,77	270.094

Os valores do *EQM* para os seis sensores mostram que as redes neurais reconheceram os dados reservados para qualificação, com índices de erros inferiores a 9%.

Os sensores *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha), *P-4* (*AVA* - acoplado, direção vertical, lado do acoplamento) apresentaram os melhores resultados, com índice de qualificação inferiores a 5%.

Na Tabela 6.30 tem-se o percentual de acerto para as respostas das doze redes neurais para a excitação devido a 3 barras quebradas.

Na Figura 6.27 tem-se o resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ 3BQ_V3*.

Tabela 6.30 - Resposta das redes neurais - 3 barras quebradas.

3 BQ		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		100	100	37,5	12,5	12,5	100
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	100	100	100	100	100	100
	35,1g	100	100	100	100	100	100
	21g	100	100	100	100	100	12,5
	Desali.	100	100	100	100	100	87,5
Rede *elétricos*	*SP*	100	100	100	100	100	100
	DF2	100	100	100	100	100	100
	DF1	100	100	100	100	100	100
	2 BQ	100	87,5	87,5	50	100	100
	3 BQ	50	62,5	87,5	0	75	62,5
	5 BQ	100	100	100	100	100	100
	7 BQ	100	100	100	100	100	100

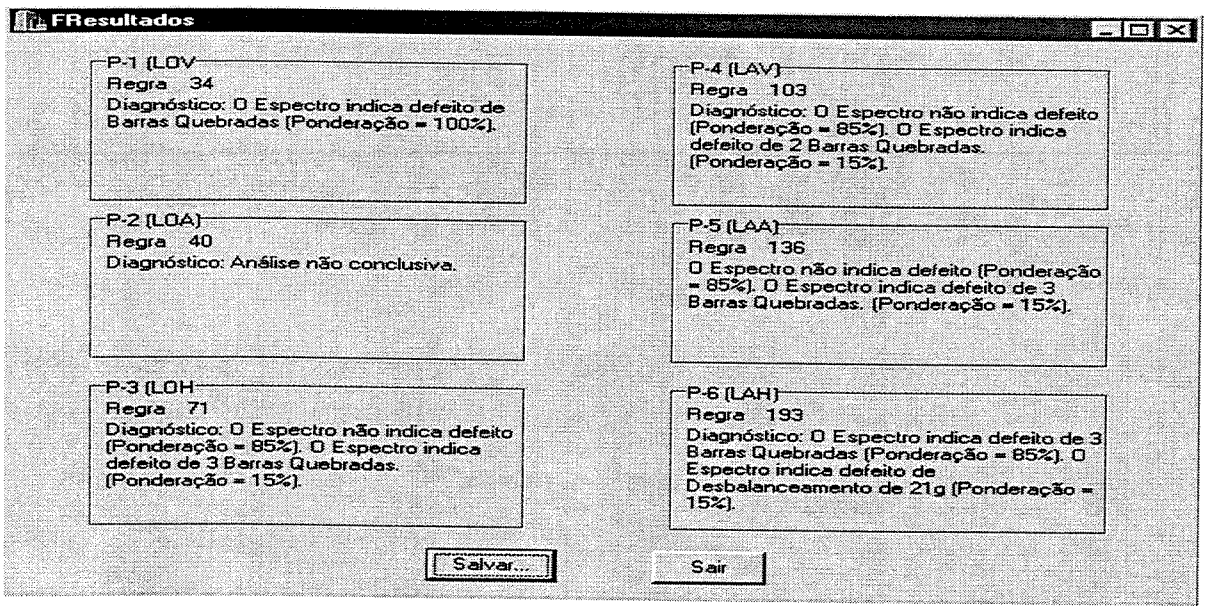


Figura 6.27 - Resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ 3BQ_V3*.

Na Tabela 6.31 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. O sensor *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha) foi o que teve melhor desempenho, com 100% de acerto.

Tabela 6.31 - Desempenho das regras - 3 barras quebradas.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	62,5	25	12,5
P-2	50	50	-
P-3	100	-	-
P-4	25	-	75
P-5	75	-	25
P-6	62,5	-	37,5

6.3.1.11 Resposta para identificação da excitação devido a 5 barras quebradas

Na Tabela 6.32 tem-se os valores do erro quadrático médio dos treinamentos e qualificação das redes neurais artificiais para a excitação devido a 5 barras quebradas nas seis posições dos sensores. A arquitetura e as entradas desta rede são mostradas na Figura 6.16.

Tabela 6.32 - *EQM* de treinamento e qualificação - 5 barras quebradas.

Defeito	Posição	*EQM* Treinamento Ann_Error [%]	*EQM* Qualificação Ann_TesteError [%]	Número de Iterações
5 barras quebradas *8x5x3*	P-1	4,00	13,68	17.293
	P-2	4,00	4,35	82.557
	P-3	4,00	2,29	2.877
	P-4	4,53	3,94	305.945
	P-5	4,00	3,52	10.530
	P-6	4,00	3,72	1.859

Os valores do *EQM* para os seis sensores mostram que as redes neurais reconheceram os dados reservados para qualificação, com índices de erros inferiores a 14%. O sensor *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha) apresentou o melhor resultado, com índice de qualificação inferiores a 2,5%.

Na Tabela 6.33 tem-se o percentual de acerto para as respostas das doze redes neurais para a excitação devido a 5 barras quebradas. Na Figura 6.28 tem-se o resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ 5BQ_V3*.

Tabela 6.33 - Resposta das redes neurais - 5 barras quebradas.

5 BQ		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		100	100	25	100	25	100
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	100	87,5	100	100	100	100
	35,1g	100	100	100	100	100	100
	21g	100	100	100	100	100	12,5
	Desali.	100	100	100	100	100	100
Rede *elétricos*	*SP*	100	100	100	100	100	100
	DF2	100	100	100	100	100	100
	DF1	100	100	100	100	100	100
	2 BQ	100	100	100	100	100	100
	3 BQ	100	100	100	100	100	100
	5 BQ	100	75	87,5	62,5	62,5	62,5
	7 BQ	100	87,5	100	100	100	100

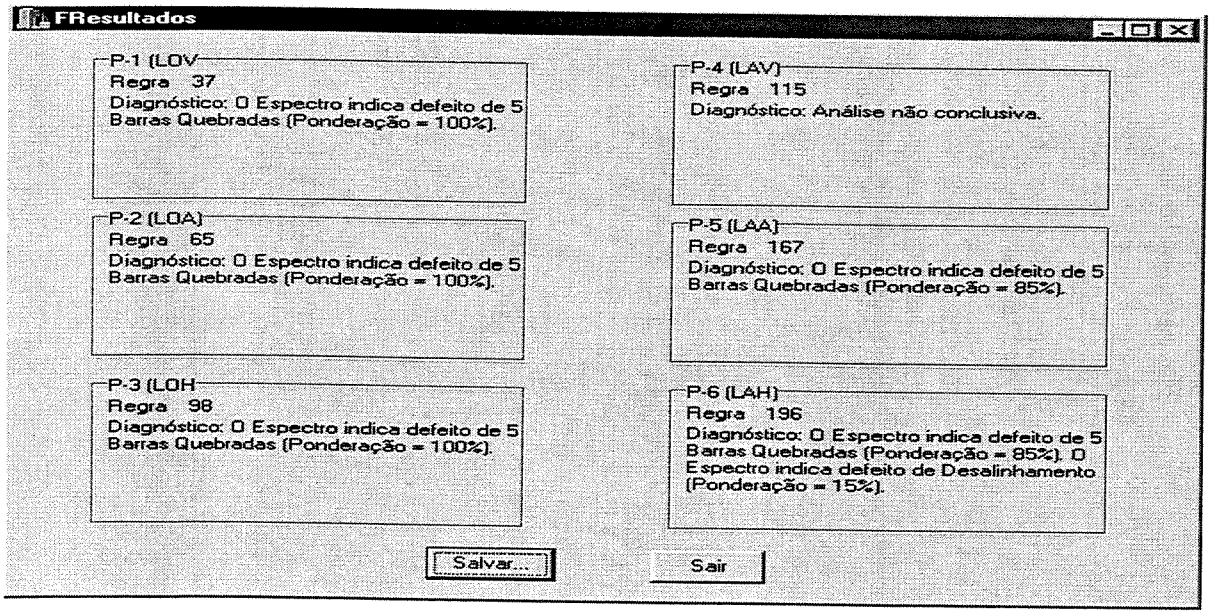


Figura 6.28 - Resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ 5BQ_V3*.

Na Tabela 6.34 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. O sensor *P-1* (*AVV* - acoplado, direção vertical, lado da ventoinha) foi o que teve melhor desempenho, com 100% de acerto.

Tabela 6.34 - Desempenho das regras - 5 barras quebradas.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	100	-	-
P-2	75	12,5	12,5
P-3	87,5	-	12,5
P-4	50	50	-
P-5	62,5	12,5	25
P-6	62,5	-	37,5

7.3.1.12 Resposta para identificação da excitação devido a 7 barras quebradas

Na Tabela 6.35 tem-se os valores do erro quadrático médio dos treinamentos e qualificação das redes neurais artificiais para a excitação devido a 7 barras quebradas nas seis posições dos sensores. A arquitetura e as entradas desta rede são mostradas na Figura 6.16. Os valores do *EQM* para os seis sensores mostram que as redes neurais reconheceram os dados reservados para qualificação, com índices de erros inferiores a 3%.

Tabela 6.35 - *EQM* de treinamento e qualificação - 7 barras quebradas.

Defeito	Posição	*EQM* Treinamento Ann_Error [%]	*EQM* Qualificação Ann_TesteError [%]	Número de Iterações
7 barras quebradas 8x5x3	P-1	2,62	2,07	394.178
	P-2	3,86	1,35	135.531
	P-3	1,69	1,57	153.611
	P-4	5,11	2,66	55.379
	P-5	4,07	1,71	171
	P-6	4,00	2,62	4,299

Na Tabela 6.36 tem-se o percentual de acerto para as respostas das doze redes neurais para a excitação devido a 7 barras quebradas. Na Figura 6.29 tem-se o resultado do *Sistema Especialista* para o testesde qualificação *SE_ 7BQ_V3*.

Tabela 6.36 - Resposta das redes neurais - 7 barras quebradas.

7 BQ		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		100	100	87,5	12,5	50	100
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	100	100	100	100	87,5	100
	35,1g	100	100	100	100	100	100
	21g	100	100	100	100	100	25
	Desali.	100	100	100	100	100	75
Rede *elétricos*	*SP*	100	100	100	100	100	100
	DF2	100	100	100	100	100	100
	DF1	100	100	100	100	100	100
	2 BQ	100	100	100	87,5	100	100
	3 BQ	87,5	100	87,5	100	100	100
	5 BQ	100	100	100	75	100	100
	7 BQ	100	100	87,5	87,5	100	75

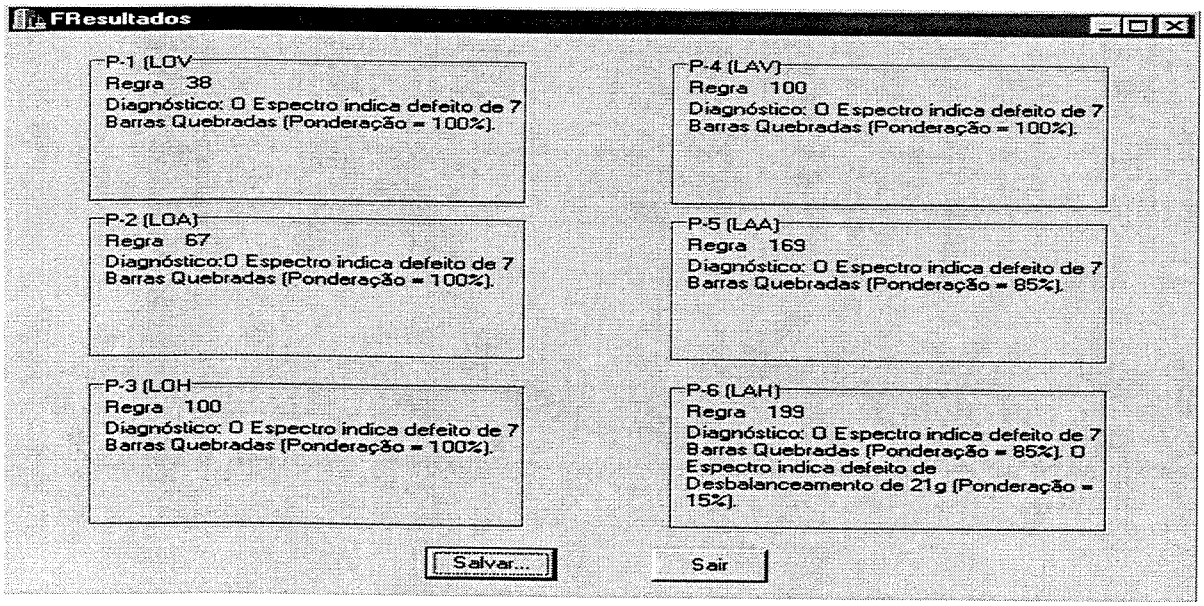


Figura 6.29 - Resultado do *Sistema Especialista* para o teste de qualificação *SE_ 7BQ_V3*.

Na Tabela 6.37 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. Os sensores *P-1* (*AVV* - acoplado, direção vertical, lado da ventoinha), *P-2* (*AAV* - acoplado, direção axial, lado da ventoinha) *P-4* (*AVA* - acoplado, direção vertical, lado do acoplamento) e *P-5* (*AAA* - acoplado, direção axial, lado do acoplamento) foram os que tiveram melhor desempenho, com 100% de acerto.

Tabela 6.37 - Desempenho das regras - 7 barras quebradas.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	100	-	-
P-2	100	-	-
P-3	87,5	12,5	-
P-4	100	-	-
P-5	100	-	-
P-6	75	-	25

6.3.1.13 Avaliação global dos dados da avaliação intermediária

Na Tabela 6.38 tem-se o percentual de acerto, por sensor, das doze redes neurais para todos os testes de validação realizados, sendo possível determinar o melhor sensor para identificação da excitação. Mesmo não procedendo nenhum novo treinamento para as redes neurais com *EQM* de qualificação altos, o desempenho dos sensores apresentaram elevado índice de acerto.

Na Tabela 6.39 tem-se os percentuais de acerto das regras, classificados em *falha diagnosticada*, *falha não diagnosticada* e *diagnóstico indefinido*. Os sensores *P-1* (*AVV* - acoplado, direção vertical, lado da ventoinha) e *P-3* (*AHV* - acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha) foram os que tiveram melhores desempenhos. Mesmo não procedendo nenhuma análise para a introdução de novas regras que pudesse melhorar o desempenho do sistema especialista, as 199 regras existentes apresentaram elevado índice de acerto.

Tabela 6.38 - Resposta das redes neurais - testes de validação intermediária.

Sensores		P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]	P-4 [%]	P-5 [%]	P-6 [%]
Rede *sem defeito*		88,89	87,50	70,14	71,53	70,14	97,22
Rede *mecânicos*	Fol. Mec.	94,44	93,06	91,67	95,83	95,14	95,83
	35,1g	98,61	98,61	97,92	98,61	97,92	98,61
	21g	99,31	97,92	97,92	97,22	94,44	81,94
	Desali.	96,53	94,44	100	97,22	98,61	95,83
Rede *elétricos*	*SP*	98,61	99,31	99,31	100	100	100
	DF2	84,72	92,36	95,83	94,44	95,14	94,44
	DF1	95,83	95,14	96,53	97,22	92,36	96,53
	2 BQ	94,44	94,44	97,92	91,67	80,56	94,44
	3 BQ	93,75	93,06	97,22	93,06	95,14	96,53
	5 BQ	97,92	97,92	97,22	96,53	96,53	95,83
	7 BQ	96,53	99,31	97,22	87,50	98,61	93,75

Tabela 6.39 - Desempenho do sistema especialista - testes de validação intermediária.

Posição	Falha diagnosticada [%]	Falha não diagnosticada [%]	Diagnóstico indefinido [%]
P-1	83,33	4,17	12,5
P-2	65,63	15,,63	18,75
P-3	89,58	3,13	7,29
P-4	66,67	10,42	22,92
P-5	78,13	3,13	18,75
P-6	70,83	13,54	15,63

6.3.2 Respostas do Sistema Híbrido *HY_NES* para os dados de validação final

Nesta etapa, são apresentados ao Sistema Híbrido *HY_NES* os dados de validação final. Estes dados reservados, num total de 96 testes, não foram utilizados em nenhum momento, durante a realização do treinamento, validação e qualificação intermediária. O objetivo é

identificar a excitação através das saídas do Sistema Híbrido *HY_NES*, simulando uma aplicação real do trabalho.

Os dados reservados também serão aplicados sem nenhum novo treinamento das redes neurais e sem implementar nenhuma nova regra no sistema especialista. Este procedimento, sem dúvida melhorariam o desempenho do Sistema Híbrido *HY_NES*. O objetivo principal, nesta etapa, não é apresentar resultados finais otimizados, este é um objetivo a ser alcançado no aprimoramento deste trabalho.

6.3.2.1 Resposta para identificação da condição normal de funcionamento

Na Figura 6.30 tem-se a saída do Sistema *HY_NES*, para a condição normal de funcionamento do motor, apresentada ao "usuário".

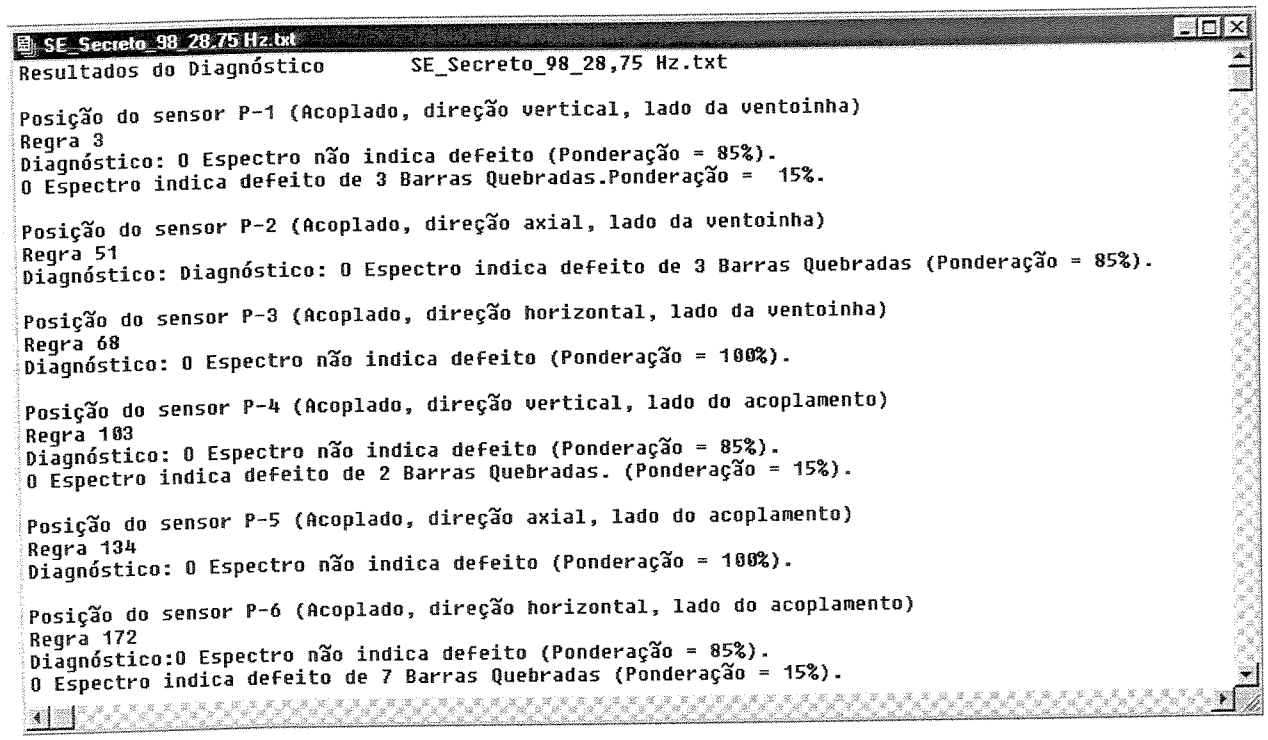


Figura 6.30 - Saída do Sistema *HY_NES* - condição normal de funcionamento.

Na Tabela 6.40 tem-se a desempenho da validação final de cada sensor para os oito testes realizados. Na Figura 6.31 tem-se o percentual de acerto do Sistema *HY_NES* de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário", usando as informações dos seis sensores.

Tabela 6.40 - Desempenho da validação final dos sensores - condição normal de funcionamento.

Teste	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
1	Correto	Incorreto	Correto	Incorreto	Correto	Correto
2	Indefinido	Incorreto	Correto	Indefinido	Correto	Correto
3	Incorreto	Indefinido	Incorreto	Incorreto	Incorreto	Indefinido
4	Correto	Incorreto	Incorreto	Correto	Incorreto	Correto
5	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Incorreto	Indefinido
6	Indefinido	Incorreto	Incorreto	Incorreto	Incorreto	Incorreto
7	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Correto	Correto
8	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Correto	Incorreto

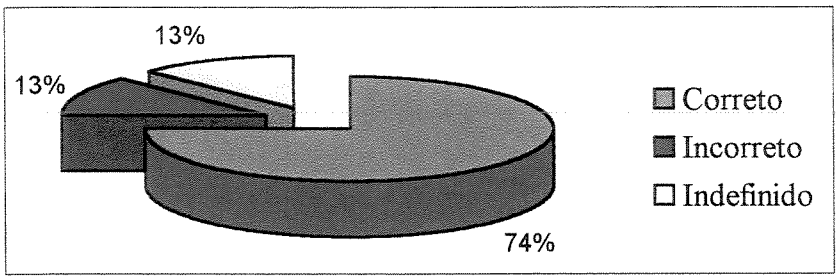


Figura 6.31 - Avaliação do *HY_NES* de acordo com "usuário" - sem defeito.

6.3.2.2 Resposta para identificação da excitação devido à folga mecânica

Na Figura 6.32 tem-se a saída do Sistema *HY_NES*, para a excitação devido à folga mecânica, apresentada ao "usuário".

Na Tabela 6.41 tem-se a desempenho da validação final de cada sensor para os oito testes realizados. Para esta excitação, o percentual de acerto do Sistema *HY_NES*, de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário", foi de 100%. Mesmo o *Testes 3, 5 e 8*, tendo somente três *Correto*, o usuário foi capaz de identificar a excitação.

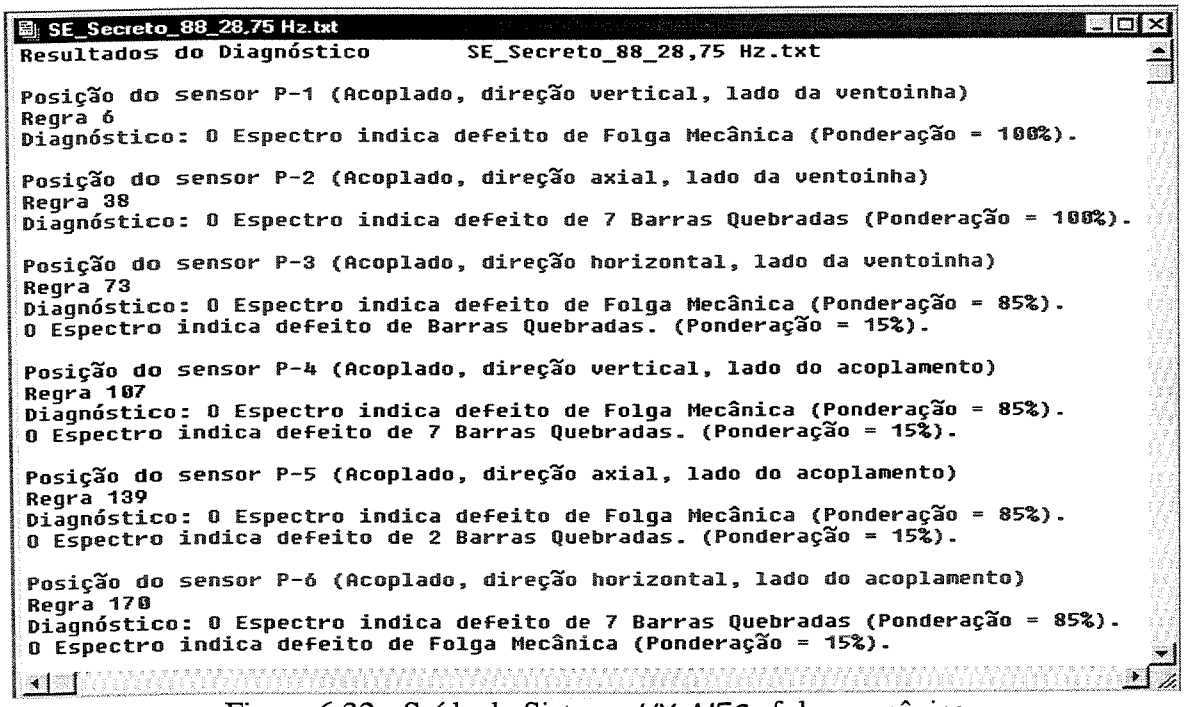


Figura 6.32 - Saída do Sistema *HY_NES* - folga mecânica.

Tabela 6.41 - Desempenho da validação final dos sensores - folga mecânica.

Teste	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
1	Correto	Incorreto	Indefinido	Correto	Correto	Correto
2	Correto	Correto	Indefinido	Correto	Correto	Correto
3	Correto	Correto	Incorreto	Correto	Incorreto	Incorreto
4	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Incorreto	Correto
5	Correto	Incorreto	Incorreto	Correto	Indefinido	Correto
6	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Correto	Incorreto
7	Correto	Incorreto	Indefinido	Correto	Correto	Correto
8	Correto	Incorreto	Incorreto	Correto	Correto	Incorreto

6.3.2.3 Resposta para identificação da excitação devido ao desbalanceamento 35,1g

Na Figura 6.33 tem-se a saída do Sistema *HY_NES*, para a excitação devido desbalanceamento, apresentada ao "usuário".

Na Tabela 6.42 tem-se a desempenho da validação final de cada sensor para os oito testes realizados. Para esta excitação, o percentual de acerto do Sistema *HY_NES*, de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário", foi de 100%.

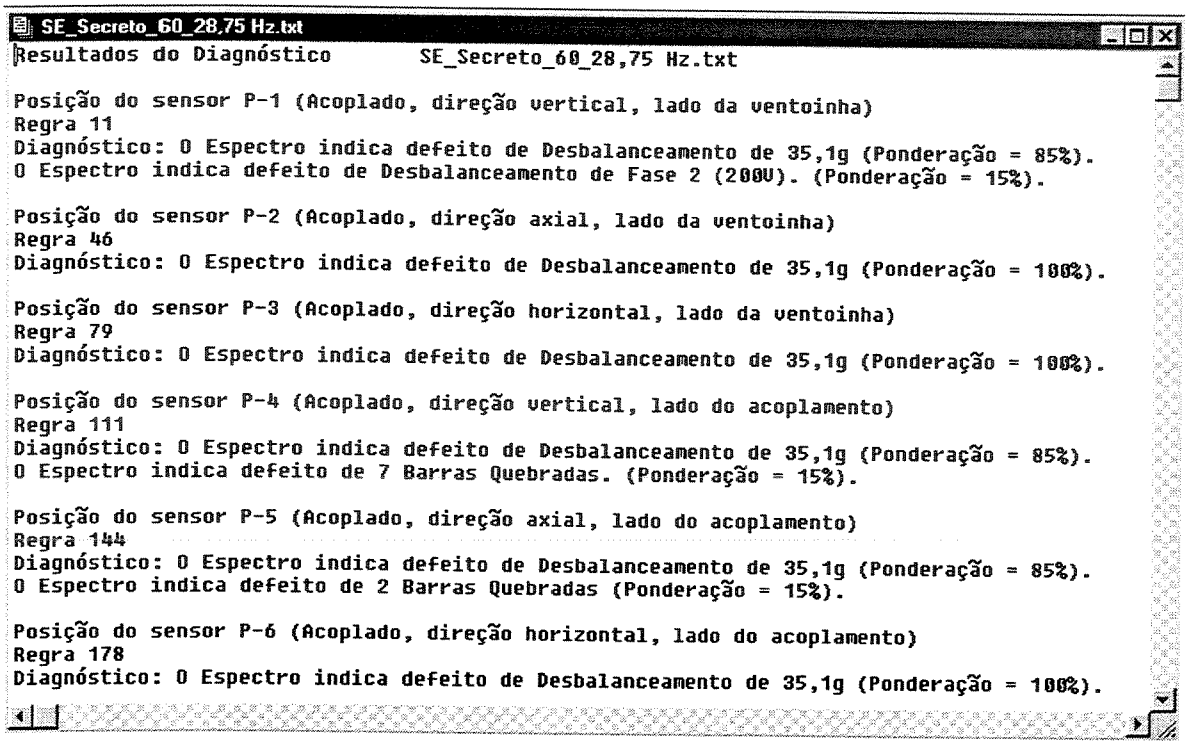


Figura 6.33 - Saída do Sistema *HY_NES* - desbalanceamento 35,1g.

Tabela 6.42 - Desempenho da validação final dos sensores - desbalanceamento 35,1g.

Teste	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
1	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
2	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Incorreto
3	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
4	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Incorreto	Correto
5	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
6	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
7	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
8	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto

6.3.2.4 Resposta para identificação da excitação devido ao desbalanceamento 21g

Na Figura 6.34 tem-se a saída do Sistema *HY_NES*, para a excitação devido ao desbalanceamento 21g, apresentada ao "usuário". Na Tabela 6.43 tem-se a desempenho da validação final de cada sensor para os oito testes realizados. Para esta excitação, o percentual de acerto do Sistema *HY_NES*, de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário", foi de 100%.

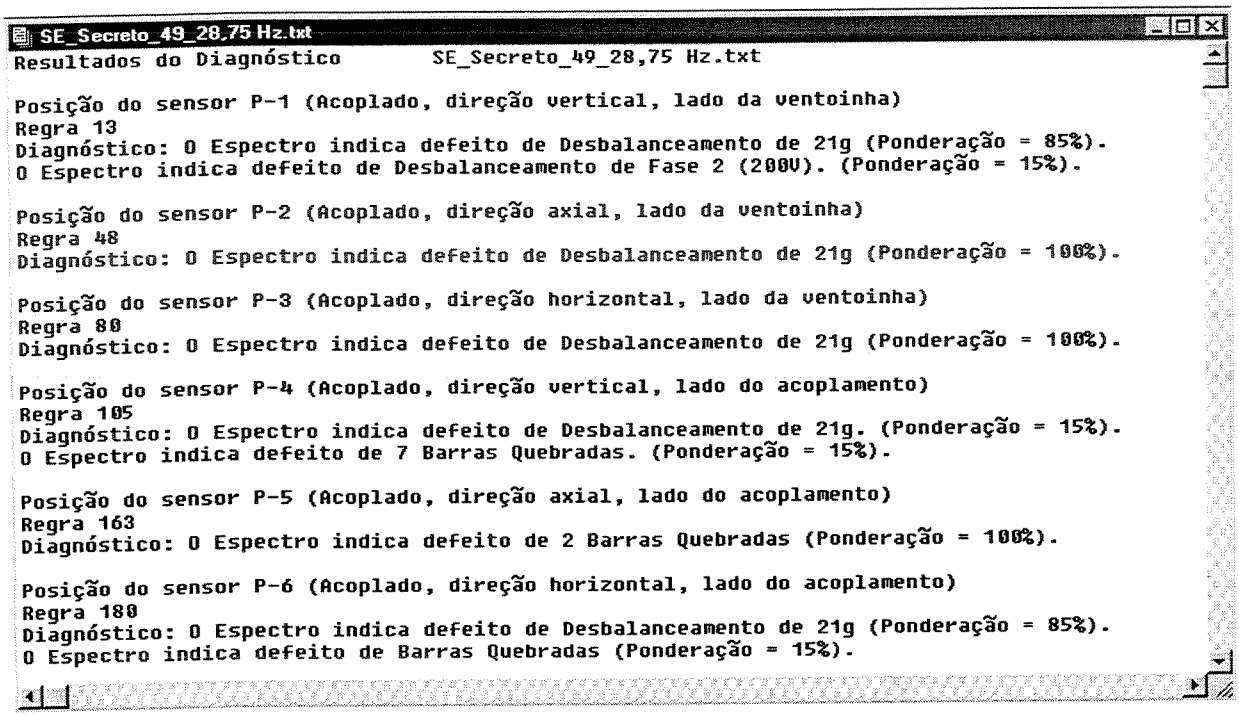


Figura 6.34 - Saída do Sistema *HY_NES* - desbalanceamento 21g.

Tabela 6.43 - Desempenho da validação final dos sensores - desbalanceamento 21g.

Teste	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
1	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Correto	Correto
2	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Incorreto	Incorreto
3	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Incorreto	Correto
4	Correto	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Correto
5	Correto	Incorreto	Correto	Incorreto	Incorreto	Correto
6	Correto	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Correto
7	Correto	Incorreto	Correto	Incorreto	Correto	Correto
8	Correto	Incorreto	Correto	Incorreto	Incorreto	Correto

6.3.2.5 Resposta para identificação da excitação devido ao desalinhamento

Na Figura 6.35 tem-se a saída do Sistema *HY_NES*, para a excitação devido ao desalinhamento, apresentada ao "usuário". Na Tabela 6.44 tem-se a desempenho da validação final de cada sensor para os oito testes realizados. Na Figura 6.36 tem-se o percentual de acerto do Sistema *HY_NES*, de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário".

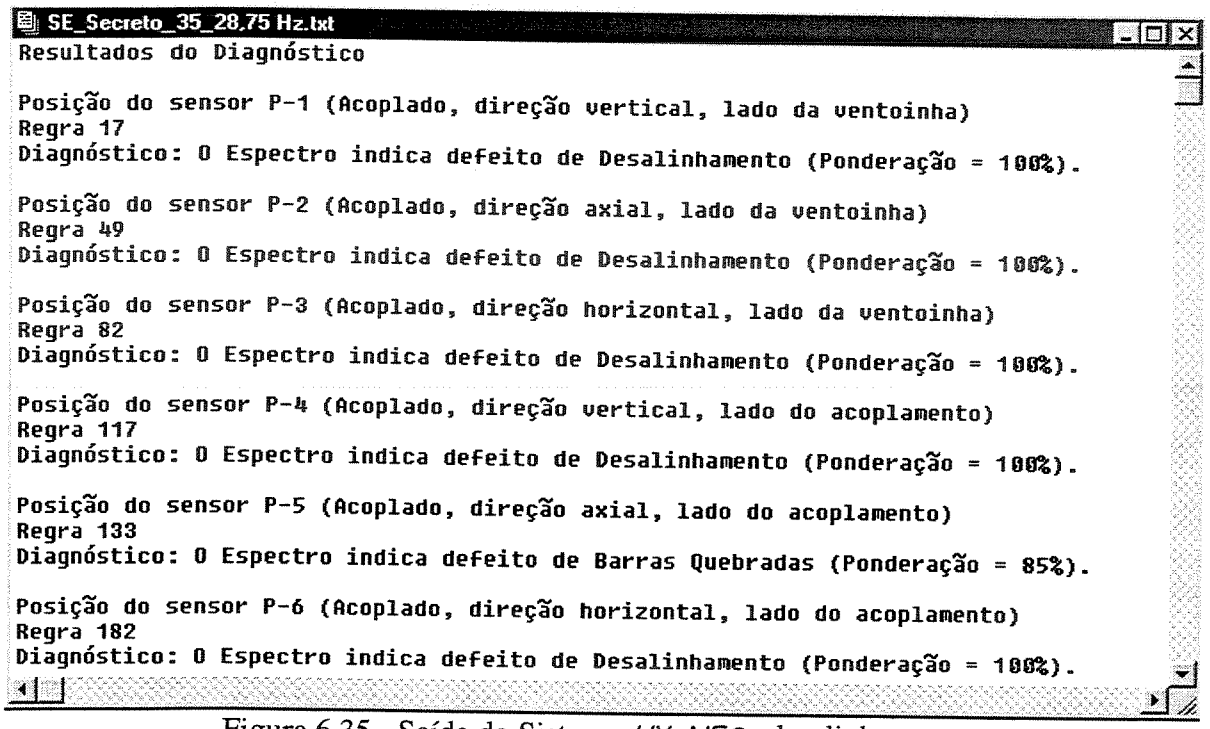


Figura 6.35 - Saída do Sistema *HY_NES* - desalinhamento.

Tabela 6.44 - Desempenho da validação final dos sensores - desalinhamento.

Teste	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
1	Indefinido	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Correto
2	Indefinido	Correto	Incorreto	Indefinido	Incorreto	Correto
3	Correto	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Correto
4	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
5	Indefinido	Incorreto	Incorreto	Incorreto	Incorreto	Incorreto
6	Correto	Correto	Incorreto	Incorreto	Incorreto	Incorreto
7	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Correto	Correto
8	Correto	Indefinido	Correto	Indefinido	Correto	Incorreto

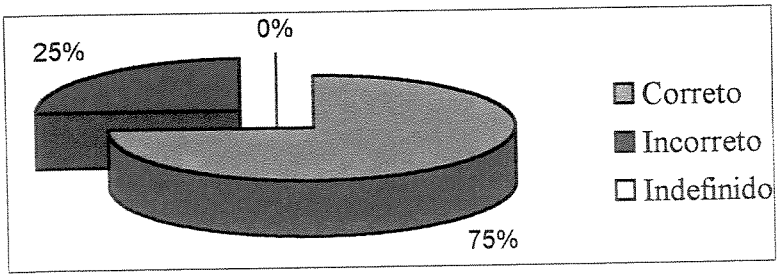


Figura 6.36 - Avaliação do *HY_NES* de acordo com o "usuário" - desalinhamento.

6.3.2.6 Resposta para identificação da excitação devido ao *single phase*

Na Figura 6.37 tem-se a saída do Sistema *HY_NES*, para a excitação devido ao *single phase*, apresentada ao "usuário".

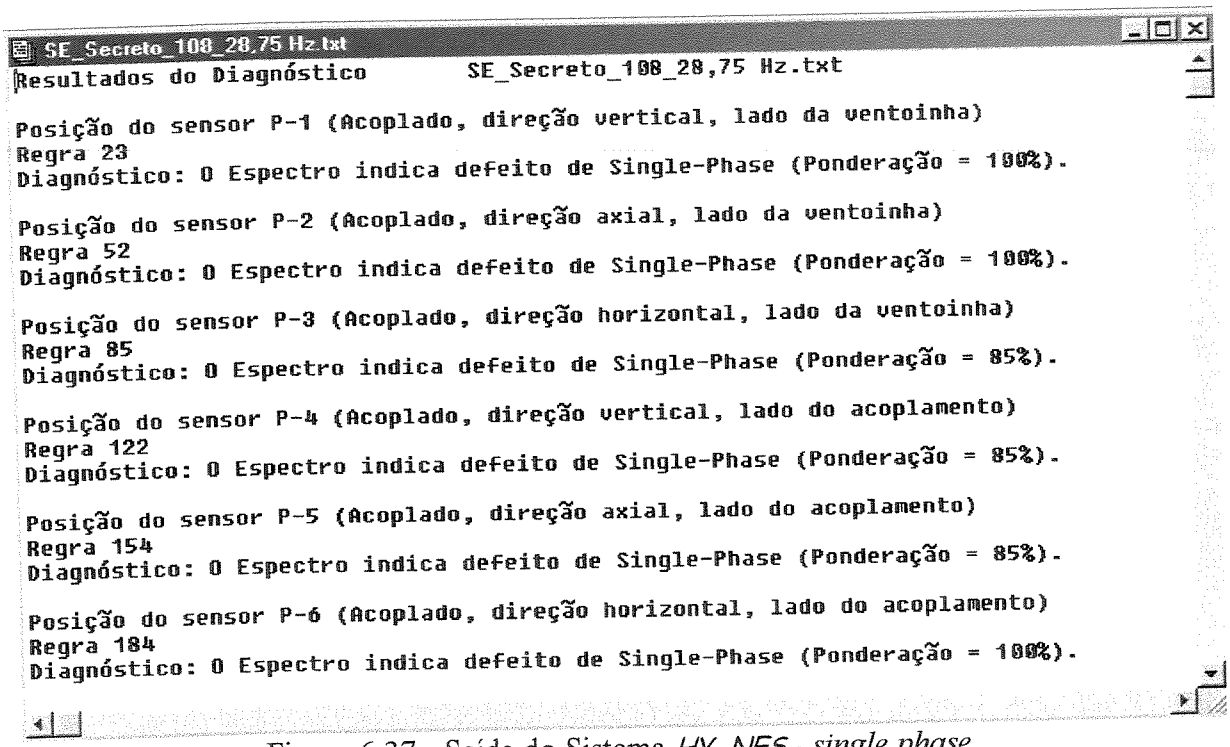


Figura 6.37 - Saída do Sistema *HY_NES* - *single phase*.

Na Tabela 6.45 tem-se a desempenho da validação final de cada sensor para os oito testes realizados. Na Figura 6.38 tem-se o percentual de acerto do Sistema *HY_NES*, de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário".

Tabela 6.45 - Desempenho da validação final dos sensores - *single phase*.

Teste	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
1	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
2	Correto	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Incorreto
3	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Incorreto	Correto
4	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
5	Correto	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Correto
6	Incorreto	Incorreto	Correto	Incorreto	Incorreto	Correto
7	Indefinido	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Correto
8	Correto	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Incorreto

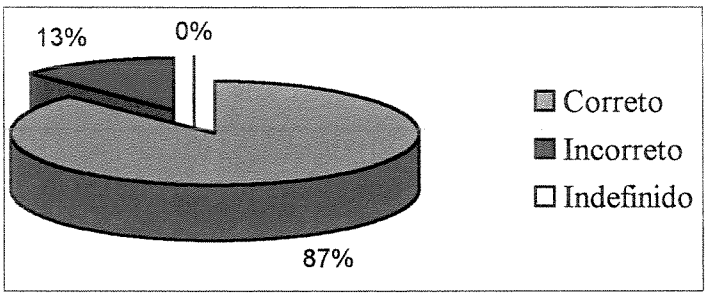


Figura 6.38 - Avaliação do *HY_NES* de acordo com o "usuário" - *single phase*.

6.3.2.7 Resposta para identificação da excitação devido ao desbalanceamento de fase DF_2

Na Figura 6.39 tem-se a saída do Sistema *HY_NES*, para a excitação devido ao desbalanceamento de fase DF_2, apresentada ao "usuário".

Na Tabela 6.46 tem-se a desempenho da validação final de cada sensor para os oito testes realizados.

Na Figura 6.40 tem-se o percentual de acerto do Sistema *HY_NES*, de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário".

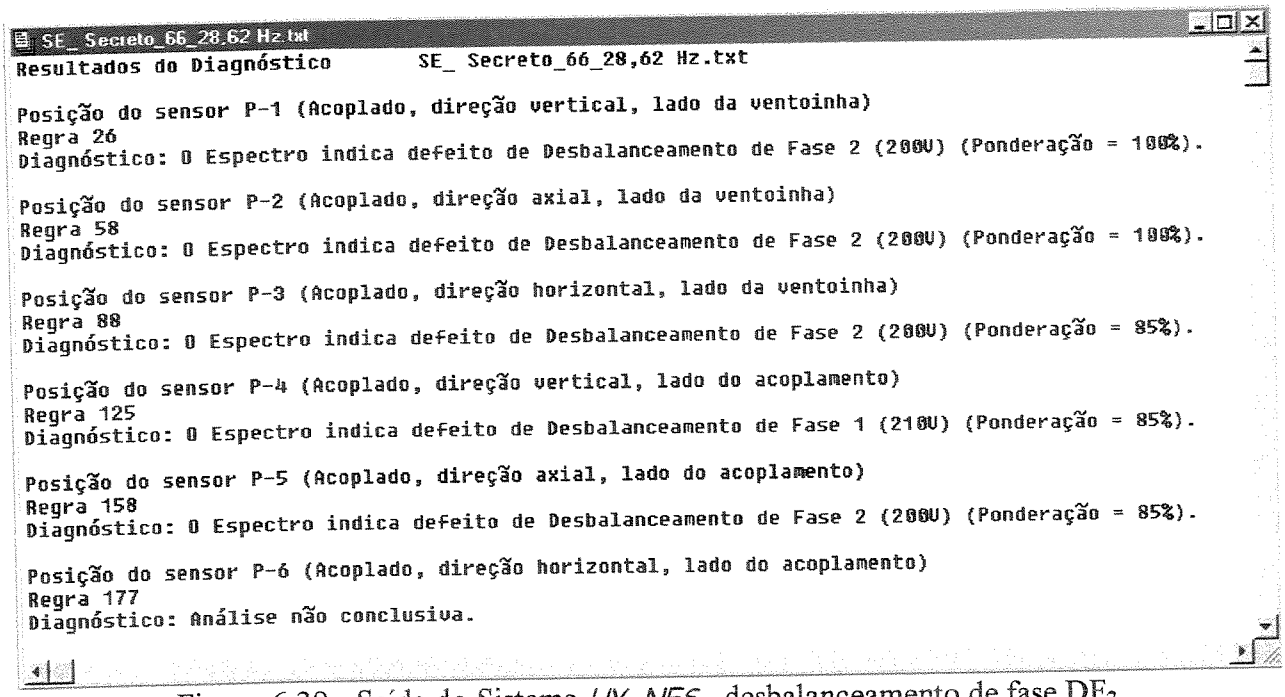


Figura 6.39 - Saída do Sistema *HY_NES* - desbalanceamento de fase DF_2.

Tabela 6.46 - Desempenho da validação final dos sensores - desbalanceamento de fase DF_2.

Teste	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
1	Indefinido	Indefinido	Correto	Incorreto	Correto	Indefinido
2	Correto	Correto	Incorreto	Indefinido	Correto	Incorreto
3	Indefinido	Correto	Correto	Correto	Correto	Incorreto
4	Correto	Incorreto	Correto	Incorreto	Correto	Indefinido
5	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Incorreto	Indefinido
6	Incorreto	Incorreto	Correto	Incorreto	Incorreto	Indefinido
7	Indefinido	Indefinido	Correto	Correto	Incorreto	Correto
8	Correto	Incorreto	Correto	Incorreto	Incorreto	Indefinido

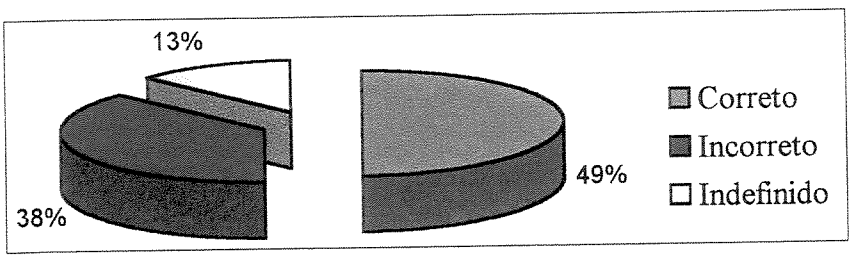


Figura 6.40 - Avaliação *HY_NES* de acordo com usuário - desbalanceamento de fase DF_2.

6.3.2.8 Resposta para identificação da excitação devido ao desbalanceamento de fase DF_1

Na Figura 6.41 tem-se a saída do Sistema *HY_NES*, para a excitação devido ao desbalanceamento de fase DF_1, apresentada ao "usuário". Na Tabela 6.47 tem-se a desempenho da validação final de cada sensor para os oito testes realizados.

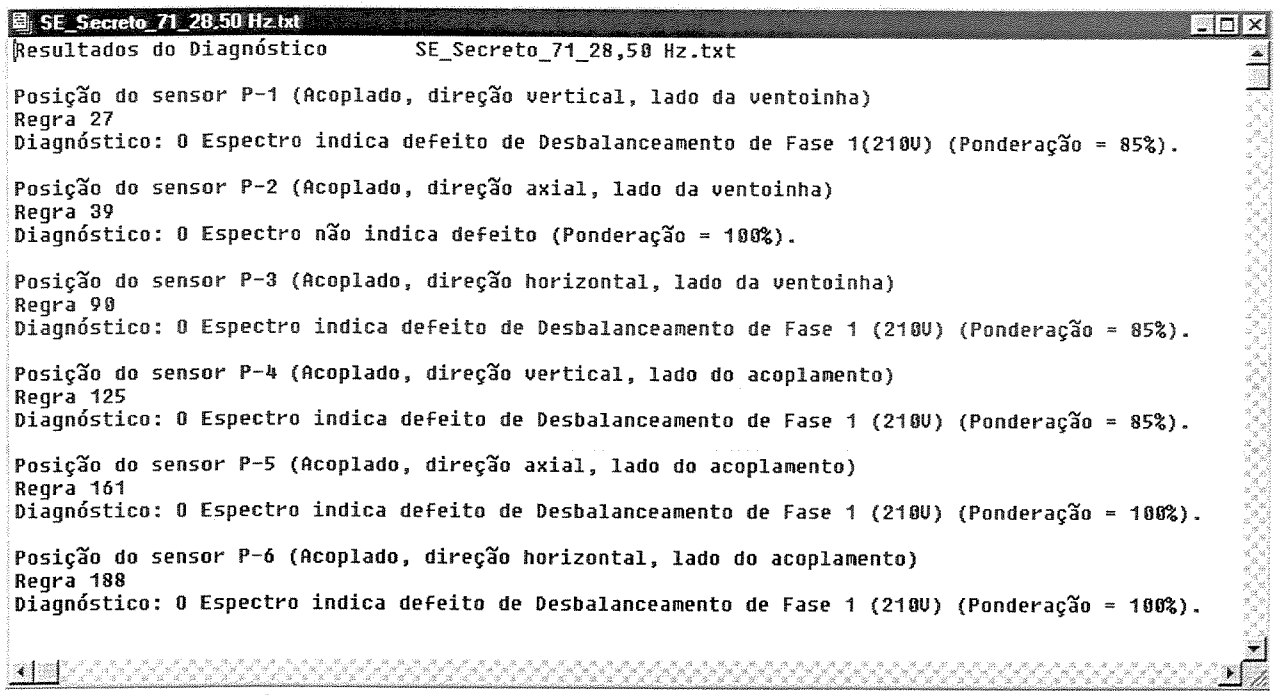


Figura 6.41 - Saída do Sistema *HY_NES* - desbalanceamento de fase DF_1.

Tabela 6.47 - Desempenho da validação final dos sensores - desbalanceamento de fase DF_1.

Teste	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
1	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Indefinido
2	Correto	Incorreto	Indefinido	Incorreto	Incorreto	Correto
3	Indefinido	Incorreto	Correto	Correto	Incorreto	Correto
4	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Correto	Correto
5	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Correto	Correto
6	Correto	Incorreto	Incorreto	Correto	Correto	Correto
7	Indefinido	Incorreto	Incorreto	Indefinido	Incorreto	Incorreto
8	Correto	Indefinido	Correto	Correto	Correto	Correto

Na Figura 6.42 tem-se o percentual de acerto do Sistema *HY_NES*, de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário".

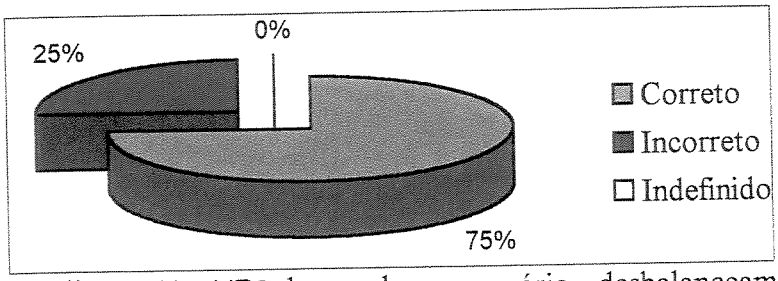


Figura 6.42 - Avaliação *HY_NES* de acordo com usuário - desbalanceamento de fase DF_1.

6.3.2.9 Resposta para identificação da excitação devido a 2 barras quebradas

Na Figura 6.43 tem-se a saída do Sistema *HY_NES*, para a excitação devido a 2 barras quebradas, apresentada ao "usuário".

SE_Secreto_5_28.75 Hz.txt

```
Resultados do Diagnóstico SE_Secreto_5_28,75 Hz.txt

Posição do sensor P-1 (Acoplado, direção vertical, lado da ventoinha)
Regra 4
Diagnóstico: Análise não conclusiva.

Posição do sensor P-2 (Acoplado, direção axial, lado da ventoinha)
Regra 60
Diagnóstico: O Espectro indica defeito de 2 Barras Quebradas (Ponderação = 100%).

Posição do sensor P-3 (Acoplado, direção horizontal, lado da ventoinha)
Regra 96
Diagnóstico: O Espectro indica defeito de 2 Barras Quebradas. Ponderação =  80%.
O Espectro indica defeito de Folga Mecânica (Ponderação = 10%).
O Espectro indica defeito de 2 Barras Quebradas (Ponderação = 10%).

Posição do sensor P-4 (Acoplado, direção vertical, lado do acoplamento)
Regra 103
Diagnóstico: O Espectro não indica defeito (Ponderação = 85%).
O Espectro indica defeito de 2 Barras Quebradas. (Ponderação = 15%).

Posição do sensor P-5 (Acoplado, direção axial, lado do acoplamento)
Regra 164
Diagnóstico: O Espectro indica defeito de 2 Barras Quebradas (Ponderação = 85%).
O Espectro indica defeito de Folga Mecânica (Ponderação = 15%).

Posição do sensor P-6 (Acoplado, direção horizontal, lado do acoplamento)
Regra 190
Diagnóstico: O Espectro indica defeito de 2 Barras Quebradas (Ponderação = 100%).
```

Figura 6.43 - Saída do Sistema *HY_NES* - 2 barras quebradas.

Na Tabela 6.48 tem-se a desempenho da validação final de cada sensor para os oito testes realizados. Na Figura 6.44 tem-se o percentual de acerto do Sistema *HY_NES*, de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário".

Tabela 6.48 - Desempenho da validação final dos sensores - 2 barras quebradas.

Teste	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
1	Incorreto	Correto	Correto	Indefinido	Incorreto	Incorreto
2	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Incorreto	Correto
3	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Incorreto	Correto
4	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Correto	Incorreto
5	Indefinido	Correto	Correto	Incorreto	Correto	Correto
6	Indefinido	Correto	Correto	Incorreto	Correto	Correto
7	Indefinido	Indefinido	Correto	Indefinido	Incorreto	Correto
8	Correto	Indefinido	Correto	Incorreto	Correto	Correto

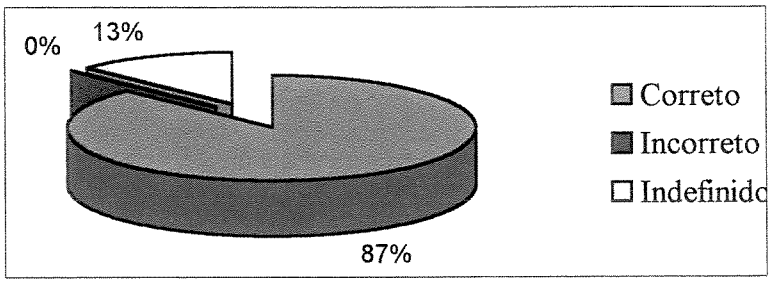


Figura 6.44 - Avaliação do *HY_NES* de acordo com "usuário" - 2 barras quebradas.

6.3.2.10 Resposta para identificação da excitação devido a 3 barras quebradas

Na Figura 6.45 tem-se a saída do Sistema *HY_NES*, para a excitação devido a 3 barras quebradas, apresentada ao "usuário".

Na Tabela 6.49 tem-se a desempenho da validação final de cada sensor para os oito testes realizados.

Na Figura 6.46 tem-se o percentual de acerto do Sistema *HY_NES*, de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário".

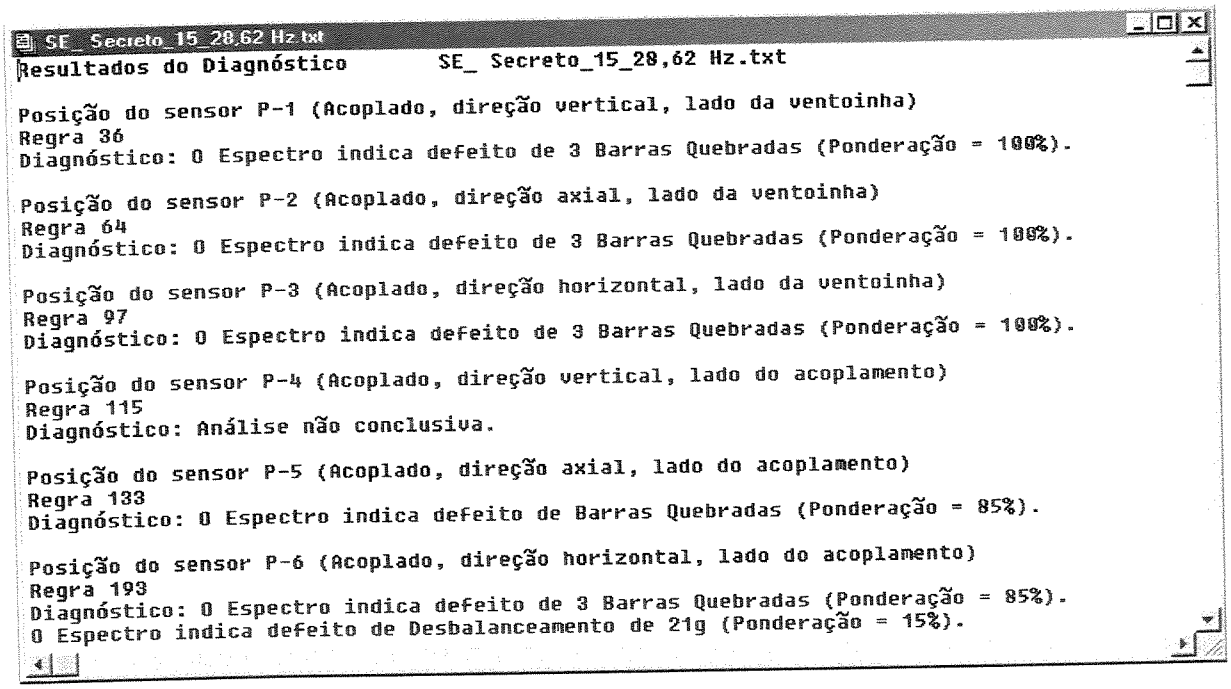


Figura 6.45 - Saída do Sistema *HY_NES* - 3 barras quebradas.

Tabela 6.49 - Desempenho da validação final dos sensores - 3 barras quebradas.

Teste	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
1	Indefinido	Indefinido	Incorreto	Incorreto	Incorreto	Correto
2	Indefinido	Indefinido	Correto	Incorreto	Incorreto	Correto
3	Indefinido	Correto	Correto	Incorreto	Correto	Correto
4	Indefinido	Correto	Correto	Incorreto	Correto	Correto
5	Incorreto	Indefinido	Incorreto	Incorreto	Incorreto	Incorreto
6	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Correto	Correto
7	Correto	Correto	Correto	Indefinido	Correto	Correto
8	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Correto	Incorreto

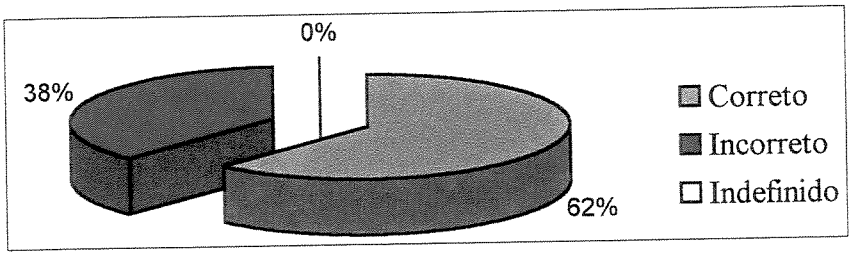


Figura 6.46 - Avaliação do *HY_NES* de acordo com "usuário" - 3 barras quebradas.

6.3.2.11 Resposta para identificação da excitação devido a 5 barras quebradas

Na Figura 6.47 tem-se a saída do Sistema *HY_NES*, para a excitação devido a 5 barras quebradas, apresentada ao "usuário". Na Tabela 6.50 tem-se a desempenho da validação final de cada sensor para os oito testes realizados. Para esta excitação, percentual de acerto do Sistema *HY_NES*, de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário", foi de 100%.

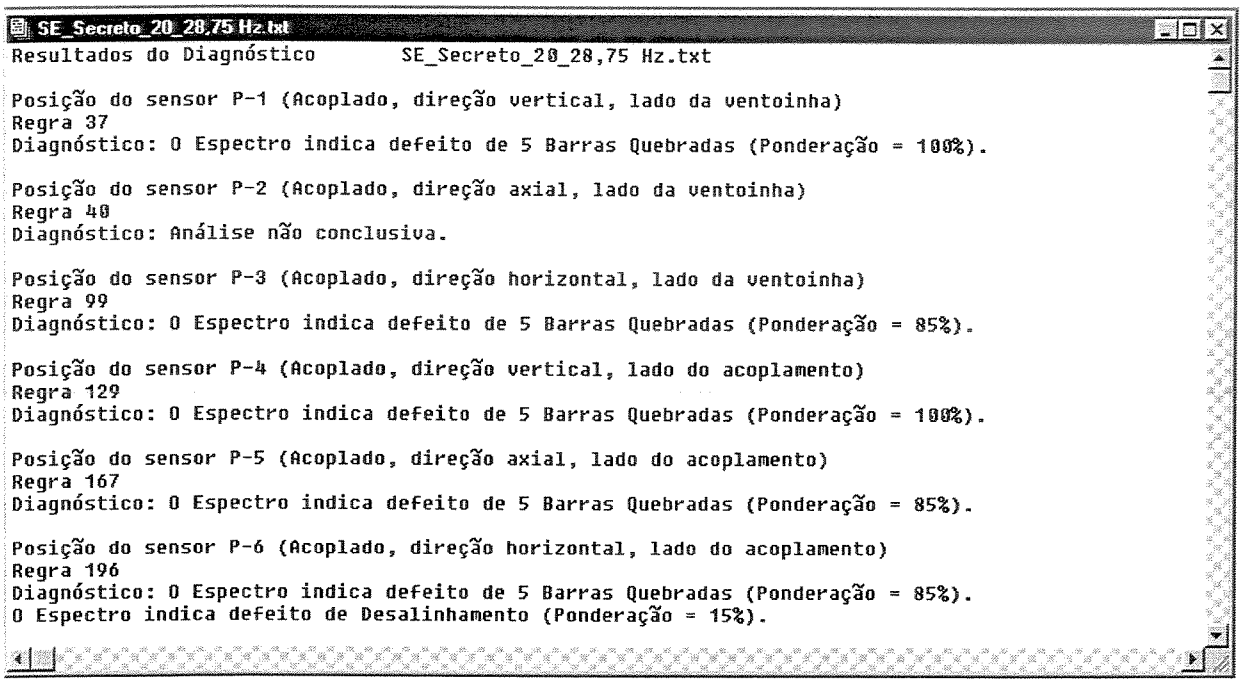


Figura 6.47 - Saída do Sistema *HY_NES* - 5 barras quebradas.

Tabela 6.50 - Desempenho da validação final dos sensores - 5 barras quebradas.

Teste	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
1	Correto	Indefinido	Correto	Indefinido	Correto	Correto
2	Correto	Correto	Correto	Indefinido	Correto	Correto
3	Correto	Incorreto	Indefinido	Correto	Indefinido	Incorreto
4	Correto	Indefinido	Correto	Correto	Correto	Correto
5	Correto	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Correto
6	Correto	Indefinido	Correto	Correto	Incorreto	Correto
7	Correto	Correto	Incorreto	Correto	Correto	Incorreto
8	Correto	Correto	Incorreto	Indefinido	Correto	Correto

6.3.2.12 Resposta para identificação da excitação devido a 7 barras quebradas

Na Figura 6.48 tem-se a saída do Sistema *HY_NES*, para a excitação devido a 5 barras quebradas, apresentada ao "usuário". Na Tabela 6.51 tem-se a desempenho da validação final de cada sensor para os oito testes realizados. Para esta excitação, percentual de acerto do Sistema *HY_NES*, de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário", foi de 100%.

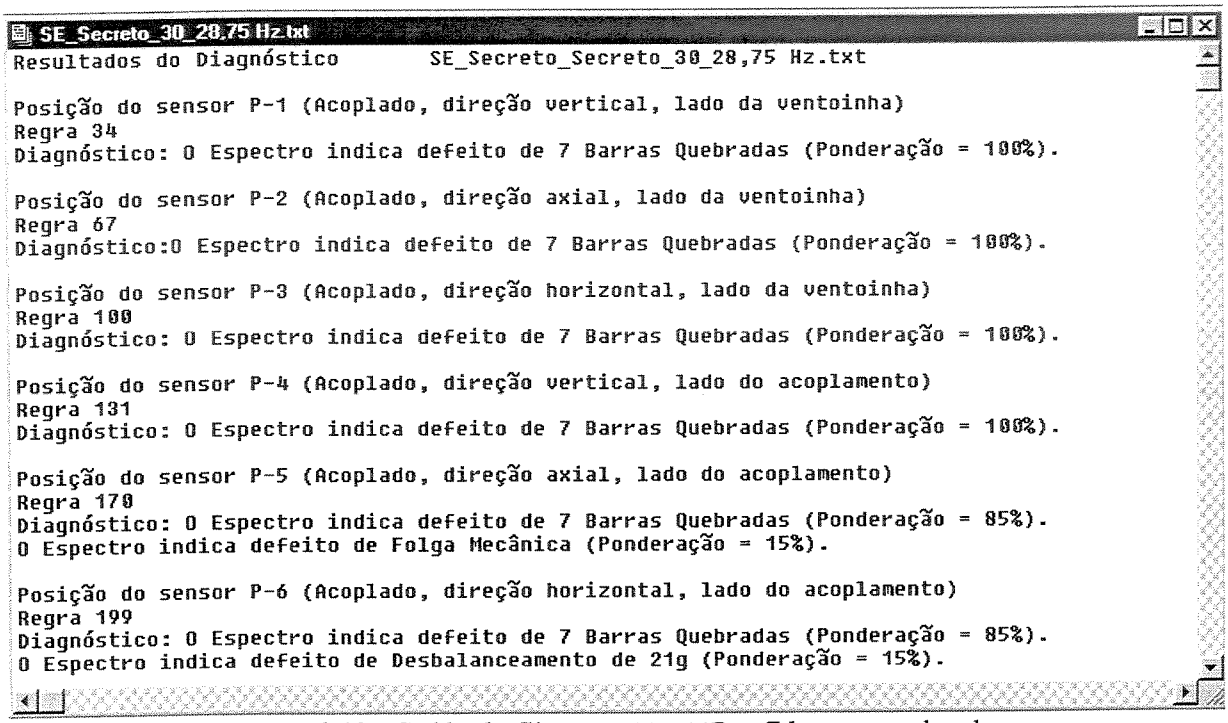


Figura 6.48 - Saída do Sistema *HY_NES* - 7 barras quebradas.

Tabela 6.51 - Desempenho da validação final dos sensores - 7 barras quebradas.

Teste	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
1	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
2	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Incorreto
3	Correto	Indefinido	Correto	Correto	Correto	Correto
4	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
5	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
6	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
7	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto	Correto
8	Indefinido	Correto	Correto	Correto	Incorreto	Correto

6.3.2.13 Avaliação global dos dados da avaliação final

Na Tabela 6.52 tem-se o percentual de acerto das doze redes neurais para todos os testes de validação. Na Figura 6.49, tem-se o percentual de acerto global do Sistema Híbrido *HY_NES* de acordo com a interpretação de suas saídas pelo "usuário", analisando todos os sensores.

Nesta versão as regras no sistema especialista foram construídas com limites rígidos ($P<0,5$ ou $P>0,5$). Na continuação deste trabalhos, pretende-se implementar uma estrutura mais flexível, como por exemplo lógica *Fuzzy*, visando a otimização do Sistema Híbrido *HY_NES*.

Tabela 6.52 - Desempenho da validação final dos sensores - global.

Excitação	Correto [%]	Incorreto [%]	Indefinido [%]
Sem defeito	74	13	13
Folga Mecânica	100	-	-
Desb_35,1g	100	-	-
Desb_21g	100	-	-
Desalinhamento	75	25	-
Single phase	87	13	-
DF2 (200V)	49	13	38
DF1 (210V)	75	25	-
2 Barras Quebradas	87	-	38
3 Barras Quebradas	62	38	-
5 Barras Quebradas	100	-	-
7 Barras Quebradas	100	-	-

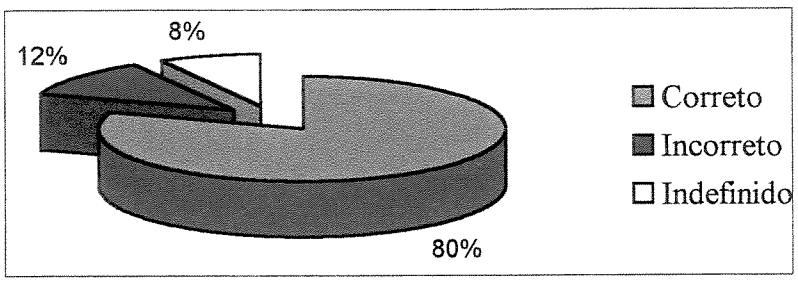


Figura 6.49 - Avaliação do *HY_NES* de acordo com "usuário" - global.

Capítulo 7

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

A bancada de teste apresentada no Capítulo IV mostrou-se ideal para o estudo das excitações de origem mecânica (desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica) e origem elétrica (barras quebradas e desequilíbrio de fase), destacando-se principalmente a sua robustez, permitindo a realização de uma série de 50 testes aleatórios e repetidos sobre as mesmas condições. Foram coletados 3.916 espectros no módulo *UltraSpec Analyzer* (3.492 espectros com o acelerômetro - análise de vibração, 212 com o alicate amperímetro - análise de corrente e 212 com a bobina de fluxo - análise de fluxo magnético) e 740 no módulo *UltraSpec Motor* (650 com o alicate amperímetro e 90 com a bobina de fluxo).

Este número significativo de espectros formaram o banco de dados, indispensável para a construção do Sistema Especialista *SE_MIT* (análise vibração, análise corrente e análise fluxo magnético) e do Sistema Híbrido *HY_NES* (análise vibração). Através dele, foi possível detectar e diagnosticar as freqüências determinísticas relacionadas às excitações. As freqüências determinísticas relacionadas às excitações de origem mecânica confirmaram o que já se conhecia da literatura. Já as freqüências determinísticas relacionadas às excitações de origem elétrica apresentaram novos resultados, principalmente através da análise de vibração.

Os problemas presentes nos motores de indução trifásico mostraram-se adequados para representação por meios de regras de produção. Com o auxílio do *Expert SINTA*, o desenvolvimento do Sistema Especialista *SE_MIT* se deu sem quaisquer dificuldades de implementação e teste. A implementação das regras foram baseadas no conhecimento dos especialistas deste grupo de pesquisa, além da colaboração de especialistas externos. Como

nenhum domínio do conhecimento humano é completo e imutável, o Sistema Especialista *SE_MIT* será revisado e ampliado, buscando incluir novos conhecimentos que serão adquiridos ao longo de novas pesquisas e através de troca de experiências com especialistas da área de Manutenção Preditiva. Também pretende-se usar o *Expert SINTA* para divulgar a técnica e incentivar o desenvolvimento de novos sistemas especialistas nas disciplinas da área de projetos, dando uma nova dinâmica ao curso.

O sistema híbrido *HY_NES* é uma abordagem baseada em técnicas de inteligência artificial (redes neurais artificiais e sistemas especialistas) desenvolvido para diagnosticar falhas de origem mecânica (desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica), elétrica (desequilíbrio de fase e barras quebradas) e a condição normal de funcionamento do motor (assinatura da máquina).

A entrada de dados é um ponto de extrema importância, influenciando na velocidade de convergência. Se a base de dados não for bem construída, a rede neural pode apresentar problemas de convergência. Para isto, fez-se um planejamento detalhado dos procedimentos de testes, procurando minimizar ambigüidades e erros na coleta dos dados. Os sinais foram coletados, aleatoriamente, nas direções vertical, axial e horizontal, lado do acoplamento e lado da ventoinha. A análise de vibração foi escolhida por ser uma tecnologia não invasora e por conter mais informações nos seus espectros, possibilitando a identificação de falhas de origem mecânica e elétrica. Optou-se por trabalhar no domínio da freqüência por ser de fácil diagnóstico e mais sensível às excitações estudadas.

Os dados coletados, normalmente são separados em duas categorias: dados de treinamento e dados de teste. Neste trabalho, os dados foram divididos em *dados de treinamento* (utilizados para treinamento das redes neurais), *dados de validação intermediária* (utilizados para verificação da performance das redes neurais e construção das regras) e *dados de validação final* (utilizados para verificação da performance do sistema *HY_NES*).

O sistema híbrido *HY_NES* mostrou-se eficiente no processo de diagnóstico das excitações aplicadas, tanto para os dados de avaliação intermediária como nos de validação final analisando todos os sensores. Para excitações com maior nível de energia (folga mecânica, desbalanceamento de 21g e 35,1g, 5 e 7 barras quebradas), o índice de acerto da validação final, para este caso, foi de 100%, Tabela 6.53.

O módulo relativo às redes neurais do sistema híbrido *HY_ NES* é uma *shell*, e está estruturada para trabalhar com qualquer banco de dados gerado pelo *Analyze Reports* do *Ultramanager*. Já as regras construídas no módulo relativo ao sistema especialista atendem somente as falhas estudadas. Como prosseguimento deste trabalho, também pretende-se tornar este módulo uma *shell*, o que tornará o sistema híbrido *HY_ NES* uma ferramenta totalmente flexível.

O sistema especialista *SE_MIT* depende fortemente de um especialista humano para a construção das regras e também de um conhecimento mínimo de manutenção preditiva por parte do usuário para que as respostas possam ser respondidas corretamente. Desta forma, o *SE_MIT* tem mais possibilidades de sucesso no diagnóstico correto da falha.

Já o sistema híbrido *HY_ NES* depende fortemente do banco de dados, do treinamento das redes neurais e da construção das regras. A padronização das freqüências de entrada das redes para cada tipo de falha (de origem elétrica e mecânica), possibilita o diagnóstico por acertiva ou rejeição. A arquitetura modular de todo o sistema, permite a inclusão de novos sensores, falhas, arquiteturas, métodos de treinamento, entre outros.

Para trabalhos futuros pretende-se:

- explorar novas técnicas de treinamento de redes e inicialização de pesos, visando a velocidade de convergência das redes neurais;
- explorar a compactação automática dos dados no pré processamento;
- explorar a aplicação de *lógica fuzzy* nas regras do sistema especialista do *HY_ NES*, a partir das saídas das redes neurais;
- ampliar a base de dados com novos sensores e falhas.

Destacam-se também os primeiros frutos deste programa de doutorado: orientações de Iniciação Científica e de Estágio Supervisionado, publicações em congressos nacionais e internacionais, convites para proferir palestras e curso de treinamento na indústria, todos eles dentro do tema desenvolvido.

Referências Bibliográficas

Almeida, J. E. *Motores Elétricos Manutenção e Teste*. 3ª Edição. São Paulo: Hemus Editora Ltda., 1995, 190 p.

Almeida, M. T., Góz, R. D. S., Silva H. A., Lopes J. A. R. Análise de vibrações magnéticas em motores elétricos de indução trifásicos. *Revista Manutenção*, v.46, 1994.

Almeida, M. T., Góz, R. D. S. *Curso de Vibrações em Motores*. FUPAI, Itajubá, MG, 1994.

Altug, S., Chow, M-Y. Fuzzy inference systems implemented on neural architectures for motor fault detection and diagnosis. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, v.46 (6), pp. 1069-1079, 1999.

Baccarini, L. M. R., Brito, J. N., Filho, P. C. M. L., Pederiva, R. Influência do desequilíbrio de fase no comportamento dinâmico de motores de indução trifásico. *Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, 2001.

Bate, G. H. Vibration Diagnostics for industrial electric motor drives. *Technical Report BO0269-11*, Brüel & Kjaer, 1987, 12p.

Benbouzid, M. E. H., Vieira, M. and Theys, C. Induction motor's faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques. *IEEE Transaction on Power Electronics*, v.14 (1), pp. 14-22, 1999.

Benbouzid, M. E. H. Biography on induction motors faults detection and diagnosis. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, v.14 (4), pp. 1065-1074, 1999.

Biddle, James G. Co. Instructions for the use of major megger insulation tester. *Meeting.* James Biddle Co. Plimouth. EUA, 1966.

Botelho, E. J. A. Inteligência Artificial em Manutenção. *Anais do VI Congresso Brasileiro de Manutenção*, Trabalhos Técnicos, Rio de Janeiro, ABRAMAN, 1991, pp. 8-26.

Bonnett, A. H., Soukup, G. C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. *IEEE - Transaction on Industrial Application*, v.28 (4), pp.921-937, 1992.

Bonnett, A. H., Soukup, G. C. Analysis of rotor failures in squirrel-cage induction motors. *IEEE - Transaction on Industrial Application*, v.28 (36), pp.1124-1130, 1988.

Boothman, D. R., Elgar, E. C., Rehder, R. H., Woodall, R. J. Thermal tracking - A rational approach to motor protection. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Sept./Oct., pp. 1335-1344, 1974.

Bowers, S. V., Davis, W. A., Piety, K. R. Proactive motor monitoring. *CSI 1993 User Conference*, Louisville, K.L., 1993.

Brancato, E. L. Estimations of lifetime expectances of motors. *IEEE - Electrical Insulation Magazine*, v.8 (3), 1992.

Brito, J. N. Detecção de problemas em motores elétricos através da análise de vibração e análise de corrente. *Relatório Final*, Projeto FAPEMIG TEC 1008/96, 1999, 129p.

Brito, J. N., Baccarini, L. M. R., Pederiva, R. Análisis de vibración y análisis de corriente, herramientas de mantenimiento preditivo aplicadas en la detección de problemas en motores eléctricos, *Actas del IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Santiago del Chile, Chile, 1999[a].

Brito, J. N., Garcia, E. M., Pederiva, R. Desarrollo de un sistema experto para el diagnostico de problemas en motores eléctricos. *Memorias del V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Mérida, Venezuela, pp.423-428, 2001[a].

Brito, J. N. Brito, R. R., Pederiva, R. Aplicação de redes neurais artificiais para detecção de falhas em motores elétricos. *Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, 2001[b].

Brito, J. N., Rabelo, L. M. R., Filho, P. C. M. L., Pederiva, R. Detecção de barras quebradas em motores elétricos utilizando análise de corrente e fluxo magnético. *5º Congresso de Gestão e Técnicas na Manutenção*, Belo Horizonte, MG, 2001[c].

Brito, J. N., Rabelo, L. M. R., Filho, P. C. M. L. Detecção de problemas em motores elétricos através de técnicas preditivas. *VII Encontro de Usuários CSI no Brasil*, Belo Horizonte, MG, 1999[b].

Butler, C. W., Hodil, E. D. Building Knowledge-base systems with procedural languages. *IEEE Expert*, pp.47-59, 1988.

Burke, J. J., Douglass, D. A., *et al.* Distribution fault current analysis. *EPRI - Electric Power Research Institute*, 1983.

Cambrias, S., Rittenhouse, S. A. Generic guidelines for the life extension of plant electrical equipment. *EPRI - Electric Power Research Institute*, 1988.

Cameron, J. R., Thompson, W. T., Dow, A. B. Vibration and current monitoring for detecting air gap eccentricity in large induction motors", *Proceedings IEE*, 1986, v.133 (3), pp.155-163.

Campbell, S. R., Stone, G. C., *et al.* Practical on-line partial discharge tests for turbine generators and motors. *IEEE - Transaction on Energy Conversion*, v.9 (2), pp.281-297, 1994.

Castro, L. L., Von Zuben, F. J. Uma alternativa simples e robusta para inicialização de pesos em redes neurais multicamadas. *Anais do V Simpósio Brasileiro de Redes Neurais*, v.2, pp.97-102, 1988.

Caulkins, C. W., Oliveira, R. B. T., Rezende, S. O., Carvalho, A. C. P. L. F., Monard, M. C. Aplicação de redes neurais para determinação de parâmetros de vibração. *V Simpósio Brasileiro de Redes Neurais*, pp.319-323, 1998.

Chen, C. L., Nutter, R. S. Improving the training speed of three-layer feedforward nets by optimal estimation of the initial weights. In: *Proceedings of the International Joint Conference of Neural Networks*, 1991, v.3, pp.2063-2068.

Chow, M-Y. Altug, S., Trussell, H. J. Set theoretic based neural-fuzzy motor fault detector. *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Part 4*, 1998, pp.1908-1913.

Chow, M-Y. *Methodologies of using neural networks and fuzzy logic technologies for motor incipient fault detection*. Singapore: Word Scientific Publisher, 1997, 140p.

Chow, M-Y. The advantages of machine fault detection using artificial neural network and fuzzy logic technologies. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 1994, pp. 83-87.

Chow, M-Y., Goode, P. V. Adaptation of a neural-fuzzy fault detection system. *Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control*, 1993.

Chow, M-Y, Yee, S. O.,*et al*. Recognizing animal-caused faults in power distribution systems using artificial neural networks. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v.8 (3), pp. 1268-1274, 1993.

Chow, M-Y, Sharpe, R. N., Hung, J. C. On the application and design of artificial neural networks for motor fault detection - Part I. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, v.40 (2), pp. 181-188, 1993[a].

Chow, M-Y, Sharpe, R. N., Hung, J. C. On the application and design of artificial neural networks for motor fault detection - Part II. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, v.40 (2), pp. 189-196, 1993[b].

Chow, M-Y., Yee, S. O. Methodology for on-line incipient fault detection in single-phase squirrel-cage induction motors using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. v.6 (3), 1991.

Chow, M-Y, Mangum, P. M., Yee, S. O. A neural networks approach to real-time condition monitoring of induction motor. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, v.38 (6), pp. 448-453, 1991.

Chow, M-Y., Yee, S. O. Real time application of artificial neural networks for incipient fault detection of induction machines. *The Third International Conference of Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems*. Charleston, South Carolina, 1990.

Cho K. R., Lang J. H. Detection of broken rotor bars in induction motors using state and parameter estimation. *IEEE Transaction of Industry Application*, v.28 (3), pp.702-708, 1992.

Coelho Jr., M. P. Análise de falhas em motores elétricos. *Revista Nova Manutenção e Qualidade*, pp. 44-48, 1994.

Cunha, D. G. Informática na manutenção de sistema RME. *Anais do VI Congresso Brasileiro de Manutenção*, Trabalhos Técnicos, Rio de Janeiro, ABRAMAN, 1991, pp. 77-96.

CSI User's Manual. *Nspectr II - Automated Diagnostic Expert*. Computational Systems, Incorporated, CSI Part # 97040 PB, Rev 3, 1995.

Douglas, J., Edmonds, J., *et al.* Early warning for hydro generator failure. *EPRI Journal*, pp. 31-35, 1988.

Dickinson, W. H. Report on reliability of electrical equipment in industrial plants.1962

Durkin, J. Expert Systems: A view of the field. *IEEE Expert*, pp.56-63, April, 1996.

Elkassabgy N. M., Easthman, A. R. Detection of broken bars in the cage rotor on induction machine. *IEEE Transaction of Industry Application*, v.18 (1), pp.165-170, 1992.

Elkasabgy N. M., Eastham A. R., Dawson G. E. The detection and effects of broken bars in cage rotor induction machines. In: *Proceedings of the IEEE Workshop Electromagnetic Field Computation*, Schenectady, New York, 1986, pp.G24-G28.

Fenton, R. E., Gott, B. E. B., *et al.*, Preventative maintenance of turbine-generator stator windings. *IEEE Transaction Energy Conversion*, v.7 (1), pp. 216-222, 1992.

Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C., Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques. *IECON Proceedings Industrial Electronics Conference*, 1998, pp. 1966-1973.

Finley, W. R., Burke, R. R. Troubleshooting motor problems. *IEEE Transaction on Industrial Applications*, v.30 (5), pp. 1383-1397, 1994.

França Jr., H., Souza, M. P., Filho, F. M. Sistemas especialistas para dimensionamento de chavetas e estrias. *Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, 1999.

Filho, F. M., Avilés, A. E. L. Sistemas Especialistas - Dimensionamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos. *Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, 1999.

Filho, F. M., Ascolesi, A. F. S. Sistemas Especialistas - Especificação de parafusos de união. *Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, 1999.

Filho, P. C. M. L., Brito, J. N., Baccarini, L. M. R., Álvares, P. A. S. e Braga, L., Plano de manutenção preditiva para o maquinário da planta unidade *Motor Fire*, Seminário de Confiabilidade, Tecém - Tecnologia Empresarial Ltda., pp. 1-10, 2000.

Filho, P. C. M. L, Programa de manutenção preditiva da planta unidade *Motor Fire* Unidade 7514, *Relatório de Estágio Supervisionado*, FUNREI, 2001, 110p.

Goode, P. V., Chow, M-Y. Using a neural/fuzzy systems to extract heuristic knowledge of incipient in induction motors: Part I - Methodology. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, v. 42 (2), pp. 131-138, 1995[a].

Goode, P. V., Chow, M-Y. Using a neural/fuzzy systems to extract heuristic knowledge of incipient in induction motors: Part II - Application. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. v. 42 (2), pp. 139-146, 1995[b].

Goode, P. V., Chow, M-Y. Neural/Fuzzy systems for incipient detection in induction motors. In: Proceedings. IECON'93, Honolulu, HI, Nov, pp.332-337, 1993.

Gomes, H. S. B. *Contribuições para o desenvolvimento de um sistema especialista em diagnose de máquinas rotativas*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1995, 96 p. Dissertação (Mestrado).

Gulez, K., Karlik, B. and Ustun, V. S. designing artificial neural networks for fault detection in induction motors with the TMS320C30 DPS. In*: First European DSP Education and Research Conference, SPRA333*, 1996, September, Paris.

Gupta, B. Y., Culbert, I. M. Assessment of insulation condition in rotating machine stators. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, v.7 (3), pp. 500-505, 1993[a].

Haykin, S. *Redes Neurais: princípios e prática*. 2.ed. Bookman, 2001.

Hernandez, C. E., Fernandez, R. Multilayer feedforward weight initialization. In: *Proceedings of International Conference on Neural Networks*, 2001, v.1, pp.166-170.

Hertz, J., Krogh, A., Palmer, R. G. *Introduction to the theory of neural computation*. Singapore: Addison-Wesley Publishing Company, 1991.

Hollan, J. D., Hutchins, E. L., Weitzman, L. STEAMER: an interactive inspectable simulation-based training system. *The AI Magazine*, v.5 (2), 1984.

Institute Engineers Electrical and Electronic. IEEE Committee Report, 1974.

Institute Engineers Electrical and Electronic. IEEE Standard 493, 1980.

Iisakkala, J., Pekola, J. ABB Motors Oy. *Measurement Report 140598*. 1998, 5p.

Ishikuza, M., Fu, K. S., Yao, J. T. P. Inexact inference for rule-based damage assessment of existing structure. *Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vancouver, August, 1981.

Júnior, O. V. A. J. Detecção de problemas em motores elétricos através da análise de vibração e análise de corrente. *Relatório Final de Iniciação Científica*, Projeto FUNREI/PIBIC/CNPq, 1998, 125p.

Kim, Y. K., Ra, J. B. Weight value initialization for improving training speed in backpropagation network. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 1991, v.3, pp.2396-2401.

Kharparde, S. A., Jadid, S. An expert system for fault diagnosis and restoration of Iron's 400 KV network. *Engineering Intelligent Systems*, v.5 (6), pp.107-114, 1997.

Kliman G. B. The detection of faulted rotor bars in operating induction motors. In: *Proceeding International Conference of Electric Machines (ICEM'86)*, Munich, Germany, 1986, pp. 500-502.

Kliman G. B. Koegl R. A., Stein J., Endicott R. D., Madden M. W. Noninvasive detection of broken bars in operating induction motors. *IEEE Transaction Energy Conversion*, v.3 (4), pp. 873-874, 1989.

Kolen, J. F., Pollack, J. B. Back propagation is sensitive to initial conditions. *Technical Report TR 90-JK-BPSIC*, 1990.

Kowalski, A. *et al.* PITCH Expert - A Problem-solving system for kraft mills. *The AI Magazine*, v.14, pp. 43-60, 1990.

Krost, G., Rumpel, D., Spanel, U., Müller, C., Ju, K. Autonomous expert system operation in electric energy systems. *Engineering Intelligent Systems*, vol.6 (1), pp.19-27, 1998.

LaForte, J. T., McCoy, R. M., *et al.* Impulse voltage withstand capability of rotating machine insulation as determined from model specimens. *IEEE Transaction Energy Conversion*, v.3 (1), 1988.

Leonard, R. A., Thomson, W. T. Vibration and Stray Flux Monitoring for Unbalance Supply and Inter-turn Winding Fault Diagnosis in Induction Motors. *British Journal of NDT*, pp.211-215, 1986.

Lépore, F. P., Santos, M. B. Modal parameteres extraction using wavelets, *XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Águas de Lyndoia, São Paulo, Brasil, Proc. In CDROM, 1999.

Lépore, F. P., Santos, M. B., Oliveira, A. G. Detecção de defeitos em máquinas rotativas utilizando redes neurais e sinais de vibração tratados utilizando wavelets. *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Natal, Brasil, Proc. In CDROM, 2000.

Li, B., Goddu G., Chow, M-Y. Knowledge based technique to enhance the performance of neural network based motor fault detectors. *Proceedings of the IECON'97 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, 1997, v.3, pp.1113-1118.

Lloyd, B. A., Stone, G. C., Stein, J. Development of an expert system to diagnose motor insulation condition. *Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (Cat. No.91CH3077-5), v.1, p. 87-93, 1991.

Lowther D. A., Silvester P. P. *Computer-aided design in magnetics*. New York: Springer-Vertag, 1986.

Maier, R. Protection of squirrel-cage induction motor utilizing instantaneous power and phase information. *IEEE Transactions on Industry Application*. v.28 (2), pp.376-380, 1989.

Marcus, S. J. Computer systems applying expertise. *The New York Times*. August 29, 1983.

Mead, C. A. *Analog VLSI and Neural Systems*. Reading: MA Addison-Wesley.

Minsky, M. *A framework for representing knowledge*. Reading in Cognitive Science, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., pp. 156-188, 1988.

Mirshawka, V. *Manutenção Preditiva*. São Paulo: Makron Books, 1991, Caso N^0 12, Sistema Especialista de Análise de Vibração - EXPERTEC, pp.283-295.

Molinari, R. *Sistema especialista para projeto de engrenagens retas e helicoidais*. São Paulo: Escola politécnica, Universidade de São Paulo, 1994, 102 p. Dissertação (Mestrado).

Murry, R. J., Mitchell B. F. Cost savings from a practical predictive maintenance program. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1994, pp. 206-209.

Nelson, W. R. REACTOR - An expert system for diagnosis and treatment of nuclear reactor accidents. *Proceedings AAAI-82*, pp. 296-301, 1982.

Nguyen, D., Widrow, B. Improving the learning speed of two-layer neural networks by choosing initial values of the adaptive weights. In: *Proceedings of the International Joint Conference Neural Networks*, 1990, v.3, pp.21-26.

Nogueira, H. M., Silva, R. B. A., Alcântara, J. F., Andrade, R. F. Expert SINTA. *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Software*, São Carlos, SP, 1996.

Oliveira, A. G. *Técnicas de caracterização de excitações em máquinas rotativas*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 1999, 207p. Tese (Doutorado).

Pailetti, G. J., Rose, A. Improving existing motor protection for medium voltage motors. *IEEE Transaction on Industry Applications*, v.25, (3), pp. 456-464, 1989.

Penman, J., Stavrou, A. Broken rotor bars: their effects on the transient performance of induction machines. In: *Proceeding of IEE Electronic Power Apply*, 1996, v.143 (6) pp.449-457.

Rabuske, R. A. *Inteligência Artificial*. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, Cap. 10, Alguns Sistemas Especialistas, pp.215-230.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Penman, J., Dey, M..N., Tait, A.J., Bryan, W. E. Condition monitoring of electrical drives. In: *Proceeding of IEEE*, 1986, v.1333 (B), pp.142-148.

Penman, J., Sedding, H. G. Lloyd, B.A., Fink, W. T. Detection and location of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors. IEEE/PES 1994 Meeting, New York, WM 105-7 EC, 1994.

Reason, J. Boost availability with up-to-date maintenance techniques. *Electrical World*, 1988.

Riley, C. M., Lin, B. K., Habetler, T. G. and Kliman, G. B. Stator current harmonics and their causal vibrations: a preliminary investigation of sensorless vibration monitoring applications. *IEEE Transaction on Industry Applications*, v.35, (1), pp. 94-99, 1999.

Sanseverino M., Cascio F. Model-based diagnosis for automotive repair. *Expert Systems*, November/December, pp.33-37.

Santos, M. G. *Curso de análise e diagnóstico de vibração em motores elétricos*. TECÉM - Tecnologia Empresarial Ltda., Belo Horizonte, MG, 2000.

Sen, P. C., *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc., 1997, 613 p.

Schoen, R. R., Lin, B. K., Habetler, T. G., Schlag, J. H., Farag, S. An unsupervised, on-line system for induction motor fault detection using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industry Application*. v.31 (6), pp. 1280-1286, 1995.

Schump, D. E. Reliability testing of electrical motor. *IEEE Transactions on Industry Application*. v.25 (3), 1989.

Siyambalapitiya, D. J. T., Maclaren, P. G. Reliability improvement and economic benefits of on-line monitoring systems for large induction machines. *IEEE Transaction on Industry Applications*, v.6, (6), pp. 1018-1025, 1990.

Soody, A. K., Fash, A. A., *et al.* Engine fault analysis Part I: Statistical methods. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, v.32, (4), 1985.

Soody, A. K., Fash, A. A., *et al.* Engine fault analysis Part II: Parameter estimation approach. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, v.32 (4), 1985.

Sottile, J. Jr., Kohler, J. L. Ao on-line method to detect incipient failure of turn insulation in random-wound motors. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, v.8 (4), pp. 762-768, 1985.

Spandri, R. Introdução a Redes Neurais. *Revista Controle & Instrumentação*, Janeiro, pp. 68-73, 2000,

Tavner, P. J., Penman, J. Condition monitoring of electrical machines. *Research Studies Press Ltd. John & Sons Inc.* 1989.

Teive, R. C. G. *Planejamento da expansão da transmissão de sistemas de energia elétrica utilizando sistemas especialistas.* Universidade Federal de Santa Catarina, 1997, 112p. Dissertação (Mestrado).

Thimm, G., Fiesler, E. Hight-order and multilayer perceptron initialization. *IEEE Transaction Neural Networks*, v.8 (2), pp.349-359, 1997.

Timperley, J. E. Incipient fault identification through neural RF monitoring of large rotating machines. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, v. 102 (3), 1983.

Timperley, J. E., Michalec, J. R. Estimating the remaining service life of asphalt-mica stator insulation. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, v. 9 (4), pp. 686-693, 1994.

Trutt, F. C., Cruz, C. S. Prediction of electric behavior in deteriorating induction motors. *IEEE Transactions on Industry Application.* v. 29 (4), pp. 1239-1243, 1993.

Urcia J. A., Ramirez, R. López, A. A. Metodologías de diagnóstico de fallas en el motor de inducción trifásico. *Energía y Mecánica*, pp.21-26.

Underwood, W. E. A CSA model-based power plant consultant. *Proceedings AAAI-82*, pp. 302-305, 1982.

Verri, Luiz A. Técnicas que podem reduzir as queimas de motores elétricos. *Revista Eletricidade Moderna*, pp. 66-74, 1996.

VDI Handbook on Vibration Technology, Düsseldorf, *VDI 2056 Criteria for Assessing Mechanical Vibrations of Machines*, 1964, 12p.

Walter, P. Preventing motor shaft current bearing failures. *Plant Engineering*, Oct. 4, 1990.

Waterman, D. A. *A guide to expert systems.* Addison-Wesley Publishing Company, 1986.

Walliser, R. F., Landy, C. F. Determination of interbar current effects in the detection of broken rotor bars in squirrel cage induction motors. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, v.9 (1), pp. 152-158, 1994.

Wessels, L. F. A., Barnad, E. Avoiding false local minimal by proper initialization of connections. *IEEE Transaction Neural Networks*, v.5, pp.899-905, 1992.

Weymaere, N., Martens, J. P. On the initialization and optimization of multilayer perceptrons. *IEEE Transaction Neural Networks*, v.5, pp.738-751, 1994.

WEG. *Catálogo geral motores elétricos*, Modelo 050.01/032000, 1998, 130p.

Williamson, S., Smith, A. C. Steady state analysis of 3-phase cage motors with rotor-bar and end-ring faults. *Proceeding Institute of Elec. Eng.*, 1982, v.129 (3), pp. 93-100.

Anexo I

Fundamentos Básicos dos Motores de Indução Trifásicos (MIT)

I.1 A natureza do campo magnético girante

O estudo da natureza do campo girante é importante para compreensão da identificação das freqüências determinísticas relacionadas com o desequilíbrio de fase através da análise de vibração e análise de fluxo magnético.

O motor de indução trifásico trabalha com velocidade praticamente constante, sofrendo pequenas variações com a carga mecânica acoplada ao eixo. É largamente utilizado por ser adequado à quase todos os tipos de cargas encontradas na prática, sendo composto fundamentalmente de duas partes: estator e rotor.

Na Figura I.1 tem-se o estator formado por três partes distintas: carcaça que é a estrutura suporte do conjunto, núcleo de chapas magnéticas e enrolamento trifásico. O enrolamento é composto de três conjuntos iguais de bobinas, um para cada fase, formando um sistema trifásico que será ligado à rede de alimentação.

O rotor é formado basicamente por um eixo que transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor, por um núcleo de chapas magnéticas e enrolamentos. Com relação aos enrolamentos do rotor pode ser de dois tipos: rotor gaiola e rotor de anéis (bobinados).

Na Figura I.2 tem-se o rotor de gaiola constituído por um conjunto de barras não isoladas e interligadas por anéis em curto circuito.

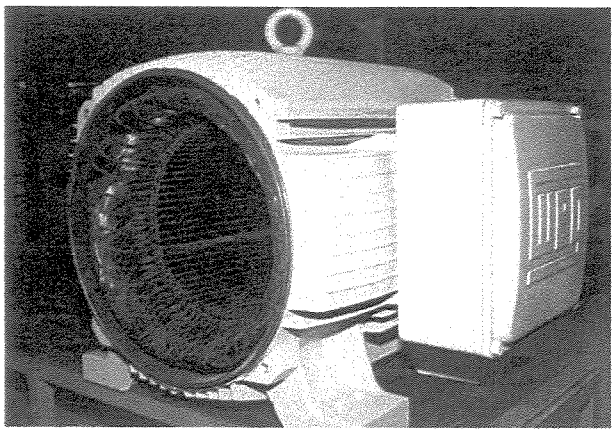


Figura I.1 - Estator da máquina de indução trifásica.

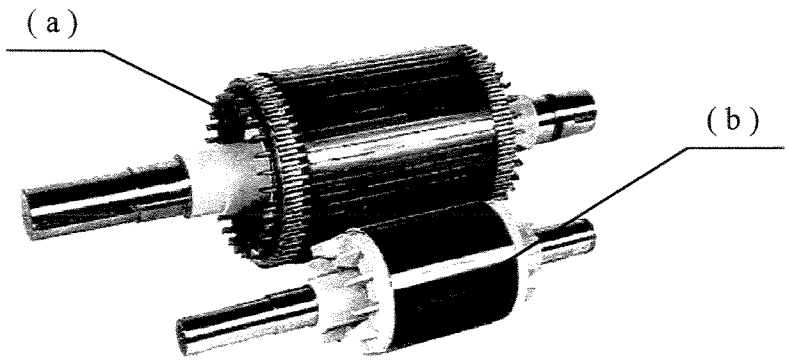


Figura I.2 - Rotor de gaiola: (a) dupla de cobre e latão e (b) rotor com gaiola de alumínio.

Na Figura I.3 tem-se a vista explodida do motor de indução trifásico, rotor gaiola, com a identificação das suas partes principais.

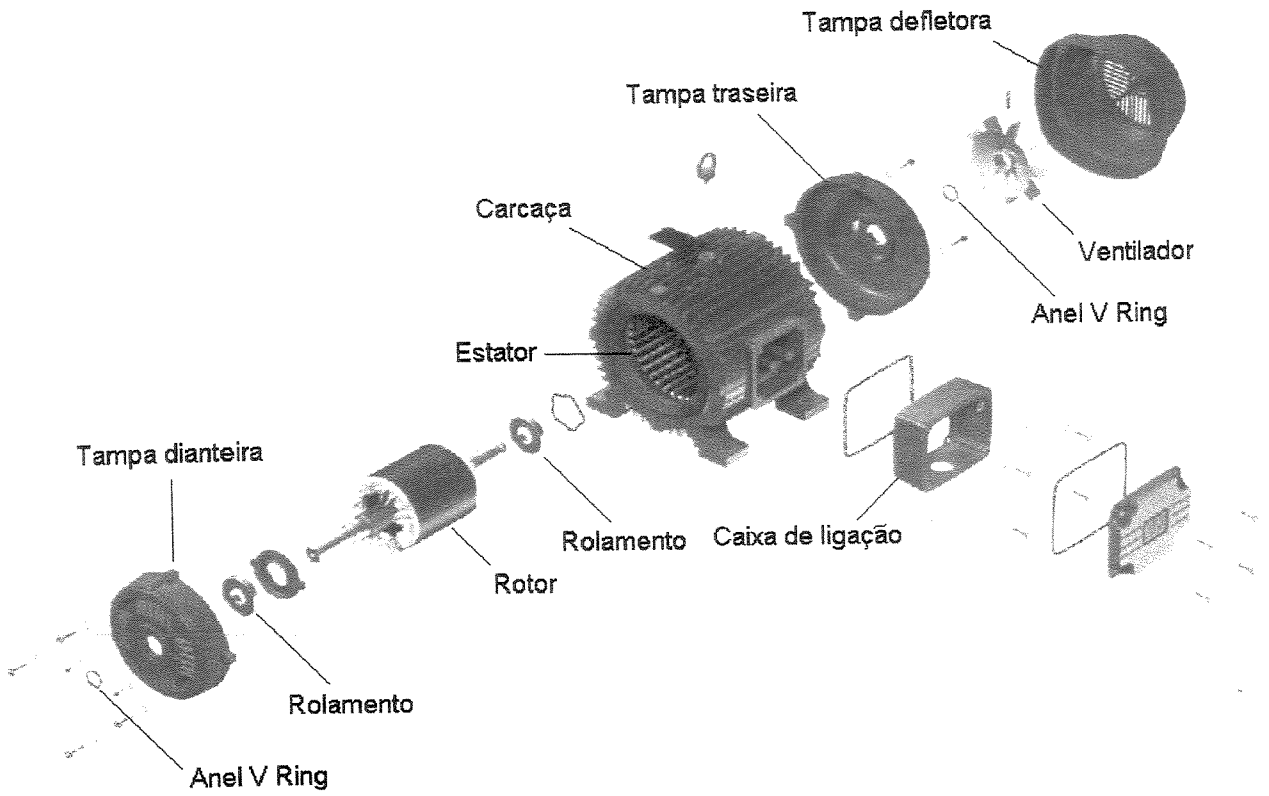


Figura 1.3 - Vista explodida do motor de indução trifásico de rotor gaiola.

Um campo magnético girando numa velocidade síncrona e com amplitude constante, pode ser produzido por qualquer grupo polifásico de enrolamentos deslocados no espaço da armadura. Para isto, as correntes que circulam através dos enrolamentos também devem estar defasadas no tempo.

No caso dos motores de indução trifásicos são necessários três enrolamentos individuais e idênticos. Eles têm de ser deslocados no estator de 120° elétricos onde circulam correntes, também defasadas de 120° no tempo, ou fase.

Na Figura I.4 tem-se o deslocamento espacial de um enrolamento trifásico concentrado típico, onde aa' representa a Fase A, bb' a Fase B e cc' a Fase C.

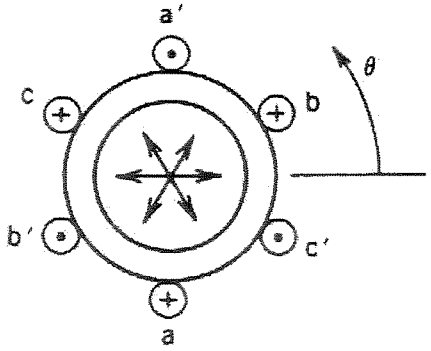


Figura I.4 - Deslocamento espacial dos enrolamentos aa', bb' e cc'.

Quando a corrente flui através de um destes enrolamentos, ela irá proporcionar o surgimento de uma força magnetomotriz (f_{mm}) senoidal, centrada no eixo da bobina correspondente. Se uma corrente alternada flui através da bobina, esta irá produzir uma fmm pulsante, onde sua amplitude e direção dependem do valor instantâneo da corrente que flui através do enrolamento.

Na Equação I.1 tem-se o valor das correntes i_a, i_b e i_c, para um sistema de alimentação trifásico balanceado fluindo através dos enrolamentos, onde I_m é a amplitude da corrente, ω é a velocidade angular e t o tempo. Estas correntes instantâneas são mostradas na Figura I.5.

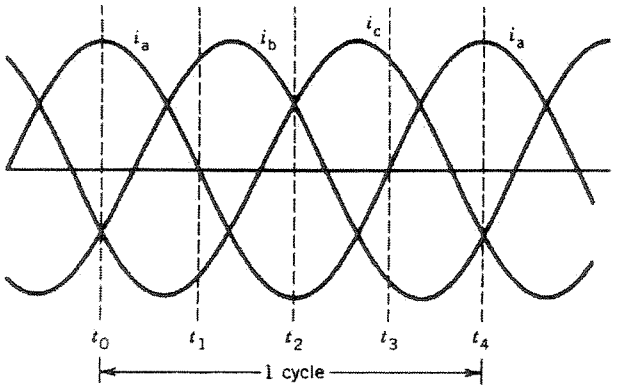


Figura I.5 - Correntes instantâneas i_a, i_b e i_c, Sen (1996).

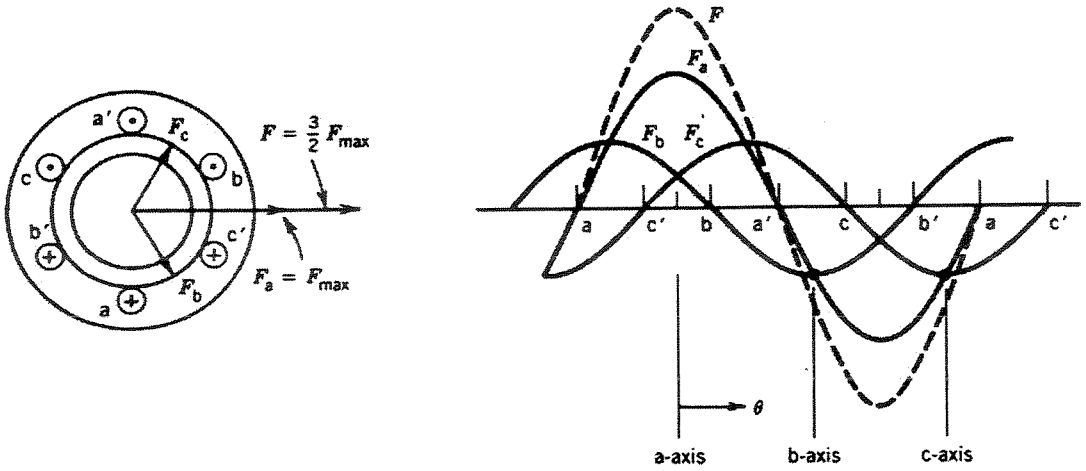
$$i_a(t) = I_m \cos \omega t$$

$$i_b(t) = I_m \cos (\omega t - 120°) \qquad \text{(I.1)}$$

$$i_c(t) = I_m \cos (\omega t + 120°)$$

No instante t_0, a fase A tem valor máximo num determinado sentido e as correntes nas bobinas das fases B e C têm exatamente $F_{max}/2$ do seu valor máximo no sentido oposto.

Na Figura I.6 tem-se os fluxos produzidos por estes condutores nas diversas fases, onde F_b e F_c em F_a produzem um fluxo constante F. As componentes de quadratura dessas projeções cancelam-se entre si, uma vez que elas são iguais e opostas em sua posição de fase.



(a) fluxo produzido no instante t_0 e t_4. (b) componentes da fmm no instante $t = t_0$.

Figura I.6 - Fluxos produzidos pelos condutores nas diversas fases, Sen (1996).

Analisando-se o mesmo instante de tempo t_0 e considerando-se que o motor está sujeito a um desequilíbrio de fase ($V_{AB} = V_{CA} \neq V_{BC}$), consequentemente as correntes I_m da Equação (I.1) não serão mais iguais entre si. O campo magnético resultante irá sofrer alterações em suas características uma vez que as componentes em quadratura dos fluxos F_c e F_b não irão mais se anular.

Estas alterações provocam um desbalanceamento no campo magnético resultando vibrações radiais em duas vezes a freqüência de linha ($2 \times f_l = 120$ Hz).

O rotor se acha imerso no campo girante produzido pelas correntes no estator. Nos condutores do rotor, cortados pelo fluxo do campo girante, são induzidas forças eletromotrizes (f_{em}) que dão origem às correntes. Estas correntes reagem sobre o campo girante produzindo um

conjugado motor que faz o rotor girar na freqüência de rotação (f_r), no mesmo sentido do campo e modulando com 2 x f_l, caracterizando assim o desequilíbrio de fases.

Estas freqüências foram observadas através dos espectros de vibração e serão chamadas de freqüências determinísticas do desequilíbrio de fase através da análise de vibração.

Na análise de fluxo, o desequilíbrio de fase se manifesta com alterações nas amplitudes de ± 1 x f_r; 2 x f_r; 3 x f_r e 4 x f_r modulando com a f_l. Estas freqüências foram observadas a partir de um espectro de referência (*base line*) e serão chamadas de freqüências determinísticas do desequilíbrio de fase através da análise de fluxo magnético.

I.2 Velocidade síncrona e números de pólos

A velocidade de rotação do campo girante define a velocidade síncrona do motor. Sendo f a freqüência da corrente que circula nos enrolamentos do estator, em ciclos por segundo (Hertz), para uma máquina de 2 pólos tem-se a Equação I.2.

$$n_l = 60\ f \ \text{(rpm)} \qquad \text{(I.2)}$$

Como os enrolamentos podem ser construídos com um número maior de pares de pólos que se distribuirão alternadamente, norte e sul, ao longo da periferia do núcleo magnético, tem-se a Equação I.3, onde n_s é a velocidade síncrona (rpm). Os enrolamentos estatóricos do motor de indução trifásico estão alojadas nas ranhuras e podem formar uma máquina de número de pólos múltiplo de dois. Para as freqüências usuais, as velocidades síncronas estão indicadas na Tabela I.1

$$n_s = 120\frac{f}{p} \qquad \text{(I.3)}$$

Tabela I.1 - Velocidade Síncrona (n_s)

Número de pólos	Rotação síncrona por minuto (rpm)	
	60 Hertz	50 Hertz
2	3.600	3.000
4	1.800	1.500
6	1.200	1.000
8	900	750

I.3 Escorregamento

Devido a ação da carga, o motor assíncrono tem rotação menor do que a do campo girante, mantendo um escorregamento magnético. As correntes induzidas no rotor circulam com freqüência igual àquela em que o campo corta os condutores do rotor. Consequentemente, os efeitos dinâmicos são gerados por três freqüências: a síncrona do campo, a de rotação do rotor e das correntes induzidas no rotor.

O escorregamento (s) é a diferença entre a velocidade síncrona (n_s) e a velocidade nominal (n_n) e pode ser expresso por velocidade de escorregamento em rpm, por fração ou porcentagem da velocidade síncrona, Equação (I.4).

$$s = n_s - n \qquad \text{velocidade de rotação}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \qquad \text{escorregamento unitário} \qquad \text{(I.4)}$$

$$s^* = \frac{n_s - n}{n_s} 100 \ (\%) \qquad \text{escorregamento percentual}$$

A velocidade nominal do motor em rpm é dada pela Equação (I.5) e a freqüência de escorregamento em Hz (f_s) é dado pela Equação (I.6), onde f_l = 60 Hz é a freqüência de linha, Sen (1996).

$$n = n_s \left(1 - \frac{s^*}{100} \right) \qquad \text{(I.5)}$$

$$f_s = s^* \, f_l \qquad \text{(I.6)}$$

Anexo II

Regras do Sistema Especialista *SE_MIT*

Regra 1
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos < 0,5mm/s
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor não apresenta Defeito de Origem Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico = Possibilidade de haver Defeitos Mecânicos de Baixa Severidade. CNF 100%

Regra 2
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes menores que 30% da Amplitude em 1 x f_r, com decaimento linear ou exponencial.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico = Possibilidade de haver Folga Mecânica. Realize novos testes ! CNF 100%

Regra 3
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r

E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes menores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%

Regra 4
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes menores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%

Regra 5
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x fr ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
OU Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes menores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%

Regra 6
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
OU Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 3 x f_r
OU Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 3 x f_r
OU Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
OU Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 1 x f_r
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desalinhamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = Possibilidade de haver Folga Mecânica. Realize novos testes!
CNF 100%

Regra 7

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x fr ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes maiores que 30% da Amplitude em 1 x f_r, com decaimento linear ou exponencial.
OU Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes maiores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%

Regra 8

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 2 x f_r
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 1 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
OU Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%

Regra 9

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes maiores que 30% da Amplitude em 1 x fr.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%

Regra 10

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 3 x f_r

E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes maiores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%

Regra 11
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos < 0,5mm/s
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor não apresenta Defeito de Origem Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = Possibilidade de haver Defeitos Mecânicos de Baixa Severidade. CNF 100%

Regra 12
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes menores que 30% da Amplitude em 1 x f_r, com decaimento exponencialmente.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = Possibilidade de haver Folga Mecânica. Realize novos testes! CNF 100%

Regra 13
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes menores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%

Regra 14
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos

E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes menores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%

Regra 15
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
OU Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes menores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%

Regra 16
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 2 x f_r r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
OU Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 3 x f_r
OU Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
OU Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
OU Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 1 x f_r
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desalinhamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = Possibilidade de haver Folga Mecânica. Realize novos testes ! CNF 100%

Regra 17
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x fr ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Níveis de Energia maiores que 30% da Amplitude em 1 x f_r, que decrescem linear ou exponencialmente.

OU Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes maiores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%

Regra 18
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 2 x f_r
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 1 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
OU Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%

Regra 19
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes maiores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%

Regra 20
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes maiores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%

Regra 21
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)

E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos < 0,5mm/s
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor não apresenta Defeito de Origem Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = Possibilidade de haver Defeitos Mecânicos de Baixa Severidade. CNF 100%

Regra 22
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes menores que 30% da Amplitude em 1 x f_r, com decaimento exponencialmente.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = Possibilidade de haver Folga Mecânica. Realize novos testes! CNF 100%

Regra 23
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes menores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%

Regra 24
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes menores que 30% da Amplitude em 1 x fr.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%

Regra 25

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
OU Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes menores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Desbalanceamento CNF 100%

Regra 26

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 3 x f_r
OU Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
OU Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 2 x f_r
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 3 x f_r
OU Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
OU Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 1 x f_r
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desalinhamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = Possibilidade de haver Folga Mecânica. Realize novos testes! CNF 100%

Regra 27

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
OU Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 3 x f_r
OU Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
OU Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
OU Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 1 x f_r
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Desalinhamento CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = Possibilidade de haver Folga Mecânica. Realize novos testes! CNF 100%

Regra 28

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes maiores que 30% da Amplitude em 1 x f_r, com decaimento exponencial.
OU Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes maiores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%

Regra 29

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 2 x f_r
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 1 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
OU Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 2 x f_r
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%

Regra 30

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 3 x f_r
E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Semelhante à Amplitude em 2 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Amplitudes maiores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%

Regra 31

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes em 1 x f_r ou harmônicos > 0,5mm/s
E Amplitude em 1 x f_r do Rotor = Maior Amplitude presente no Espectro
E Amplitude em 2 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 3 x f_r

E Amplitude em 3 x f_r do Rotor = Amplitude Menor que Amplitude em 1 x f_r
E Amplitudes dos Harmônicos de 1 x f_r = Níveis de Energia maiores que 30% da Amplitude em 1 x f_r.
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor apresenta Folga Mecânica CNF 100%

Regra 32
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E Freqüência Determinística = 120Hz e/ou presença de modulações de mais ou menos 1 x f_r ao redor de 120Hz.
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes de 120Hz ou modulações de mais ou menos 1 x f_r < 0,5mm/s
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor pode ou não apresentar Desbalanceamento de Fase. CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Possibilidade de haver Desbalanceamento de Fase. Analise posição horizontal! CNF 100%

Regra 33
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E Freqüência Determinística = 120Hz (mesmo que com baixa amplitude) e/ou presença de modulações de mais ou menos 1 x f_r ao redor de 120Hz.
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes de 120Hz ou modulações de mais ou menos 1 x f_r < 0,5mm/s
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor pode ou não apresentar Desbalanceamento de Fase CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Possibilidade de haver Desbalanceamento de Fase. Analise posição horizontal! CNF 100%

Regra 34
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E Freqüência Determinística = 120Hz e/ou presença de modulações de mais ou menos 1 x f_r ao redor de 120Hz.
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes de 120Hz ou modulações de mais ou menos 1 x f_r < 0,5mm/s
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Desbalanceamento de Fase CNF 100%

Regra 35
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E Freqüência Determinística = 120Hz e/ou presença de modulações de mais ou menos 1 x f_r ao redor de 120Hz.
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes de 120Hz ou modulações de mais ou menos 1 x f_r > 0,5mm/s
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento de Fase CNF 100%

Regra 36
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear

E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E Freqüência Determinística = 120Hz e/ou presença de modulações de mais ou menos 1 x f_r ao redor de 120Hz.
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes de 120Hz ou modulações de mais ou menos 1 x f_r > 0,5mm/s
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento de Fase CNF 100%

Regra 37
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E Freqüência Determinística = 120Hz e/ou presença de modulações de mais ou menos 1 x f_r ao redor de 120Hz.
E Característica Geral do Espectro = Amplitudes de 120Hz ou modulações de mais ou menos 1 x f_r > 0,5mm/s
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento de Fase CNF 100%

Regra 38
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral em 2 x f_s bem definida (localizam-se ambas amplitudes)
OU Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral em 2 x f_s bem definida (localiza-se só uma amplitude)
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%

Regra 39
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Ausência de Banda Lateral em 2 x f_s (Impossível localização das amplitudes)
OU Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral não definida em 2 x f_s (dificuldade de localização)
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor pode ou não apresentar Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Aplique *zoom* em torno de 1 x f_r. Havendo amplitudes, utilize AC ou AF CNF 100%

Regra 40
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_r ao seu redor) = Menor que 30,00 dB
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 41
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 30,00 dB e < 37,00 dB
OU (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 37,00 dB e < 50,00 dB

E Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral em 2 x f_s bem definida (localizam-se ambas amplitudes)
OU Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral em 2 x f_s bem definida (localiza-se só uma amplitude)
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor pode ou não apresentar Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 42
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 37,00 dB e < 50,00 dB
OU (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 30,00 dB e < 37,00 dB
E Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Ausência de Banda Lateral em 2 x f_s (Impossível localização das amplitudes)
OU Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral não definida em 2 x f_s (dificuldade de localização)
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 43
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado da Ventoinha (AVV)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = Maior que 50,00 dB
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 44
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = Menor que 30,00 dB
OU (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 30,00 dB e < 37,00 dB
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 45
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 37,00 dB e < 50,00 dB
E Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral em 2 x f_s bem definida (localizam-se ambas amplitudes)
OU Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral em 2 x f_s bem definida (localiza-se só uma amplitude)
ENTÃO

Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor pode ou não apresentar Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%

Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 46

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 37,00 dB e < 50,00 dB
E Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Ausência de Banda Lateral em 2 x f_s (Impossível localização das amplitudes)
OU Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral não definida em 2 x f_s (dificuldade de localização)
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 47

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Radial Vertical, Lado do Acoplamento (AVA)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = Maior que 50,00 dB
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 48

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = Menor que 30,00 dB
OU (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 30,00 dB e < 37,00 dB
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 49

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = Maior que 50,00 dB
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 50

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)

OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 37,00 dB e < 50,00 dB
E Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Ausência de Banda Lateral em 2 x f_s (Impossível localização das amplitudes)
OU Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral não definida em 2 x f_s (dificuldade de localização)
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 51
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado da Ventoinha (AAV)
OU Posição dos Sensores = Direção Axial, Lado do Acoplamento (AAA)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 37,00 dB e < 50,00 dB
E Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral em 2 x f_s bem definida (localizam-se ambas amplitudes)
OU Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral em 2 x f_s bem definida (localiza-se só uma amplitude)
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor pode ou não apresentar Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 52
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = Menor que 30,00 dB
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 53
SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 30,00 dB e < 37,00 dB
OU (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 37,00 dB e < 50,00 dB
E Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral em 2 x f_s bem definida (localizam-se ambas amplitudes)
OU Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral em 2 x f_s bem definida (localiza-se só uma amplitude)
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor pode ou não apresentar Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 54

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 30,00 dB e < 37,00 dB
OU (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 37,00 dB e < 50,00 dB
E Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Ausência de Banda Lateral em 2 x f_s (Impossível localização das amplitudes)
OU Bandas Laterais (Freq. de Rotação) = Presença de Banda Lateral não definida em 2 x f_s (dificuldade de localização)
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 55

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
E Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado da Ventoinha (AHV)
OU Posição dos Sensores = Direção Radial Horizontal, Lado do Acoplamento (AHA)
E (AV) Diferença entre Amplitudes (1 x f_r e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = Maior que 50,00 dB
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Para confirmar diagnóstico, realize testes em AC, e/ou AF CNF 100%

Regra 56

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = dB
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = Não se utiliza AV em 'dB' para diagnóstico de falhas mecânicas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = Utilize AV em 'linear' para diagnóstico de defeitos mecânicos CNF 100%

Regra 57

SE Tecnologia = Análise de Vibração
E Eixo das Amplitudes = Linear
E Freqüência Determinística = 120Hz (mesmo que com baixa amplitude) e/ou presença de modulações de mais ou menos 1 x f_r ao redor de 120Hz.
E Freqüência Determinística = 1 x f_r e seus Harmônicos
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = Em AV, Freqüência determinística para falhas mecânicas é 1 x f_r CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = O Motor não deve apresentar Defeitos Mecânicos CNF 100%

Regra 58

SE Tecnologia = Análise de Corrente
OU Tecnologia = Análise de Fluxo Magnético
ENTÃO
Falha de Origem Mecânica no Motor = AC e AF não estão sendo usadas na detecção de falhas mecânicas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Mecânico = Utilize AV em 'linear' para diagnóstico de defeitos mecânicos CNF 100%

Regra 59
SE Tecnologia = Análise de Corrente
OU Tecnologia = Análise de Fluxo Magnético
E Eixo das Amplitudes = Linear
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = Não se utiliza AF e AC em 'linear' para detectar falhas elétricas CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Utilize AC ou AF em 'dB' para diagnóstico de defeitos elétricos CNF 100%

Regra 60
SE Tecnologia = Análise de Fluxo Magnético
E Eixo das Amplitudes = dB
E Tendência = A amplitude na Freq. de Rede + 2 x f_r (~117Hz) não se altera
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor pode ou não apresenta Desbalanceamento de Fase CNF 100%

Regra 61
SE Tecnologia = Análise de Fluxo Magnético
E Eixo das Amplitudes = dB
E Tendência = Aumento da amplitude na Freq. de Rede + 2 x f_r (~117Hz)
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor apresenta Desbalanceamento de Fase CNF 100%
Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Acompanhar curvas de tendências CNF 100%

Regra 62
SE Tecnologia = Análise de Fluxo Magnético
E Eixo das Amplitudes = dB
E (AF) Diferença entre Amplitudes (60Hz e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = Maior que 27,00 dB
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%

Regra 63
SE Tecnologia = Análise de Fluxo Magnético
E Eixo das Amplitudes = dB
E (AF) Diferença entre Amplitudes (60Hz e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = Menor que 27,00 dB
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%

Regra 64
SE Tecnologia = Análise de Corrente
E Eixo das Amplitudes = dB
E (AC) Diferença entre Amplitudes (60Hz e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = Maior que 49,00 dB
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%

Regra 65
SE Tecnologia = Análise de Corrente
E Eixo das Amplitudes = dB
E (AC) Diferença entre Amplitudes (60Hz e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = Menor que 41,00 dB
ENTÃO
Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%

Regra 66

SE Tecnologia = Análise de Corrente
E Eixo das Amplitudes = dB
E (AC) Diferença entre Amplitudes (60Hz e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 41,00 dB e < 49,00 dB
E Bandas Laterais (Freq. de Rede) = 2 ou menos Bandas Laterais em 2 x f_s em torno de 60 Hz
ENTÃO

Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%

Regra 67

SE Tecnologia = Análise de Corrente
E Eixo das Amplitudes = dB
E (AC) Diferença entre Amplitudes (60Hz e Maior Amplitude em 2 x f_s ao seu redor) = > 41,00 dB e < 49,00 dB
E Bandas Laterais (Freq. de Rede) = 3 ou mais Bandas Laterais em 2 x f_s em torno de 60 Hz
ENTÃO

Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor pode ou não apresentar Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%

Confirmação do Diagnóstico Elétrico = Quanto < for diferença em dB, > será o número de barras quebradas ou trincadas. CNF 100%

Anexo III

Especificações Técnicas das Tecnologias *CSI*

III.1 Analisador *UltraSpec 8000*

- Dimensões físicas: comprimento = 27 cm (10.5 inches), largura = 17 cm (6.8 inches), espessura = 4 cm (1.8 inches) e peso = 1,9 Kg (5.0 pounds).
- Temperatura: -10^0 a 50^0 C (15^0 a 120^0 F).
- Umidade relativa: 0 a 95%, não condensada.
- Bateria: recarregável, ± 12 V NiCad.
- Capacidade: 12 ampère-hora.
- Tempo de recarregamento: 14 a 16 horas.
- Tempo de operação: 10 horas para uso normal com carga máxima.
- Visor LCD: área visível = 7 x 13 cm (2.75 x 5.0 inches), resolução dot = 128 vertical x 256 horizontal *pixels* e texto alfanumérico (8 linhas x 42 caracteres).

III.2 *UltraSpec Laser Alignement*

- Diodo laser: In-Ga-Al-P, Classe II, Visível.
- Comprimento de onda: 670 nm (típica).
- Potência de saída: < 1.0 mW.
- Classe de segurança do laser: Classe 2, FDA 21 CFR 1040-10 e 1040-11.
- Tamanho do alvo: 10 mm por 10 mm (0.394 por 0.394 inches).
- Resolução: 0.0001 inch/0.0025 mm.
- Linearidade: maior que 1,5%.

- Inclinômetro: interno e automático.
- Eixos de medidas: total de 6, 2 deslocamentos e 1 rotação do eixo para cada cabeçote laser.
- Temperatura de operação: 32^0 a 115^0 F (0^0 a 45^0 C).
- Temperatura de armazenamento: 14^0 a 140^0 F (-10^0 a 60^0 C).
- Umidade: 10 a 95%.
- Bateria: NiCad.
- Métodos de alinhamento a laser disponíveis: varredura automática, varredura manual, 4 pontos automático, 4 pontos manual, direto.
- Resolução: entrada = 0.1 mil (0.002 mm), saída = 0.1 mil (0.002 mm) e máquina em movimento = 1 mil (0.025 mm).

III.3 *UltraSpec Analyze* e *UltraSpec Motor*

- Nível do fundo de escala da entrada: sensor ligado = ± 9 volts e sensor desligado = ± 21 volts.
- Impedância de entrada: maior que 150 K ohms.
- Sinal dinâmico: canal simples.
- Sinal DC: canal simples.
- RPM/Sinal tacômetro: pulso TTL.
- Entrada teclado: capacidade alfanumérica máxima.
- Entrada do sensor de temperatura: sensor infravermelho *CSI* ou termopar.
- Análise de freqüência:
  - conversor A/D: 12 bits de precisão;
  - faixa dinâmica: maior que 70 dB;
  - número de médias: 1 a 9999;
  - resolução: 100, 200, 4000, 800, 1600 ou 3200 linhas;
  - alta freqüência: 10 Hz a 30 kHz;
  - distorção de harmônicos: menor que 55 dB.