

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

Acompanhamento Preditivo de Motores de Indução Trifásicos Através da Análise de Fluxo Magnético

**Autor: Paulo Cezar Monteiro Lamim Filho
Orientador: Robson Pederiva**

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

L185a Lamim Filho, Paulo César Monteiro
Acompanhamento preditivo de motores de indução
trifásicos através da análise de fluxo magnético / Paulo
César Monteiro Lamim Filho.--Campinas, SP: [s.n.],
2003.

Orientador: Robson Pederiva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Motores elétricos de indução. 2. Campos
magnéticos. 3. Motores – 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**

Acompanhamento Preditivo de Motores de Indução Trifásicos Através da Análise de Fluxo Magnético

Autor: **Paulo Cezar Monteiro Lamim Filho**
Orientador: **Robson Pederiva**

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

Dissertação de mestrado acadêmico apresentado à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2003
S.P. - Brasil

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Acompanhamento Preditivo de Motores de Indução Trifásicos Através da Análise de Fluxo Magnético

Autor: Paulo Cezar Monteiro Lamim Filho

Orientador: Robson Pederiva

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

Prof. Dr. Vicente Lopes Junior
UNESP - Universidade Estadual Paulista

Prof. Dr. Pablo Siqueira Meirelles
UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 28 de fevereiro de 2003

Este trabalho é dedicado à

memória de meu pai, Paulo César Monteiro
Lamim;
minha mãe, Irene Maria Rodrigues Lamim;
minha namorada, Lígia Pereira Assis;
ao amigo e professor, Dr. Jorge Nei Brito,
por tudo que significam para mim.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, o Professor Robson Pederiva pela orientação, amizade, confiança e oportunidade de trabalharmos juntos. Sua dedicação, a atenção dispensada aos seus orientados e sua vontade de trabalhar constituem um exemplo que procurarei seguir durante toda minha vida.

Às minhas irmãs (Gracelaine e Marluce), aos pais da minha namorada "Lígia" (Sr. Sebastião Nicomedes e Dona Ilza), ao Rangel e ao padrinho (Amin Feres) pelo exemplo, carinho e incentivo.

À Cláudia, Júlia e Lucas que sempre me receberam com as portas abertas em Campinas e São João Del Rei e me deram todo o incentivo e apoio para concluir este trabalho.

A amiga, professora e companheira de pesquisa Lane Maria Rabelo Baccharini, pela minha formação acadêmica.

Aos professores, funcionários e colegas de pós-graduação da UNICAMP e em especial ao prof. Geraldo Roberto (Passarinho) da UFSJ, pelo convívio, amizade e aprendizado.

Ao Lasse Hansen da Vitek Consultoria Ltda., pelas valiosas discussões e sugestões.

Ao Paulo da *Computational Systems Incorporated - CSI* pelos equipamentos que foram emprestados.

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

A Deus, por todas as oportunidades que me dá na vida.

Por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

Paulo Lamim

Dever e Trabalho

*O compromisso de trabalho inclui o dever de associar-se a criatura
ao esforço de equipe na obra a realizar.*

*Obediência digna tem o nome de obrigação cumprida no
dicionário da realidade.*

*Quem executa com alegria as tarefas consideradas menores,
espontaneamente se promove as tarefas consideradas maiores.*

*A câmara fotográfica nos retrata por fora, mas o trabalho nos retrata
por dentro.*

*Quem escarnece da obra que lhe honorifica a existência,
desprestigia a si mesmo.*

*Servir além do próprio dever não é bajular e sim entesourar apoio e experiência,
simpatia e cooperação.*

*Na formação e complementação de qualquer trabalho, é preciso compreender
para sermos compreendidos.*

*Quando o trabalhador converte o trabalho em alegria, o trabalho se transforma
na alegria do trabalhador.*

*“Sinal Verde”
Chico Xavier - André Luiz*

Resumo

LAMIM FILHO, Paulo C. M., *Acompanhamento Preditivo de Motores de Indução Trifásicos através da Análise de Fluxo Magnético*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 105 p. Dissertação (Mestrado)

Um programa de manutenção preditiva deve englobar várias técnicas de monitoramento da condição do motor elétrico. Dentre elas, pode-se citar como clássicas, a análise de corrente elétrica e análise de vibrações. Entretanto, existe um grande número de dificuldades associadas com estas técnicas e, conseqüentemente, com suas aplicações práticas. Isto devido à abrangência de detecção de defeitos tais como: falhas de barras rotativas do rotor; falhas no estator; desbalanceamento de tensão e curto circuito (entre fase e entre espiras). O diagnóstico de defeitos a partir da análise de fluxo magnético tem sido proposto por fabricantes de equipamentos da área de monitoramento de máquinas. Entretanto, esta técnica não tem sido explorada com profundidade para aplicação num programa de manutenção. Este trabalho propõe a implementação de um transdutor (*bobina de fluxo*) sensível às ondas eletromagnéticas dentro dos motores de indução trifásicos, identificando as frequências determinísticas relacionadas aos defeitos comuns a estes tipos de máquinas. Os espectros coletados com este novo sensor são comparados com um sensor comercial, mostrando sua eficiência. Este estudo é uma contribuição importante, uma vez que o sensor implementado chega a ter um custo centenas de vezes menores que o sensor comercial. Outra vantagem é a possibilidade deste novo sensor ser compartilhado com qualquer analisador de sinais encontrado no mercado.

Palavras Chave

Motor de Indução Trifásico, Fluxo Magnético, Manutenção Preditiva

Abstract

LAMIM FILHO, Paulo C. M., *Predictive Accompaniment of Three-phase Induction Motors by Magnetic Flux Analysis*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 105 p. Dissertação (Mestrado)

A predictive maintenance program must include several techniques of monitoring of the electric motor's conditions. Among them, can relate techniques based on electric current analysis and vibration analysis. On the other hand there is a great number of difficulties associated with these techniques and consequently with its practical applications. For example, the ability to diagnosis some defects such as broken rotor bars, fault in the stator, unbalancing of electric tension and short circuit. The diagnosis of these excitations through the magnetic flux analysis has been proposed by the device's manufactures in the field of machinery monitoring. However, this technique has not been explored with depth for application in a maintenance program. This work considers the implementation of special sensor (flux coil) inside the three-phase induction motors which is sensitive to electromagnetic waves and permit to identify the deterministic frequencies related with these excitations. The spectra acquired with the special sensor are compared with commercial sensor showing its efficiency. These special sensor has a low cost (hundred times lower than the commercial sensor) and also can be used with every commercial signals Analyzer.

Key Words

Three-phase induction motors, magnetic flux, maintenance predictive

Índice

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	viii
Nomenclatura	ix
1 Introdução	1
2 Fundamentos Básicos de Circuitos Magnéticos	7
2.1 Relação $i - H$	7
2.2 Relação $B - H$	9
2.3 Circuito magnético equivalente	9
2.3.1 Curva de magnetização	12
2.3.2 Circuito magnético com <i>air - gap</i> (entre ferro)	13
2.4 Excitações senoidais	15
3 Fundamentos Básicos dos Motores de Indução Trifásicos (Mit)	17
3.1 Características construtivas	17
3.2 Campo magnético girante	20
3.3 Velocidade síncrona	23
3.4 Princípio do motor de indução	24
3.5 Circuito equivalente do motor de indução trifásico	25
3.6 Implementação do transdutor (bobina de fluxo)	26
3.6.1 Análise de fluxo magnético	28
3.7 Estudo das falhas introduzidas na bancada de testes	30
3.7.1 Barras quebradas	30
3.7.2 Desbalanceamento de tensão	32
3.7.3 Subtensão e sobretensão	34

3.7.4 Desbalanceamento mecânico	36
4 Bancada Experimental e Fontes de Excitação	37
4.1 Apresentação da bancada experimental	37
4.2 Detecção das excitações de origem mecânica e elétrica através da análise de vibração	40
4.2.1 Condição normal de funcionamento	41
4.2.2 Desbalanceamento de tensão	42
4.2.3 Subtensão	44
4.2.4 Sobretensão	46
4.2.5 Desbalanceamento mecânico	48
4.2.6 Barras quebradas ou trincadas	49
4.2.7 Análise dos resultados	50
4.3 Detecção das excitações de origem mecânica e elétrica através da análise de fluxo em baixa frequência	55
4.3.1 Condição normal de funcionamento	57
4.3.2 Desbalanceamento de tensão	57
4.3.3 Subtensão	58
4.3.4 Sobretensão	59
4.3.5 Desbalanceamento mecânico	60
4.3.6 Análise dos resultados	61
4.4 Detecção das excitações de origem mecânica e elétrica através da análise de fluxo em alta frequência	66
4.4.1 Condição normal de funcionamento	67
4.4.2 Desbalanceamento de tensão	67
4.4.3 Subtensão	68
4.4.4 Sobretensão	69
4.4.5 Desbalanceamento mecânico	70
4.4.6 Análise dos resultados	71
5 Barras Quebradas ou Trincadas	81
5.1 Detecção de barras quebradas ou trincadas através da análise de corrente e análise de fluxo magnético	81

5.1.1 Detecção de barras quebradas através da análise de corrente	82
5.1.2 Detecção de barras quebradas através da análise de fluxo magnético (bobina CSI)	85
5.1.3 Detecção de barras quebradas através da análise de fluxo magnético (bobina radial)	87
5.1.4 Detecção de barras quebradas através da análise de fluxo magnético (bobina axial)	89
5.1.5 Análise dos resultados	91
6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	94
Referências Bibliográficas	97
Anexo I Especificações Técnicas das Tecnologias CSI	104

Lista de Figuras

2.1 Campo magnético envolvendo um condutor	7
2.2 Ilustração da lei de Ampère	8
2.3 Determinação da intensidade de campo magnético H	9
2.4 Circuito magnético (toróide)	10
2.5 Analogia entre circuito magnético e circuito elétrico	11
2.6 Características B - H (curva de magnetização)	12
2.7 Curvas de magnetização	13
2.8 Seção transversal de uma máquina rotativa	13
2.9 Estrutura composta	14
2.10 Espreadimento do fluxo magnético	15
2.11 Excitação senoidal no núcleo magnético	16
3.1 Rotor de gaiola	18
3.2 Barras do rotor	18
3.3 Mit de rotor bobinado	19
3.4 Estator da máquina de indução trifásica	19
3.5 Deslocamento espacial dos enrolamentos aa', bb', cc'.	21
3.6 Relações entre correntes defasadas de 120° no tempo	21
3.7 Fluxos produzidos pelos condutores nas diversas fases	22
3.8 Campo magnético girante, instante de tempo $t = t_2$.	23
3.9 Princípio de funcionamento do Mit	24
3.10 Circuito equivalente (por fase) de um Mit	25
3.11 Estator com as bobinas implementadas	27
3.12 Medição dos sinais obtidos das bobinas	28

3.13 Exemplo da mudança detectada na densidade de fluxo magnético	31
3.14 Espectro com barras quebradas	32
3.15 Fase danificada por desbalanceamento de tensão da rede	34
3.16 Queima por sobrecarga, subtensões e sobretensões	36
4.1 Bancada experimental	37
4.2 Alinhamento a laser da bancada experimental	39
4.3 Balanceamento da bancada experimental	39
4.4 Espectros de vibração para a condição normal de funcionamento	41
4.5 Espectros de vibração para o desbalanceamento de tensão (210 V)	42
4.6 Espectros de vibração para o desbalanceamento de tensão (200 V)	43
4.7 Espectros de vibração para subtensão (200 V)	44
4.8 Espectros de vibração para subtensão (190 V)	45
4.9 Espectros de vibração para sobretensão (230 V)	46
4.10 Espectros de vibração para sobretensão (240 V)	47
4.11 Espectros de vibração para desbalanceamento mecânico (16,0 g)	48
4.12 Espectros de vibração para barras quebradas ou trincadas	49
4.13 Média, desvio padrão e variação em $1 \times f_r$	50
4.14 Média, desvio padrão e variação em $2 \times f_r$	51
4.15 Média, desvio padrão e variação em $3 \times f_r$	52
4.16 Média, desvio padrão e variação em $2 \times f_1$	53
4.17 Média, desvio padrão e variação em $2 \times f_1 - f_r$	54
4.18 Bobina de fluxo fixada axialmente	55
4.19 Medição em campo com a bobina CSI	55
4.20 Espectros de fluxo magnético para a condição normal de funcionamento	57
4.21 Espectros de fluxo magnético para o desbalanceamento de tensão (210 V)	57
4.22 Espectros de fluxo magnético para o desbalanceamento de tensão (200 V)	58
4.23 Espectros de fluxo magnético para subtensão (200 V)	58
4.24 Espectros de fluxo magnético para subtensão (190 V)	59
4.25 Espectros de fluxo magnético para sobretensão (230 V)	59
4.26 Espectros de fluxo magnético para sobretensão (240 V)	60
4.27 Espectros de fluxo magnético para o desbalanceamento mecânico (16,0 g)	60

4.28 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_i - 1 \times f_r$ (bobina CSI)	61
4.29 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_i - 1 \times f_r$ (bobina radial)	61
4.30 Média e desvio padrão para a amplitude em f_i (bobina CSI)	62
4.31 Média e desvio padrão para a amplitude em f_i (bobina radial)	62
4.32 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_i + 1 \times f_r$ (bobina CSI)	63
4.33 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_i + 1 \times f_r$ (bobina radial)	63
4.34 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_i + 2 \times f_r$ (bobina CSI)	64
4.35 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_i + 2 \times f_r$ (bobina radial)	64
4.36 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_i + 3 \times f_r$ (bobina CSI)	65
4.37 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_i + 3 \times f_r$ (bobina radial)	65
4.38 Espectros de fluxo magnético para a condição normal de funcionamento	67
4.39 Espectros de fluxo magnético para o desbalanceamento de tensão (210 V)	67
4.40 Espectros de fluxo magnético para o desbalanceamento de tensão (200 V)	68
4.41 Espectros de fluxo magnético para subtensão (200 V)	68
4.42 Espectros de fluxo magnético para subtensão (190 V)	69
4.43 Espectros de fluxo magnético para sobretensão (230 V)	69
4.44 Espectros de fluxo magnético para sobretensão (240 V)	70
4.45 Espectros de fluxo magnético para o desbalanceamento mecânico (16,0 g)	70
4.46 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p - 6 \times f_i$ (bobina CSI)	71
4.47 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p - 6 \times f_i$ (bobina radial)	71
4.48 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p - 4 \times f_i$ (bobina CSI)	72
4.49 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p - 4 \times f_i$ (bobina radial)	72
4.50 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p - 2 \times f_i$ (bobina CSI)	73
4.51 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p - 2 \times f_i$ (bobina radial)	73
4.52 Média e desvio padrão para a amplitude em f_p (bobina CSI)	74
4.53 Média e desvio padrão para a amplitude em f_p (bobina radial)	74
4.54 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p + 2 \times f_i$ (bobina CSI)	75
4.55 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p + 2 \times f_i$ (bobina radial)	75
4.56 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p + 2 \times f_i$ (bobina CSI)	76
4.57 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p + 2 \times f_i$ (bobina radial)	76
4.56 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p + 6 \times f_i$ (bobina CSI)	77

4.57 Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p + 6 \times f_l$ (bobina radial)	77
5.1 Rotor com as sete barras rompidas	82
5.2 Espectro de corrente sem defeito	83
5.3 Espectro de corrente com 7 barras quebradas	83
5.4 Média, desvio padrão e variação das diferenças em dB	84
5.5 Espectro de fluxo (bobina CSI) sem defeito	85
5.6 Espectro de fluxo (bobina CSI) para 7 barras quebradas	85
5.7 Média, desvio padrão e variação das diferenças em dB	86
5.8 Espectro de fluxo (bobina radial) sem defeito	87
5.9 Espectro de fluxo (bobina radial) para 7 barras quebradas	87
5.10 Média, desvio padrão e variação das diferenças em dB	88
5.11 Espectro de fluxo (bobina axial) sem defeito	89
5.12 Espectro de fluxo (bobina axial) para 7 barras quebradas	89
5.13 Média, desvio padrão e variação das diferenças em dB	90
5.14 Quadro comparativo entre as técnicas	91

Lista de Tabelas

2.1 Analogia entre o circuito elétrico e circuito magnético	5
3.1 Número de barras ou ranhuras, Almeida (1994)	20
3.2 Severidade e Recomendações: Análise de Fluxo Magnético	29
4.1 Amplitudes em baixa frequência	78
4.2 Amplitudes em alta frequência	79
5.1 Severidade e recomendações para análise de corrente, Brito (2002)	92

Nomenclatura

AVV	sem defeito, lado da ventoinha, direção vertical	-
AVA	sem defeito, lado da ventoinha, direção axial	-
AVH	sem defeito, lado da ventoinha, direção horizontal	-
AAV	sem defeito, lado do acoplamento, direção vertical	-
AAA	sem defeito, lado do acoplamento, direção axial	-
AAH	sem defeito, lado do acoplamento, direção horizontal	-
AAC	sem defeito, análise de corrente	-
AF1	sem defeito, bobina CSI, baixa frequência	-
AF2	sem defeito, bobina implementada na axial, baixa frequência	-
AF3	sem defeito, bobina implementada na radial, baixa frequência	-
AF4	sem defeito, bobina CSI, alta frequência	-
AF6	sem defeito, bobina radial, alta frequência	-
BVV	desb. tensão (210 V), lado da ventoinha, direção vertical	-
BVA	desb. tensão (210 V), lado da ventoinha, direção axial	-
BVH	desb. tensão (210 V), lado da ventoinha, direção horizontal	-
BAV	desb. tensão (210 V), lado do acoplamento, direção vertical	-
BAA	desb. tensão (210 V), lado do acoplamento, direção axial	-
BAH	desb. tensão (210 V), lado do acoplamento, direção horizontal	-
BAC	desb. tensão (210 V), análise de corrente	-
BF1	desb. tensão (210 V), bobina CSI, baixa frequência	-
BF2	desb. tensão (210 V), bobina implementada na axial, baixa frequência	-
BF3	desb. tensão (210 V), bobina implementada na radial, baixa frequência	-
BF4	desb. tensão (210 V), bobina CSI, alta frequência	-
BF6	desb. tensão (210 V), bobina radial, alta frequência	-

CVV	desb. tensão (200 V), lado da ventoinha, direção vertical	-
CVA	desb. tensão (200 V), lado da ventoinha, direção axial	-
CVH	desb. tensão (200 V), lado da ventoinha, direção horizontal	-
CAV	desb. tensão (200 V), lado do acoplamento, direção vertical	-
CAA	desb. tensão (200 V), lado do acoplamento, direção axial	-
CAH	desb. tensão (200 V), lado do acoplamento, direção horizontal	-
CAC	desb. tensão (200 V), análise de corrente	-
CF1	desb. tensão (200 V), bobina CSI, baixa frequência	-
CF2	desb. tensão (200 V), bobina implementada na axial, baixa frequência	-
CF3	desb. tensão (200 V), bobina implementada na radial, baixa frequência	-
CF4	desb. tensão (200 V), bobina CSI, alta frequência	-
CF6	desb. tensão (200 V), bobina radial, alta frequência	-
DVV	subtensão (200 V), lado da ventoinha, direção vertical	-
DVA	subtensão (200 V) lado da ventoinha, direção axial	-
DVH	subtensão (200 V), lado da ventoinha, direção horizontal	-
DAV	subtensão (200 V), lado do acoplamento, direção vertical	-
DAA	subtensão (200 V), lado do acoplamento, direção axial	-
DAH	subtensão (200 V), lado do acoplamento, direção horizontal	-
DAC	subtensão (200 V), análise de corrente	-
DF1	subtensão (200 V), bobina CSI, baixa frequência	-
DF2	subtensão (200 V), bobina implementada na axial, baixa frequência	-
DF3	subtensão (200 V), bobina implementada na radial, baixa frequência	-
DF4	subtensão (200 V), bobina CSI, alta frequência	-
DF6	subtensão (200 V), bobina radial, alta frequência	-
EVV	subtensão (190 V), lado da ventoinha, direção vertical	-
EVA	subtensão (190 V), lado da ventoinha, direção axial	-
EVH	subtensão (190 V), lado da ventoinha, direção horizontal	-
EAV	subtensão (190 V), lado do acoplamento, direção vertical	-
EAA	subtensão (190 V), lado do acoplamento, direção axial	-
EAH	subtensão (190 V), lado do acoplamento, direção horizontal	-
EAC	subtensão (190 V), análise de corrente	-

EF1	subtensão (190 V), bobina CSI, baixa frequência	-
EF2	subtensão (190 V), bobina implementada na axial, baixa frequência	-
EF3	subtensão (190 V), bobina implementada na radial, baixa frequência	-
EF4	subtensão (190 V), bobina CSI, alta frequência	-
EF6	subtensão (190 V), bobina radial, alta frequência	-
FVV	sobretensão (240 V), lado da ventoinha, direção vertical	-
FVA	sobretensão (240 V), lado da ventoinha, direção axial	-
FVH	sobretensão (240 V), lado da ventoinha, direção horizontal	-
FAV	sobretensão (240 V), lado do acoplamento, direção vertical	-
FAA	sobretensão (240 V), lado do acoplamento, direção axial	-
FAH	sobretensão (240 V), lado do acoplamento, direção horizontal	-
FAC	sobretensão (240 V), análise de corrente	-
FF1	sobretensão (240 V), bobina CSI, baixa frequência	-
FF2	sobretensão (240 V), bobina implementada na axial, baixa frequência	-
FF3	sobretensão (240 V), bobina implementada na radial, baixa frequência	-
FF4	sobretensão (240 V), bobina CSI, alta frequência	-
FF6	sobretensão (240 V), bobina radial, alta frequência	-
GVV	sobretensão (230 V), lado da ventoinha, direção vertical	-
GVA	sobretensão (230 V), lado da ventoinha, direção axial	-
GVH	sobretensão (230 V), lado da ventoinha, direção horizontal	-
GAV	sobretensão (230 V), lado do acoplamento, direção vertical	-
GAA	sobretensão (230 V), lado do acoplamento, direção axial	-
GAH	sobretensão (230 V), lado do acoplamento, direção horizontal	-
GAC	sobretensão (230 V), análise de corrente	-
GF1	sobretensão (230 V), bobina CSI, baixa frequência	-
GF2	sobretensão (230 V), bobina implementada na axial, baixa frequência	-
GF3	sobretensão (230 V), bobina implementada na radial, baixa frequência	-
GF4	sobretensão (230 V), bobina CSI, alta frequência	-
GF6	sobretensão (230 V), bobina radial, alta frequência	-
HVV	desb. mecânico, lado da ventoinha, direção vertical	-
HVA	desb. mecânico, lado da ventoinha, direção axial	-

HVH	desb. mecânico, lado da ventoinha, direção horizontal	-
HAV	desb. mecânico, lado do acoplamento, direção vertical	-
HAA	desb. mecânico, lado do acoplamento, direção axial	-
HAH	desb. mecânico, lado do acoplamento, direção horizontal	-
HAC	desb. mecânico, análise de corrente	-
HF1	desb. mecânico, bobina CSI, baixa frequência	-
HF2	desb. mecânico, bobina implementada na axial, baixa frequência	-
HF3	desb. mecânico, bobina implementada na radial, baixa frequência	-
HF4	desb. mecânico, bobina CSI, alta frequência	-
HF6	desb. mecânico, bobina radial, alta frequência	-
JVV	barras quebradas, lado da ventoinha, direção vertical	-
JVA	barras quebradas, lado da ventoinha, direção axial	-
JVH	barras quebradas, lado da ventoinha, direção horizontal	-
JAV	barras quebradas, lado do acoplamento, direção vertical	-
JAA	barras quebradas, lado do acoplamento, direção axial	-
JAH	barras quebradas, lado do acoplamento, direção horizontal	-
JAC	barras quebradas, análise de corrente	-
JF1	barras quebradas, bobina CSI, baixa frequência	-
JF2	barras quebradas, bobina implementada na axial, baixa frequência	-
JF3	barras quebradas, bobina implementada na radial, baixa frequência	-
JF4	barras quebradas, bobina CSI, alta frequência	-
JF6	barras quebradas, bobina radial, alta frequência	-
θ	ângulo	[grau]
H	intensidade de campo magnético	[Ae/m]
i	corrente elétrica	[A]
\mathfrak{R}	relutância	[Ae/Wb]
r	raio	[m]
R	resistência	[Ω]
B	indução magnética	[Tesla]
μ	permeabilidade	[H/m]
f_{mm}	força magnetomotriz	[Ae]

N	número de espira	-
A	área	[m ²]
Φ	fluxo magnético	[Wb]
f_{em}	força eletromotriz	[V]
CC	Corrente contínua	[A]
ω	frequência angular	[rd/s]
f	frequência	[Hz]
f_l	frequência de linha	[Hz]
f_r	frequência de rotação do rotor	[Hz]
f_s	frequência de escorregamento	[Hz]
f_p	Frequência da passagem de ranhura	[Hz]
Mit	Motor de indução trifásico	-
n₁	velocidade síncrona	[rpm]
n	velocidade do rotor	[rpm]
p	número de pólos	-
R_s	número de ranhuras do rotor ou estator	-
s	escorregamento	[Hz]
T	torque mecânico	[Nm]
t	tempo	[s]

Capítulo 1

Introdução

A maioria das máquinas modernas operam a partir de motores de indução trifásicos que podem, com o uso, desenvolver falhas. Estas falhas podem causar paradas da máquina e ou diminuição do nível de eficiência do processo produtivo. Quando uma máquina desenvolve uma falha, ela apresenta indícios de defeitos de várias formas: mudanças nos sinais de vibrações, variação na temperatura, ruídos e alterações no campo eletromagnético.

Os motores de indução trifásicos são largamente utilizados nos acionamentos de bombas, compressores, ventiladores, equipamentos para processamento e manuseio de cargas e em várias outras diferentes aplicações na indústria, devido à sua solidez e versatilidade. 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, Brito (2002).

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

A detecção de defeitos quando estão ainda em fase de desenvolvimento, através da comparação de espectros de fluxo magnético, vibração e corrente elétrica, possibilita ao engenheiro de manutenção planejar uma ação corretiva com relação ao defeito previsto.

Os motores podem ser expostos a diferentes tipos de ambientes agressivos, operação imprópria e defeitos de fabricação. Falhas incipientes (barras quebradas, rolamentos danificados, curto-circuito, etc.) e falhas externas (sobrecarga mecânica, desequilíbrio de fase, subtensão, sobretensão, 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 defeitos incipientes, Boothman *et al.* (1983), Cambrias e Rittenhouse (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 os defeitos incipientes ou a deterioração gradual não forem detectados, 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 (1989). A confiabilidade exigida para os motores elétricos crescem constantemente devido à importância de suas aplicações e do avanço tecnológico.

Cameron *et al.* (1986), desenvolveram, no *Robert Gordon Institute of Technology*, Inglaterra, pesquisas que resultaram em expressões para as frequências características das vibrações de origem elétrica no estator de um motor de indução trifásico.

Bowers (1991), desenvolveu, na *Computational Systems Incorporated*, E.U.A, o estudo da integração de tecnologias, tais como: análise de vibração, tribologia, análise de tensão/corrente parasita no eixo do motor, corrente elétrica, temperatura e fluxo magnético para detectar e prevenir as falhas de origem mecânica e elétrica em motores de indução trifásicos.

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

Murry *et al.* (1994) apresentaram o programa SPR - *Strategic Petroleum Reserve*, que utiliza as técnicas de análise de vibração, termografia e análise de óleo, objetivando a implantação da manutenção preditiva de bombas e motores elétricos.

Langhorst *et al.* (1997), realizaram pesquisas onde mostram a influência dos inversores de frequência e conversores no surgimento de correntes parasitas que circulam pelos mancais dos motores elétricos.

Kowal (1999), desenvolveu, no *Computational Systems Incorporated*, E.U.A, pesquisas onde demonstra os principais efeitos causados por *shaft voltage* e *shaft current* (correntes parasitas) nos mancais.

Brito *et al.* (1999), utilizaram as técnicas de análise de vibração e análise de corrente para detecção de falhas em motores de indução trifásico. Foram estudados os defeitos de origem mecânica (folga mecânica, desbalanceamento e desalinhamento), de origem elétrica (*single phase*) e a interação entre eles.

Brito (2002), desenvolveu 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 diagnóstico de defeitos a partir da análise de fluxo magnético tem sido proposto por fabricantes de equipamentos da área de monitoramento de máquinas. Entretanto, esta técnica tem sido pouco estudada de forma aprofundada por pesquisadores. Através de estudos preliminares já realizados, constatou-se algumas vantagens em relação às técnicas convencionais de análise de corrente, como por exemplo, a não necessidade do conhecimento da carga do motor e do número de barras e ranhuras para a detecção de curto-circuito entre espiras, Lamim Filho *et al* (2000), Lamim Filho *et al* (2001), Baccarini *et al.*(2001).

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, desequilíbrio de fases e anomalias nos enrolamentos do estator: curto entre espiras e curto entre fases.

Este trabalho propõe uma metodologia de baixíssimo custo explorando o monitoramento do fluxo magnético para o acompanhamento preditivo de motores de indução trifásicos, através da detecção de falhas elétricas e mecânicas. Para isto, foi implementado um transdutor (*bobina de fluxo*) sensível às ondas eletromagnéticas dentro dos motores de indução trifásicos, identificando as frequências determinísticas relacionadas aos defeitos comuns a estes tipos de máquinas. Os espectros coletados com este novo sensor são comparados com um sensor comercial, mostrando sua eficiência.

O interesse deste grupo pelo estudo de falhas em motores elétricos, através de técnicas preditivas, iniciou-se em 1999. As primeiras investigações foram desenvolvidas no laboratório de conversão de energia da UFSJ, Universidade Federal de São João Del Rei. A detecção de falhas de origem elétrica (*single phase*) e mecânica (*folga mecânica, desbalanceamento, desalinhamento*) e a interação entre eles, foram apresentadas por Lamim Filho (1999) e por Brito *et al.* (1999^{a,b}). As excitações foram introduzidas num motor de indução trifásico, montado numa bancada, ainda sem robustez desejada, numa série de cinco testes. Essas investigações iniciais foram importantes para a familiarização com o equipamento coletor de sinais (*UltraSpec 8000*), aplicação das técnicas preditivas, acertos na bancada de testes e simulações das falhas.

Nos meses de julho, agosto e setembro de 2000 foram realizados testes experimentais, no Laboratório de Conversão de Energia da UFSJ (Universidade Federal de São João Del Rei) com o propósito de montar um banco de dados para o desenvolvimento do sistema inteligente híbrido para diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos, fruto da proposta de doutorado na Unicamp de Brito (2002).

A implantação da manutenção preditiva na planta industrial *Motor Fire e Powertrain* da FIAT Automóveis (Fábrica de Betim - MG), Lamim 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 (80 motores com potência 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 e Powertrain* da FIAT Automóveis foi apresentado por Lamim Filho *et al.* (2000).

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 testes, identificando-se suas frequências 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.

Por razões de facilidades e padrões comparativos, a parte experimental deste trabalho foi realizada no Laboratório de Conversão de Energia da UFSJ (Universidade Federal de São João Del Rei). Uma segunda bancada de testes foi montada, onde sua robustez garantiu a repetibilidade dos testes (*sem defeito, desbalanceamento de tensão, subtensão, sobretensão, barras quebradas ou trincadas e desbalanceamento mecânico*) sob as mesmas condições. Este procedimento possibilitou a montagem de um banco de dados para a validação de um transdutor (*bobina de fluxo*) implementado dentro do motor de indução trifásico. Destaca-se o interesse pela aplicação da técnica de fluxo magnético como fruto da proposta de mestrado na Unicamp, sendo um campo totalmente novo a ser explorado.

No Capítulo II, apresentam-se os fundamentos básicos sobre circuitos magnéticos. O objetivo é facilitar o entendimento do transdutor (bobina de fluxo) implementado dentro do motor de indução trifásico.

No Capítulo III, apresentam-se os fundamentos básicos sobre motores de indução trifásicos. O objetivo é facilitar o entendimento do estudo dos defeitos introduzidos (*sem defeito, desbalanceamento de tensão, subtensão, sobretensão, barras quebradas ou trincadas e desbalanceamento mecânico*). Apresenta-se também, a implementação do transdutor (bobina de fluxo) dentro do motor e as principais frequências determinísticas destas excitações.

No Capítulo IV, apresentam-se a bancada experimental e os espectros coletados através da análise de vibração, análise de corrente e análise de fluxo magnético com a bobina de fluxo CSI e o transdutor proposto neste trabalho. Os experimentos foram realizados para a condição normal de funcionamento e para as excitações de origem elétrica e mecânica.

No Capítulo V, apresentam-se os espectros coletados através da análise de corrente e análise de fluxo magnético com a bobina de fluxo CSI e bobina de fluxo implementada. Os experimentos foram realizados para a condição normal de funcionamento e para 7 barras quebradas.

As conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo VI. No Anexo I, tem-se a especificação técnica das tecnologias CSI (*Computational Systems Incorporated*) utilizados nos testes experimentais.

Capítulo 2

Fundamentos Básicos de Circuitos Magnéticos

Em todas as máquinas elétricas, o circuito magnético pode ser formado utilizando-se materiais ferromagnéticos (caso dos transformadores) ou materiais ferromagnéticos em conjunto com entre-ferro (caso das máquinas rotativas). Na maioria das máquinas, exceto as que possuem campo magnético permanente, o campo magnético (ou fluxo) é produzido pela passagem de corrente elétrica através das bobinas que envolvem o material magnético.

Os fundamentos básicos sobre circuitos magnéticos apresentados neste capítulo, têm como objetivo facilitar o entendimento do transdutor (bobina de fluxo) implementado dentro do motor de indução trifásico. A fundamentação teórica deste capítulo é apresentada segundo, Sen (1997).

2.1 Relação $i - H$

Quando um condutor (por exemplo, um cabo energizado) é circulado por uma intensidade de corrente elétrica (i), é produzido, ao redor deste, um campo magnético, Figura 2.1. A direção das linhas de fluxo (ou intensidade de campo magnético H) pode ser determinada através da regra da mão direita. O dedo polegar indica o sentido da corrente elétrica (i) e os demais dedos indicam o sentido da intensidade do campo magnético (H).

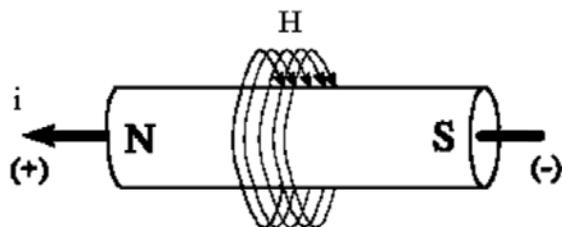


Figura 2. 1 - Campo magnético envolvendo um condutor.

Na implementação do transdutor, tem-se uma bobina na posição radial e outra na posição axial. As bobinas encontram-se imersas em um campo magnético girante criado pelo enrolamento do estator da máquina. Este campo irá provocar o surgimento de uma diferença de potencial nos terminais da bobina.

A relação entre corrente e intensidade de campo pode ser obtida através da Lei de Ampère de circuitos elétricos. Na Equação (2.1), tem-se a integral de linha do campo magnético (H) ao longo do contorno de uma superfície fechada através da qual passa a corrente elétrica (i). Essa corrente elétrica é igual a corrente total envolvida (i_1, i_2, i_3, \dots), sendo dl o incremento do comprimento no ponto.

$$\oint H \, dl = \sum_{i=1}^{\infty} i \quad (2.1)$$

Na Figura 2.2, tem-se a ilustração da lei de Ampère, onde θ é o ângulo entre os vetores H e dl. A somatória da corrente (i) é dado pela Equação (2.2).

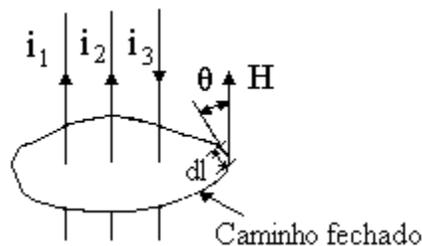


Figura 2. 2 - Ilustração da lei de Ampère.

$$\oint H \, dl \cos \theta = \sum i = i_1 + i_2 - i_3 \quad (2.2)$$

A intensidade de campo magnético (H), a uma distância r do condutor, Figura 2.3, é determinado pela Equação (2.3), uma vez que, em cada ponto do círculo, H e dl possuem a mesma direção ($\theta = 0$).

$$H = \frac{i}{2\pi r} \quad (2.3)$$

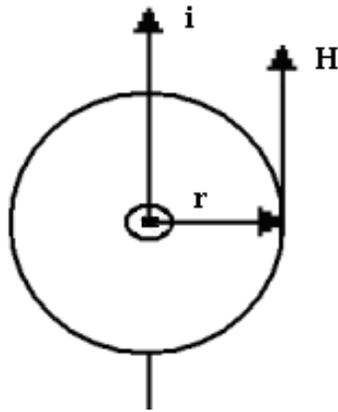


Figura 2. 3 - Determinação da intensidade de campo magnético H.

2.2 Relação B - H

A intensidade de campo magnético (H) produz uma indução magnética (B) em toda a região onde ela existe, Equações (2.4) e (2.5), onde: um weber é igual a 10^8 linhas de campo magnético; μ é a permeabilidade magnética e é uma propriedade do material; μ_0 é a permeabilidade do vácuo e seu valor é $4 \pi 10^{-7}$ henry/metro; μ_r é a permeabilidade do material ferromagnético (relativa ao valor para o vácuo, ou $\mu = \mu_r \mu_0$).

$$B = \mu H \text{ weber/m}^2 \text{ ou Tesla} \quad (2.4)$$

$$B = \mu_r \mu_0 H \text{ Wb/m}^2 \text{ ou T} \quad (2.5)$$

Para o vácuo e condutores elétricos (alumínio ou cobre), o valor de μ_r é igual a 1. Geralmente, para materiais ferromagnéticos (ferro, cobalto e níquel), o valor de μ_r varia na faixa de 100 a 1000. Para materiais usados em máquinas elétricas, μ_r varia na faixa de 2000 a 6000. Quanto maior o valor de μ_r , menor o valor da corrente para se produzir uma grande densidade de fluxo magnético na máquina.

2.3 Circuito magnético equivalente

A Figura 2.4, ilustra um circuito magnético. O núcleo magnético tem forma de anel (chamado toróide), e as bobinas são enroladas em toda sua circunferência.

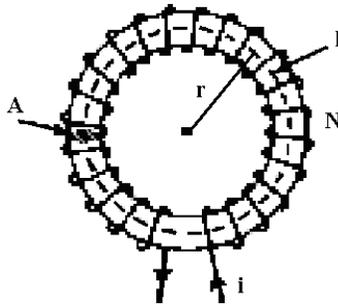


Figura 2. 4 - Circuito magnético (toróide).

Quando a corrente (i) flui através da bobina que contém N espiras, origina-se um fluxo magnético que, na maioria das vezes, é confinado no núcleo do material. O fluxo que não fica no núcleo é chamado de fluxo de dispersão e, por ser muito pequeno, pode ser desprezado nos cálculos do circuito magnético.

A força magnetomotriz (f_{mm}) é dada pela Equação (2.6), onde N é o número de espiras e i a corrente elétrica, sendo a unidade ampère-espira.

$$f_{mm} = Ni \quad (2.6)$$

Considerando-se o caminho do raio r , segundo a Equação (2.3) e a lei de Ampère, tem-se a intensidade de campo magnético (H), Equação (2.7).

$$H = \frac{Ni}{l} \text{ (Ae/m)} \quad (2.7)$$

Da Equação (2.4) e (2.7), tem-se a densidade de fluxo magnético (B), Equação (2.8).

$$B = \frac{\mu Ni}{l} \text{ (T)} \quad (2.8)$$

Considerando-se que todo o fluxo está confinado dentro da toróide, ou seja, não há fluxo de dispersão, o fluxo através da seção é dado pela Equação (2.9), onde A é a área da seção transversal da toróide.

$$\Phi = BA \text{ (Wb)} \quad (2.9)$$

Se H é a intensidade magnética que percorre este caminho, então, da Equação (2.8) e (2.9), tem-se o fluxo (Φ), Equação (2.10).

$$\Phi = \frac{\mu Ni}{l} A = \frac{Ni}{l/\mu A} = \frac{Ni}{\mathfrak{R}} \quad (2.10)$$

O circuito magnético da toróide pode ser representado pelo circuito magnético equivalente mostrado na Figura 2.5a. Sendo que a excitação é a força magnetomotriz ($f_{mm} = F = Ni$), que produz o fluxo (Φ) contra a relutância magnética (\mathfrak{R}). Na Figura 2.5b, tem-se o circuito elétrico análogo. A analogia entre o circuito magnético e o circuito elétrico é mostrada na Tabela 2.1.

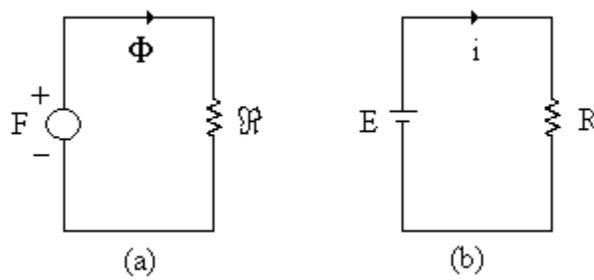


Figura 2. 5 - Analogia entre (a) circuito magnético e (b) circuito elétrico.

Tabela 2. 1 - Analogia entre o circuito elétrico e circuito magnético

	Circuito Elétrico	Circuito Magnético
Força de excitação	$f_{em} (E)$	$f_{mm} (F)$
Produz	Corrente ($i = E/R$)	Fluxo ($\Phi = F/\mathfrak{R}$)
Limitado pela	Resistência ($R = l/\sigma A$) ^a	Relutância ($\mathfrak{R} = l/\mu A$) ^a

^a σ , condutividade; μ , permeabilidade.

Para se obter um nível de tensão desejável nos terminais de saída do transdutor (bobina fluxo) implementado dentro do motor elétrico, variou-se o número de espiras (N) segundo a Equação (2.8). Conseqüentemente, obteve-se um sinal compatível com os coletores de sinal encontrados no mercado.

2.3.1 Curva de magnetização

Se a intensidade magnética (H), que passa através do núcleo da Figura 2.4, aumenta através do aumento da corrente (i), a densidade de fluxo (B) no núcleo também irá sofrer uma mudança conforme ilustra a Figura 2.6. A densidade de fluxo (B) aumenta linearmente na região onde os valores de intensidade magnética (H) são baixos. Geralmente, para valores maiores de H, a mudança em B não é linear. Nos materiais magnéticos tem-se os efeitos de saturação. A curva B-H, mostrada na Figura 2.6, é chamada curva de magnetização. A relutância (\mathfrak{R}) do caminho magnético é dependente da densidade de fluxo (B).

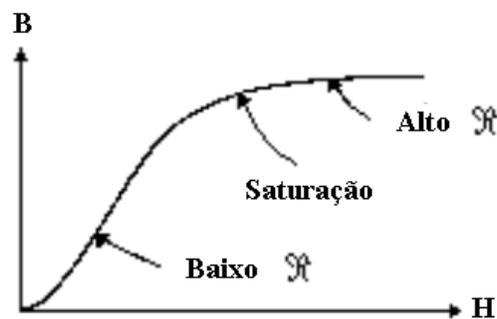


Figura 2. 6 - Características de B - H (curva de magnetização).

A relutância é baixa quando a densidade de fluxo (B) é baixa, e alta quando B é alta. O circuito magnético difere dos circuitos elétricos neste aspecto, ou seja, a resistência é independente da corrente que passa através do circuito, enquanto a relutância depende da densidade de fluxo no circuito magnético.

Na Figura 2.7, tem-se a característica B-H de três diferentes tipos de núcleos magnéticos (ferro fundido, aço fundido e folha de aço de silício). Observa-se que, para um valor de densidade de fluxo B^* em vários materiais magnéticos, o valor da corrente requerida é diferente.

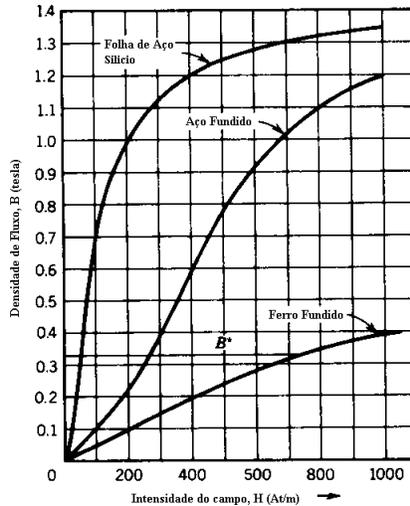


Figura 2. 7 - Curvas de magnetização.

2.3.2 Circuito magnético com *air - gap* (entre ferro)

Em máquinas elétricas, o rotor é fisicamente isolado do estator através do *air-gap* (entre ferro). Na Figura 2.8, tem-se a seção transversal de uma máquina de corrente contínua (CC). O fluxo produzido no núcleo magnético (pólos) e no entre-ferro, são praticamente iguais.

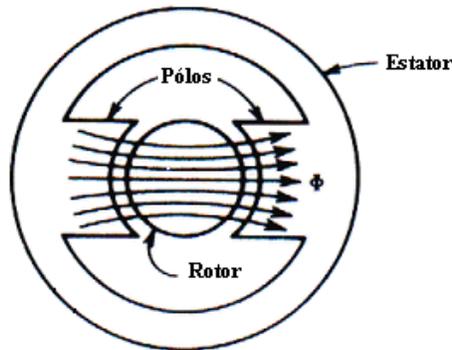


Figura 2. 8 - Seção transversal de uma máquina rotativa.

Se a densidade de fluxo é grande, o núcleo pode sofrer o efeito da saturação. Geralmente, para não se trabalhar numa região de saturação, é necessário que a curva B-H no meio do entre-ferro seja linear (μ é constante).

Um circuito magnético que têm em média dois ou mais núcleos magnéticos e entre-ferro, Figura 2.8, é conhecido como estrutura composta. Para efeito de análise, o circuito magnético equivalente pode ser derivado da própria estrutura composta.

Na Figura 2.9a, tem-se uma simples estrutura composta sendo representada pelo seu circuito equivalente, Figura 2.9b, onde: Ni é a força de excitação no circuito magnético, \mathfrak{R}_g é a relutância no entre-ferro, \mathfrak{R}_c é a relutância no núcleo magnético, l_c é o comprimento médio do núcleo e l_g é o comprimento médio do entre-ferro.

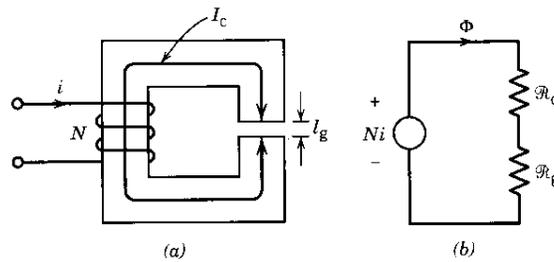


Figura 2. 9 - Estrutura composta. (a) Núcleo magnético com entre ferro. (b) Circuito magnético equivalente.

Nas Equações (2.11), (2.12), (2.13) e (2.14) têm-se a relutância no núcleo magnético (\mathfrak{R}_c), relutância no entre-ferro (\mathfrak{R}_g), fluxo no núcleo magnético (ϕ) e a força de excitação (Ni).

$$\mathfrak{R}_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c} \quad (2.11)$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} \quad (2.12)$$

$$\Phi = \frac{Ni}{\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g} \quad (2.13)$$

$$Ni = H_c l_c + H_g l_g \quad (2.14)$$

As densidades de fluxo magnético no entre-ferro e no núcleo magnético são dadas pelas equações (2.15) e (2.16) respectivamente, onde ϕ_c é o fluxo no núcleo magnético, A_c é a área no núcleo magnético, ϕ_g é o fluxo no entre-ferro e A_g é a área no entre-ferro.

$$B_c = \frac{\Phi_c}{A_c} \quad (2.15)$$

$$B_g = \frac{\Phi_g}{A_g} \quad (2.16)$$

Na Figura 2.10, tem-se o efeito de espraiamento (fluxo no entre-ferro saindo fora do núcleo) e que aumenta à medida que a área do entre-ferro aumenta. Este efeito pode ser desprezado caso o entre-ferro seja pequeno. Dessa forma a área do entre ferro (A_g) e a do núcleo magnético (A_c) são iguais.

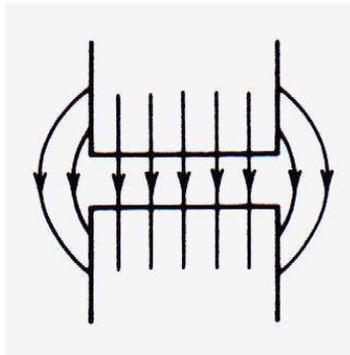


Figura 2. 10 - Espraiamento do fluxo magnético.

2.4 Excitações senoidais

Em máquinas elétricas de corrente alternada, a tensão e o fluxo variam de forma senoidal com o tempo. Na Figura 2.11a, tem-se uma bobina que envolve o núcleo magnético. A forma de onda da tensão e do fluxo são mostrados na Figura 2.11b. O diagrama fasorial é mostrado na Figura 2.11c. O fluxo (Φ) é dado pela Equação (2.17), onde Φ_{\max} é a amplitude do fluxo no núcleo magnético, $\omega = 2 \pi f$, é a frequência angular, f é a frequência em Hz.

$$\Phi(t) = \Phi_{\max} \text{sen } \omega t \quad (2.17)$$

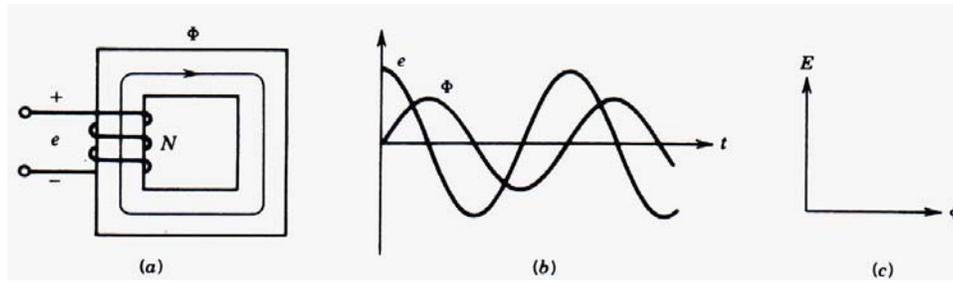


Figura 2. 11 - Excitação senoidal no núcleo magnético. (a) Bobina magnética. (b) Forma de onda. (c) Diagrama fasorial.

Da Lei de Faraday, a tensão induzida em N espiras da bobina é dada pela Equação (2.18) e (2.19).

$$e(t) = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} &= N \Phi_{\max} \omega \cos \omega t \\ &= E_{\max} \cos \omega t \end{aligned} \quad (2.19)$$

O valor médio quadrático (rms) da tensão induzida é dada pela Equação (2.20).

$$\begin{aligned} E_{\text{rms}} &= \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{N \omega \Phi_{\max}}{\sqrt{2}} \\ &= 4,44 N f \Phi_{\max} \end{aligned} \quad (2.20)$$

A Equação (2.20), além de ser bastante utilizada na teoria das máquinas de corrente alternada, também servirá como base para identificar os efeitos causados pela sobretensão e subtensão introduzidos na bancada de testes.

Capítulo 3

Fundamentos Básicos dos Motores de Indução Trifásicos (Mit)

Os fundamentos básicos sobre motores de indução trifásicos apresentados neste capítulo, têm como objetivo facilitar o entendimento do estudo dos defeitos introduzidos (desbalanceamento de tensão, subtensão, sobretensão, desbalanceamento mecânico, barras quebradas ou trincadas e sem defeito). Também apresenta-se a implementação do transdutor (bobina fluxo) dentro do motor e as principais frequências características destas excitações.

3.1 Características construtivas

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 a quase todos os tipos de cargas encontradas na prática, sendo composto fundamentalmente de duas partes: estator e rotor, Brito (2002).

O rotor é o elemento girante do motor elétrico. É formado basicamente por um eixo, que transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor; núcleo de chapas magnéticas e enrolamentos, que podem ser do tipo rotor gaiola e rotor de anéis ou bobinado.

Na Figura 3 1 tem-se o rotor de gaiola constituído por um conjunto de barras não isoladas e interligadas por anéis em curto circuito.



Figura 3. 1 - Rotor de gaiola: (a) dupla de cobre e latão e (b) de alumínio, Brito (2002).

Na figura 3.2 tem-se as várias formas da barra do rotor, com destaque para a barra utilizada, e detalhes da sua montagem junto às chapas magnéticas.

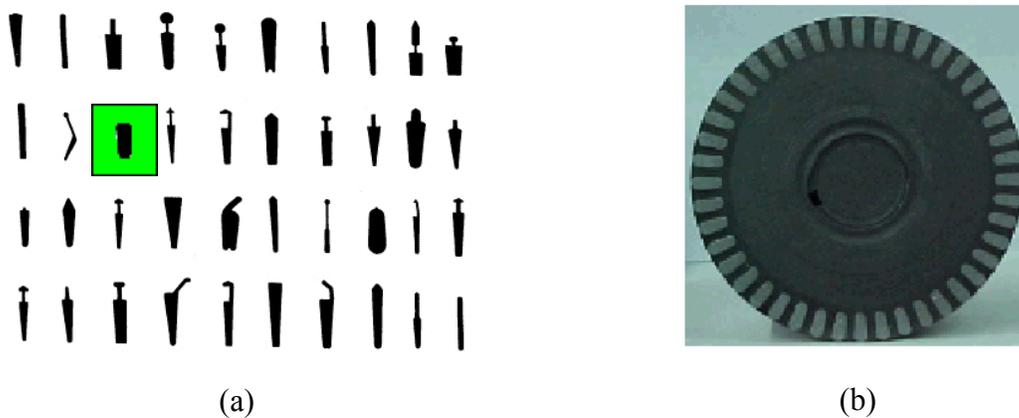


Figura 3. 2 - Barras do rotor. (a) Tipos de barras. (b) Detalhes das barras do rotor.

O rotor de anéis tem três enrolamentos separados, ligados normalmente em estrela. Um dos terminais de cada enrolamento é ligado a um ponto comum e os outros três terminais são ligados a três anéis conectados entre si.

No rotor de anéis, as escovas transferem os terminais das bobinas para fora do motor. Estes terminais dos enrolamentos podem ser ligados em curto circuito ou através de um conjunto de resistências externas, que alteram a resistência total do circuito rotórico. Na Figura 3.3 tem-se um mit de rotor de anéis.

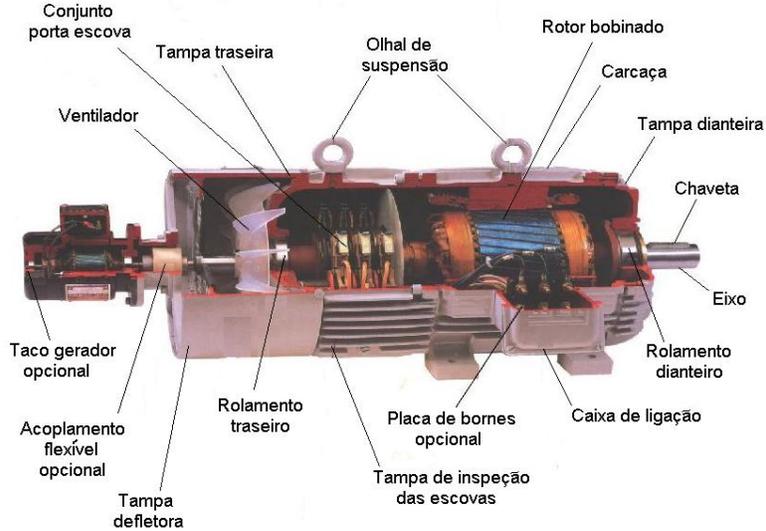
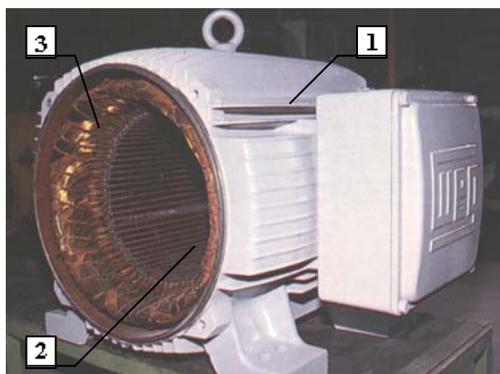
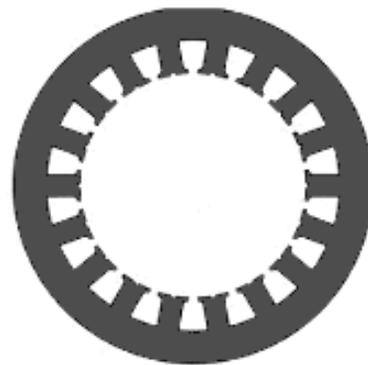


Figura 3. 3 - Mit de rotor bobinado, Weg (1998).

Na Figura 3.4 tem-se o estator formado por três partes distintas: carcaça [1] que é a estrutura suporte do conjunto, núcleo de chapas magnéticas [2] e enrolamento trifásico [3]. 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.



(a)



(b)

Figura 3. 4 - Estator da máquina de indução trifásica. (a) Estator. (b) Chapa magnética do núcleo, Weg (1998).

Na Tabela 3.1 tem-se o número de barras ou ranhuras no estator e rotor, para diversos tipos de carcaça WEG, com destaque para o número de ranhuras do motor utilizado.

Tabela 3. 1 - Número de barras ou ranhuras, Almeida (1994).

Número de Barras ou Ranhuras no Estator e Rotor								
Carcaça	II Pólos		IV Pólos		VI Pólos		VIII Pólos	
	Estator	Rotor	Estator	Rotor	Estator	Rotor	Estator	Rotor
63	24	18	24	30	24	30	24	30
71	24	18	24	28	24	28	24	28
80	24	22	36	44	36	44	36	24
90	24	18	36	44	36	44	36	44
100	24	28	36	44	36	33	36	33
112	36	28	36	44	36	33	48	44
132	36	28	48	40	36	40	36	44
160	36	28	48	40	48	54	48	54
180	36	28	48	54	72	58	72	58
200	36	28	48	54	72	58	72	58
225	48	40	72	58	72	56	72	56
250	48	40	72	58	72	56	72	56
280	48	40	72	58	72	58	72	56

3.2 Campo magnético girante

Para compreender a teoria de máquinas de corrente alternada, é necessário estudar a natureza do campo magnético produzido por um enrolamento trifásico.

Um campo magnético girante e de amplitude constante, girando à velocidade síncrona, pode ser produzido por qualquer grupo polifásico de enrolamentos deslocados no espaço da armadura. Isto é possível, se as correntes que circulam através dos enrolamentos também estiverem defasadas no tempo.

Todas as máquinas de indução trifásicas necessitam de três enrolamentos individuais e idênticos, deslocados no estator de 120° no espaço, pelos quais circulem correntes também defasadas de 120° no tempo.

Na Figura 3.5 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, Sen (1997).

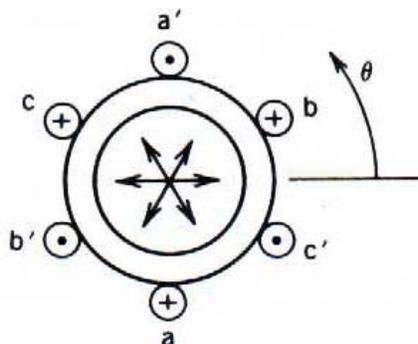


Figura 3. 5 - Deslocamento espacial dos enrolamentos aa', bb' e cc', Sen (1997).

Na Equação 3.1 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, w é a velocidade angular e t o tempo. Estas correntes instantâneas são mostradas na Figura 3.6.

$$\begin{aligned}
 I_a(t) &= I_m \cos wt \\
 I_b(t) &= I_m \cos (wt - 120) \\
 I_c(t) &= I_m \cos (wt + 120)
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

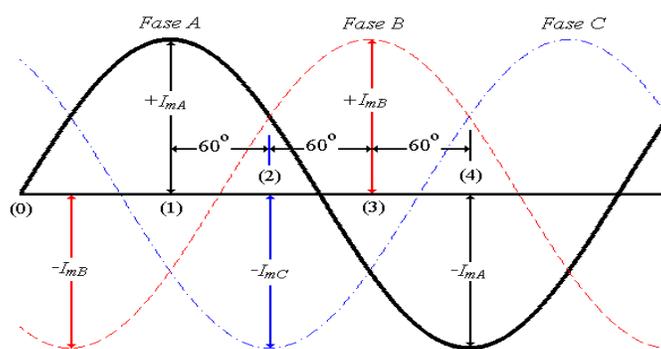


Figura 3. 6 - Relações entre correntes defasadas de 120° no tempo.

No instante t_1 , a fase A está num valor máximo num determinado sentido. As correntes nas bobinas das fases B e C alcançam exatamente a metade do seu valor máximo no sentido oposto.

Na Figura 3.7a, tem-se as direções das correntes que circulam nas bobinas "a", "b" e "c". A força magnetomotriz (f_{mm}) ao longo do eixo da fase "a" possui o seu valor máximo ($F_a = F_{m\acute{a}x}$) devido a corrente na fase "a" ser máxima. Tem-se também que $F_b = F_{m\acute{a}x}/2$ e $F_c = F_{m\acute{a}x}/2$ em F_a , produzem um fluxo constante $F = 1,5 F_{m\acute{a}x}$. As componentes de quadratura dessas projeções cancelam-se entre si, uma vez que elas são iguais e opostas em sua posição de fase. Na Figura 3.7b tem-se a forma de onda da força magnetomotriz (f_{mm}) e a sua resultante no instante de tempo t_1 .

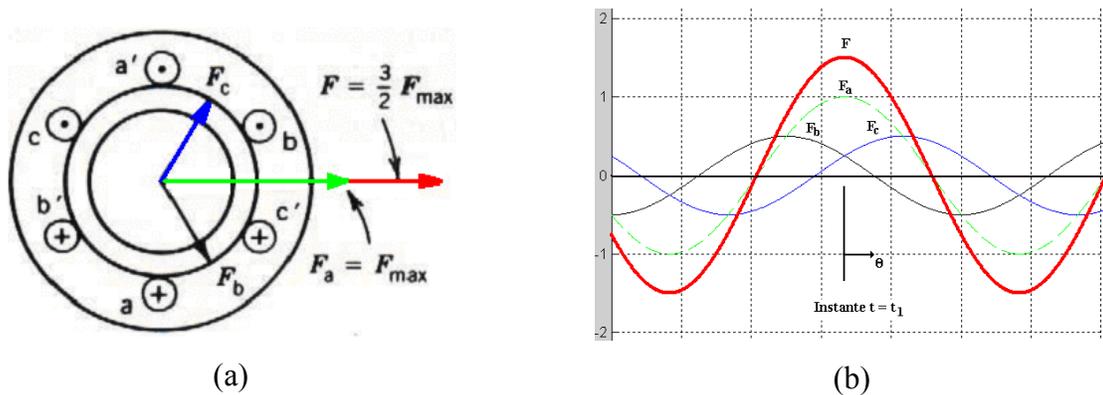


Figura 3. 7 - Fluxos produzidos pelos condutores nas diversas fases.

O mesmo procedimento é seguido no instante t_2 . Neste caso, a corrente na fase "b" está invertida e é igual a fase "a" e de mesmo sentido. A fase "c" está no seu valor máximo no instante t_2 . O fluxo resultante é novamente desenhado para cada uma das fases. Neste instante F_a e F_b produzem componentes em quadratura (que se cancelam) e componentes em fase com F_c que produzem um fluxo resultante F de mesmo valor que o existente no instante t_1 . Assim, no instante t_2 , 60° elétricos posterior ao instante t_1 , o fluxo resultante gira de 60° , permanecendo com seu valor constante.

Examinando os valores da força F nos instantes t_1 e t_2 , percebe-se que o estator pode ser tratado como um solenóide. Todos os condutores do lado do sentido da força F carregam corrente entrando no estator, e todos os condutores que se localizam do outro lado têm correntes saindo do estator. Assim, no instante t_3 o fluxo resultante terá um outro sentido, entrando no estator num pólo norte (N) e deixando o estator num pólo sul (S). Na Figura 3.8 tem-se a posição da força magnetomotriz para o instante de tempo t_2 .

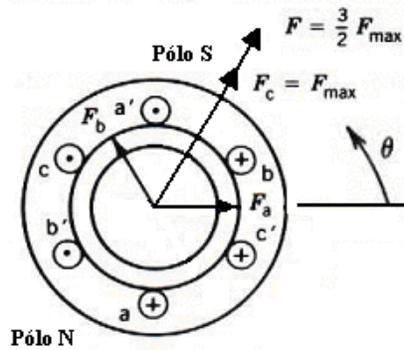


Figura 3. 8 - Campo magnético girante, instante de tempo $t = t_2$.

3.3 Velocidade síncrona

A velocidade de rotação do campo girante define a velocidade síncrona do motor (n_1 dado em rpm). Equação 3.2, onde f é a frequência da corrente que circula nos enrolamentos do estator, dada em ciclos por segundo (Hertz), e p é o número de pares de pólos, Equação (3.2).

$$n_1 = 120 \times f/p \text{ (rpm)} \quad (3.2)$$

O campo magnético girante, Figura 3.8, fornece um sentido anti-horário para a seqüência de fases **ABCABCA**, Figura 3.6. Se quaisquer dois terminais de linha das bobinas do estator forem trocados entre si, a seqüência de fases inversa produzirá reversão do sentido de rotação do campo magnético. Conseqüentemente, o sentido da rotação de qualquer motor de indução pode ser invertido (invertendo-se simplesmente a seqüência de fases). Para isto, basta trocar a posição de quaisquer duas das três conexões de linhas que o ligam à fonte de alimentação trifásica.

3.4 Princípio do motor de indução

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 força eletromotriz (f_{em}) que dão origem a correntes. Estas correntes reagem sobre o campo girante produzindo um conjugado motor que faz o rotor girar no mesmo sentido do campo. Este é o princípio de funcionamento dos motores de indução trifásicos, Figura 3.9.

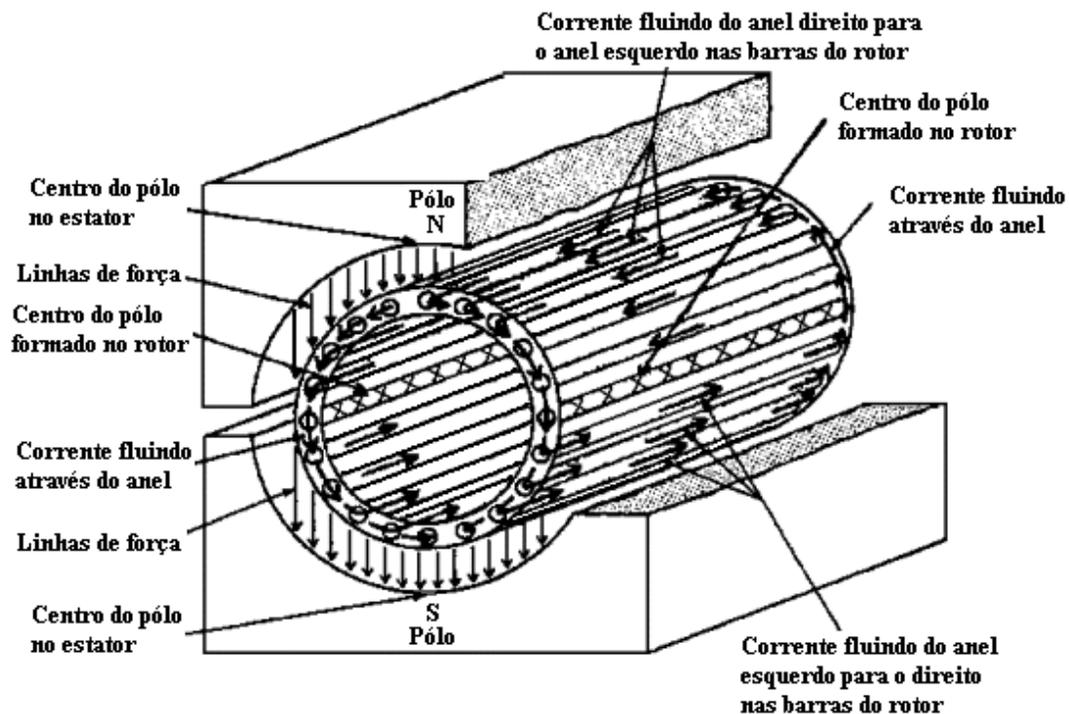


Figura 3. 9 - Princípio de funcionamento do Mit.

A velocidade do rotor nunca pode atingir a velocidade do campo girante (velocidade síncrona). Se esta velocidade for atingida, os condutores do rotor não serão cortados pelas linhas de força do campo girante. Conseqüentemente, não produzirão corrente induzida e o conjugado motor será nulo. Por isto, estes motores são também chamados assíncronos.

Quando o motor funciona sem carga, o rotor gira com velocidade quase igual à síncrona. Com carga, o rotor se atrasa mais em relação ao campo girante e correntes maiores são induzidas para desenvolver o conjugado necessário.

O escorregamento (s) é dado pela Equação (3.3), onde n_1 é a velocidade síncrona e n é a velocidade do rotor.

$$s = (n_1 - n)/n_1 \quad (3.3)$$

O escorregamento é, geralmente, expresso em porcentagem, variando em plena carga (de 1 a 5%), conforme o tamanho e o tipo do motor.

A frequência da corrente induzida no rotor (f_s), também chamada de frequência de escorregamento, é dada pela Equação (3.4), onde s é o escorregamento e f_l é a frequência de linha que circula nos enrolamentos do estator.

$$f_s = s \times f_l \text{ (Hz)} \quad (3.4)$$

A tensão induzida no circuito do rotor (E_{2s}), é dada pela Equação (3.5), onde s é o escorregamento e E_1 é a tensão nos enrolamentos do estator.

$$E_{2s} = s E_1 \quad (3.5)$$

3.5 Circuito equivalente do motor de indução trifásico

Os motores de indução trifásicos são formados por um conjunto de resistências, indutâncias e reatâncias. Podem ser estudados a partir do circuito equivalente, Figura 3.10, onde: E_1 é a tensão por fase no estator, R_1 é a resistência por fase do enrolamento no estator, X_1 é a reatância por fase do enrolamento no estator, I é a corrente no estator, X_{20} é a reatância por fase do enrolamento no rotor, R_2 é a resistência por fase do enrolamento no rotor, I_R é a corrente no rotor, X_m é a reatância por fase de magnetização, I_m é a corrente de magnetização, S é o escorregamento unitário.

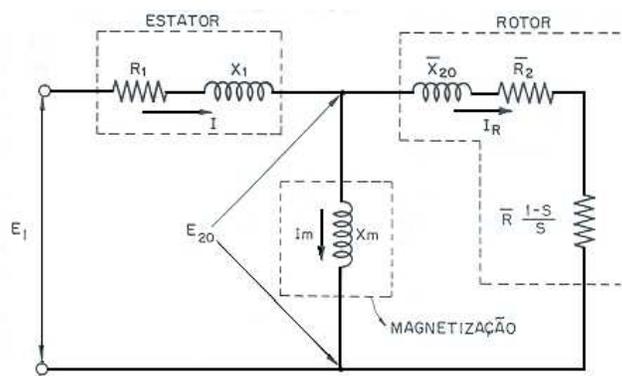


Figura 3. 10 - Circuito equivalente (por fase) de um Mit.

Na Equação (3.6), tem-se o torque mecânico (T) no eixo do motor, desprezando-se a resistência do estator.

$$T_{\text{mec.}} = \frac{60}{2 \pi n_s} \frac{E_{20}^2 R_2 \left[1 + \frac{X_1}{X_m} \right]}{\frac{R_2^2}{s} \left[1 + \frac{X_1}{X_m} \right]^2 + \left[X_1 + X_{20} + \frac{X_1 X_{20}}{X_m} \right]^2} \text{ [N.m]} \quad (3.6)$$

Observando-se a Figura 3.10, e considerando constante a tensão E_1 aplicada no estator, qualquer variação sentida pelo motor (seja flutuação da carga ou oscilações em qualquer um dos elementos eletromagnéticos do motor), a corrente I no estator será afetada com o mesmo conteúdo harmônico.

Problemas no estator (desbalanceamento de forças magnéticas e bobinas em curto) variam a impedância do estator e, conseqüentemente, afetam a corrente I;

Problemas da indução magnética (variação no *gap* de ar provocadas por excentricidade do rotor) variam a impedância de magnetização, conseqüentemente, afetam a corrente I;

Problemas no rotor (barras quebradas ou trincadas) alteram a impedância do rotor e, conseqüentemente, afetam a corrente I.

Conclui-se que, tanto os defeitos ocorridos no estator ou no rotor, como os problemas magnéticos, afetam a corrente I do estator.

Portanto, medindo e analisando-se as oscilações do campo magnético, é possível diagnosticar defeitos no motor.

3.6 Implementação do transdutor (bobina de fluxo)

Um transdutor se caracteriza por um dispositivo capaz de responder ao fenômeno físico, ou estímulo, de forma a converter sua magnitude em um sinal elétrico conhecido, proporcional à amplitude desse estímulo. Os transdutores também são conhecidos como conversores de sinais, Silveira (1998).

O transdutor proposto é uma bobina de fio de cobre contendo uma espira na posição radial [1] e duas espiras na posição axial [2]. Estas bobinas foram introduzida no estator do Mit, Figura 3.11.

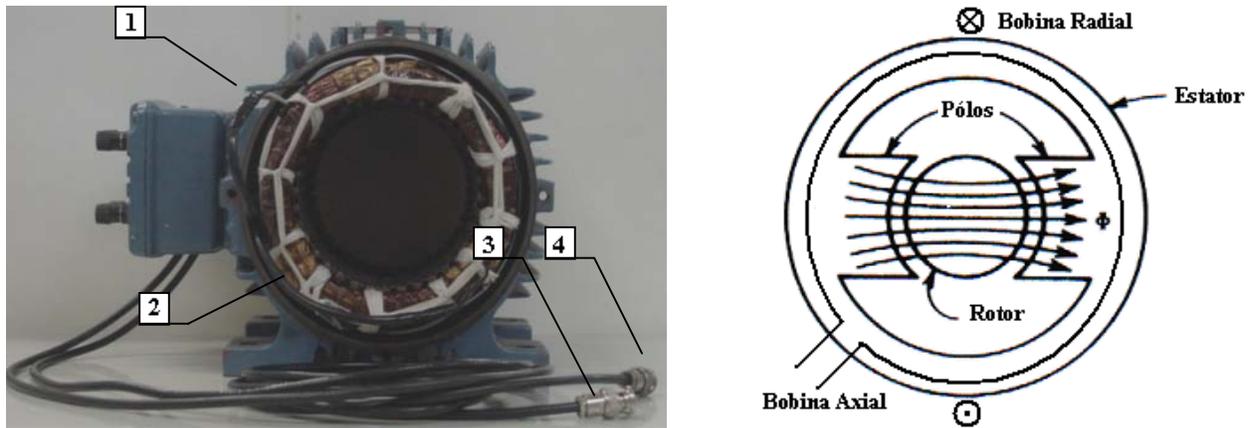


Figura 3. 11 - Estator com as bobinas implementadas.

Partindo-se do mesmo princípio do motor de indução trifásico (item 3.4), as bobinas encontram-se imersas no campo girante produzido pelas correntes no estator. Conseqüentemente, nos terminais de saída [3] e [4] tem-se uma tensão induzida compatível com os níveis de entrada para os coletores de sinais existentes no mercado. Neste trabalho, usou-se o coletor Ultraspec 8000 da CSI - *Computational System Incorporated* para coletar os espectros através dos sensores: acelerômetro (análise de vibração), alicate amperímetro (análise de corrente), bobina de fluxo CSI e bobina de fluxo implementada (análise de fluxo magnético). As especificações técnicas do analisador e sensores são apresentadas no Anexo I.

Na Figura 3.12, tem-se o sinal da bobina de fluxo proposta na posição axial [1] e radial [2]. Os sinais foram monitorados através de um osciloscópio, garantindo que os níveis de tensão estivessem dentro da faixa permitida (± 12 V) pelos coletores de sinais encontrados no mercado. A amplitude dos sinais das bobinas de fluxo implementadas foram ajustadas em ± 1 V, valor aproximado da bobina comercial.

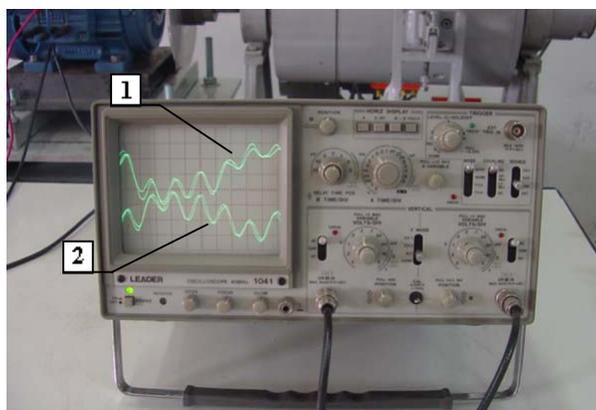


Figura 3. 12 - Medição dos sinais obtidos das bobinas.

Qualquer variação na intensidade do campo magnético irá causar uma mudança na forma de onda da tensão induzida na bobina de fluxo [1] e [2]. Isto permitirá, através da *Fast Fourier Transform (FFT)*, identificar o tipo de problema que está causando perturbação no comportamento dinâmico da máquina elétrica.

3.6.1 Análise de fluxo magnético

A análise de fluxo magnético é uma técnica recente que usa um sensor comercial, bobina de fluxo (343 Flux Coil) da CSI, Brito (2002). Entretanto, esta técnica tem sido pouco estudada, merecendo maior atenção dos pesquisadores. Através de estudos preliminares já realizados, constatou-se algumas vantagens da análise de fluxo em relação à análise de corrente (técnica convencional e amplamente conhecida). Dentre as vantagens destacam-se a não necessidade: do conhecimento da carga do motor e do número de barras e ranhuras para a detecção de curto-circuito entre espiras; de conexão a cabos energizados e eletricitista para acompanhar a coleta de dados.

A análise dos espectros de fluxo magnético é feita através da tendência de parâmetros específicos associados a cada tipo de falha. Os espectros foram coletados com a bobina CSI posicionada na mesma posição, permitindo repetibilidade dos testes e comparação entre os espectros.

A análise de fluxo permite diagnosticar as falhas existentes nas barras do rotor, anomalias existentes no estator e desbalanceamento de tensão. A análise destas falhas é feita através da inspeção de duas faixas espectrais: baixa frequência e alta frequência.

Em baixa frequência os espectros fornecem informações referentes à condição do rotor, desbalanceamento de tensão e falhas do estator, ou seja, fenômenos relacionados a $1 \times f_l$ e suas modulações. A mínima frequência para se analisar estes espectros é de pelo menos três vezes a frequência de linha (f_l).

Em alta frequência os espectros apresentam uma família de frequências associadas à passagem de ranhura (f_p) permitindo avaliar a condição do estator. A mínima frequência para se analisar estes fenômenos corresponde à frequência da passagem de ranhuras mais 15 vezes a frequência da linha (f_l), Manual CSI (1997).

A frequência da passagem de ranhuras (f_p), Equação (3.7), é definida pelo número de barras do rotor (ou ranhuras do estator) vezes a velocidade de rotação em Hz (f_r), menos a frequência de linha (f_l), Manual CSI (1997).

$$f_p = R_s \times f_r - f_l \quad (3.7)$$

Na Tabela 3.2, tem-se as principais falhas em motores elétricos e suas respectivas frequências determinísticas, em alta e baixa frequência, segundo Manual CSI (1997), onde: f_l é a frequência de linha [60 Hz]; p é o número de pólos; f_s é a frequência de escorregamento; n é um número inteiro; f_r é a frequência de rotação e f_p é a frequência da passagem de ranhuras.

Tabela 3. 2 - Severidade e Recomendações: Análise de Fluxo, Manual CSI (1997).

Descrição da Falha	Baixa Frequência			Alta Frequência
	$f_l - p \times f_s$	$f_l \pm n \times f_r$	$f_l + p \times f_r/2$	$2 \times f_l$ modulando com f_p
Barras do Rotor Trincadas/Quebradas	Diminui	Não muda	Não muda	Não se manifesta
Curto entre Espiras	Diminui	Aumenta	Aumenta	Pouca Variação
Desbalanceamento de Tensão	Diminui	Aumenta	Aumenta	Não se manifesta
Sobrecarga	Variação desprezível	Variação desprezível	Não muda	Variação desprezível

É importante observar que as medições de fluxo magnético devem ser feitas mantendo-se sempre o mesmo nível de carga.

3.7 Estudo das falhas introduzidas na bancada de testes

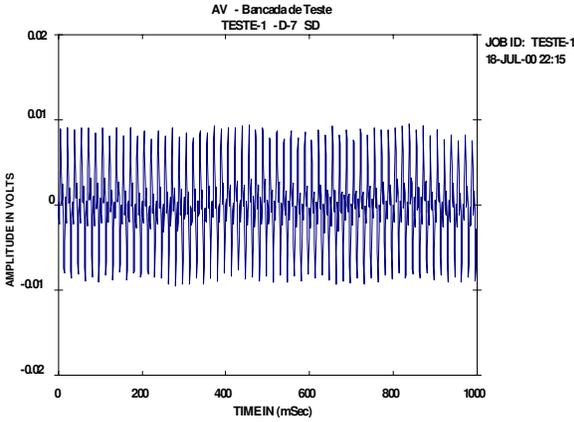
A seguir serão apresentados os defeitos provocados no motor elétrico (desbalanceamento de tensão, subtensão, sobretensão, desbalanceamento mecânico e barras quebradas ou trincadas) e as principais frequências características destas excitações.

3.7.1 Barras quebradas

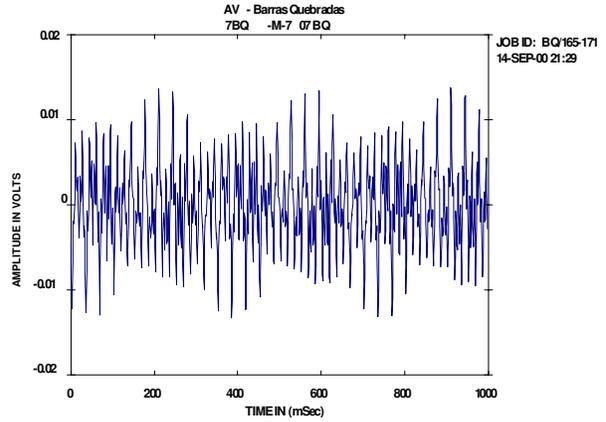
Em um motor de indução trifásico com rotor de gaiola, barras quebradas ou trincadas perturbam o fluxo magnético fazendo flutuar a frequência do rotor e, conseqüentemente, a rotação e a corrente do motor, Almeida, (1994).

Vários autores têm pesquisado o problema de barras quebradas e o desenvolvimento de técnicas para realizar o seu diagnóstico: Brito (2002), Brito *et al.* (2001), Cho e Lang (1992), Elkasabgy e Eastham (1992), Elkasabgy *et al.* (1986), Kliman (1986), Kliman *et al.* (1989), Milimonfared *et al.* (1998), Penman e Stavrou (1996), Walliser e Landy (1994) e Williamson e Smith (1982).

Medindo-se o fluxo magnético no interior do motor elétrico, a análise da forma de onda permite visualizar as modulações causadas pelo rompimento das barras do rotor, Figura 3.13.



(a) Sem defeito



(b) Barras quebradas

Figura 3. 13 - Exemplo da mudança detectada na densidade de fluxo magnético.

De acordo com Almeida (1994), o campo magnético B do *gap* pode ser expresso pela Equação (3.8), onde R_s é o número de ranhuras do rotor; f_r é a frequência de rotação do rotor dado em [Hz]; f_l é a frequência de linha, em [Hz] e Q_s e θ são os ângulos de fase.

$$B = B_m \text{sen}(2\pi R_s f_r t + Q_s) \cdot [1 + \text{sen}(2\pi f_l t + \theta)] \quad (3.8)$$

Na equação 3.7, o termo $2\pi R_s f_r$ [rad/s] é a frequência de passagem das ranhuras e o termo $[1 + \text{sen}(2\pi f_l t + \theta)]$ é o elemento modulador.

Barras quebradas ou falta de contato com os anéis fazem flutuar a rotação, que colocada em função da flutuação do torque pode ser expressa segundo a Equação (3.9), onde $s \times f_l$ é a frequência de escorregamento, k é um número inteiro e θ_r é o ângulo de fase, Almeida (1994).

$$f_r = f_l + k \cos[2\pi(2s f_l)t + \theta_r] \quad (3.9)$$

A frequência do rotor flutua com duas vezes a frequência de escorregamento ($2s f_l$), tendo como valor médio a frequência de linha (f_l).

A detecção do problema de barras quebradas é feita pela verificação das bandas laterais de duas vezes a frequência de escorregamento (f_s) em torno da frequência de linha (f_l), Figura 3.14. Quanto menor a diferença em dB das duas amplitudes, maior o número de barras quebradas.

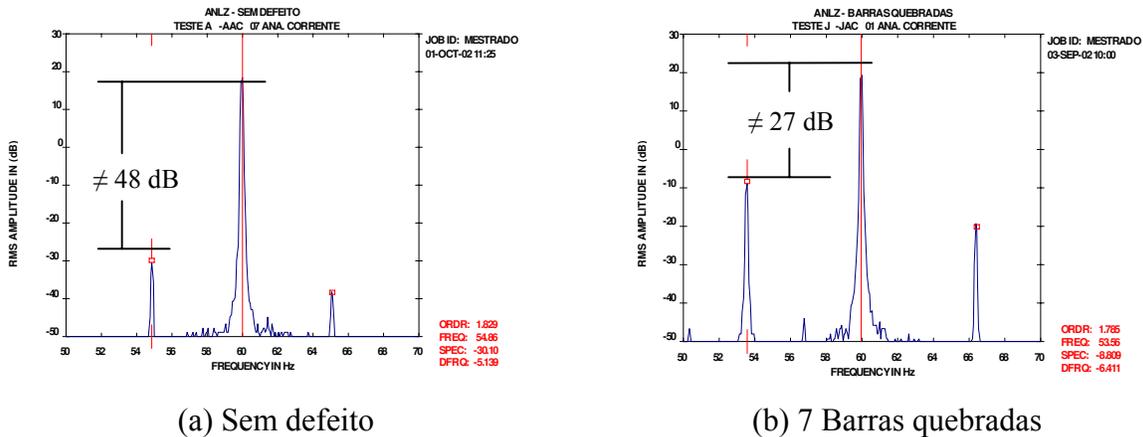


Figura 3. 14 - Espectro com barras quebradas.

3.7.2 Desbalanceamento de tensão

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.

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, desbalanceamento de tensão e anomalias nos enrolamentos do estator: curto entre espiras e curto entre fases.

O desbalanceamento de tensão é um dos problemas mais freqüentes nas indústrias e provoca sobreaquecimento nos motores elétricos, reduzindo sua vida útil e gerando vibrações que por sua vez provocam desgaste mecânico e ruídos. Para a sua inclusão em um plano de manutenção preditiva é necessário conhecer seu comportamento e determinar suas freqüências determinísticas, Baccarini *et al.* (2001).

Como visto anteriormente no item 3.2, Figura 3.7, e considerando-se que o motor está sujeito a um desbalanceamento de tensão ($V_{AB} = V_{CA} \neq V_{BC}$), conseqüentemente as correntes I_m da Equação (3.1) 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.

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 $2 \times f_l$, caracterizando assim o desbalanceamento de tensão, ou seja, este fenômeno é caracterizado pelas freqüências de $2 \times f_l \pm f_r$. Estas freqüências foram observadas através dos espectros de vibração e serão chamadas de freqüências determinísticas do desbalanceamento de tensão através da análise de vibração.

Na análise de fluxo, o desbalanceamento de tensão se manifesta com alterações nas amplitudes das $f_l \pm 1 \times f_r$; $f_l + 2 \times f_r$; $f_l + 3 \times f_r$ e $f_l + 4 \times f_r$. Estas freqüências foram observadas a partir de um espectro de referência (*base line*) e serão chamadas de freqüências determinísticas do desbalanceamento de tensão através da análise de fluxo magnético.

Na fase danificada por desbalanceamento de tensão da rede, Figura 3.15, a queima do isolamento numa fase do enrolamento do estator pode resultar de tensão desigual entre fases, WEG (1998).

Tensões desiguais normalmente são motivadas por cargas não balanceadas na rede de alimentação, por conexões deficientes junto aos terminais do motor ou por mau contato.

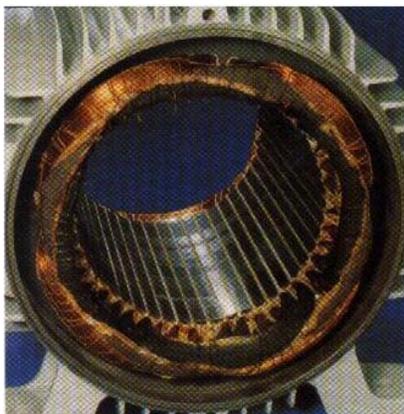


Figura 3. 15 - Fase danificada por desbalanceamento de tensão da rede.

3.7.3 Subtensão e sobretensão

Em máquinas elétricas de corrente alternada, quando se tem um sistema de corrente trifásico balanceado fluindo através dos enrolamentos do estator surge um campo magnético senoidal distribuído que gira no entreferro da máquina com já visto anteriormente.

O campo magnético girante irá induzir uma tensão nos enrolamentos do rotor. Seu valor médio quadrático (RMS) é dado pela Equação (2.20), Capítulo 2, onde f é a frequência em (Hz) e Φ representa o fluxo por pólo da máquina elétrica.

$$E_{\text{rms}} = 4,44 N f \Phi \quad (2.20)$$

Quando se tem um motor alimentado com sobretensão ou subtensão, a tensão induzida no transdutor implementado dentro da máquina irá aumentar ou diminuir de acordo com o nível de tensão aplicado nos enrolamentos do estator. Conseqüentemente tem-se um aumento ou diminuição na frequência de linha (f_l) e nas frequências de rotação (f_r) da máquina que modulam com a f_l .

Segundo Mamede (1997), considerando-se a instalação do motor num ponto do circuito em que a tensão está abaixo das condições nominais previstas (subtensão), as características destes são alteradas de acordo com os seguintes itens:

- o conjugado de partida diminui com o quadrado da tensão aplicada;
- a corrente de partida cai proporcionalmente à redução de tensão;
- a corrente a plena carga aumenta na mesma proporção;
- o fator de potência aumenta;
- as perdas estatóricas e rotóricas, em geral, também aumentam, aquecendo o enrolamento;
- a velocidade diminui, acarretando deficiências indesejáveis de ventilação.

Segundo Mamede (1997), considerando-se a instalação do motor num ponto do circuito em que a tensão está acima das condições nominais previstas (sobretensão), as características destes são alteradas de acordo com os seguintes itens:

- o conjugado de partida aumenta com o quadrado da tensão;
- a corrente de plena carga diminui;
- o conjugado máximo aumenta com o quadrado da tensão;
- o fator de potência diminui;
- as perdas rotóricas, em geral, e as perdas estatóricas diminuem;
- a velocidade aumenta ligeiramente, melhorando as condições de troca de calor.

A queima por sobrecarga, Figura 3.16, provoca a queima total do isolamento em todas as fases do enrolamento trifásico. As subtensões também provocarão o mesmo tipo de falha.



Figura 3. 16 - Queima por sobrecarga, subtensões ou sobretensões.

3.7.4 Desbalanceamento mecânico

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.

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

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 com a bobina de fluxo CSI e bobina de fluxo proposta. Para cada tecnologia são apresentados o espectro e a análise dos resultados. 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 o acompanhamento preditivo de motores de indução trifásicos através da análise de fluxo magnético e também validação do transdutor implementado dentro do motor.

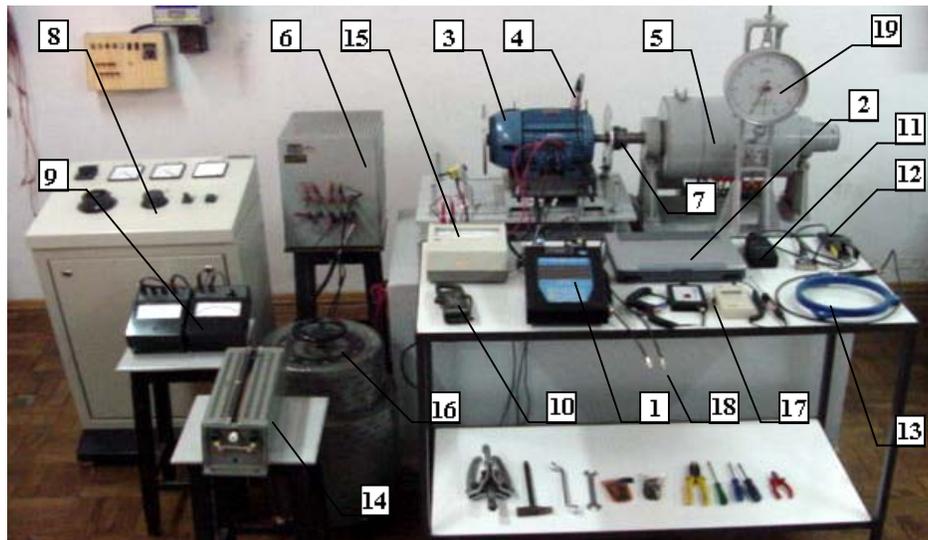


Figura 4. 1 - Bancada experimental.

A bancada experimental foi montada no Laboratório de Conversão de Energia da UFSJ - Universidade Federal 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* [15] modelo 600, voltímetro e amperímetro *CC H & B do Brasil* [9], alicate digital *Dawer* [10] modelo CM-600, termômetro digital *Mit Exata* [17] modelo ME 1200 K, dinamômetro *Oswaldo Filizola* [19], capacidade de 10 Kg x 50 g, e tacômetro *Optho Tako* [11]. 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.

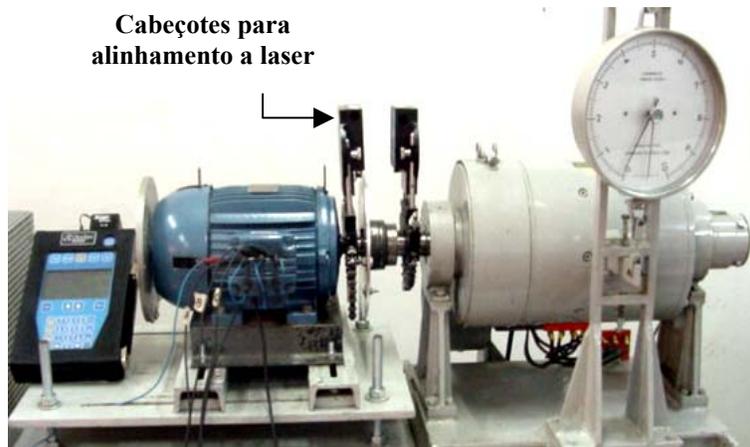


Figura 4. 2 - Alinhamento a laser da bancada experimental.

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

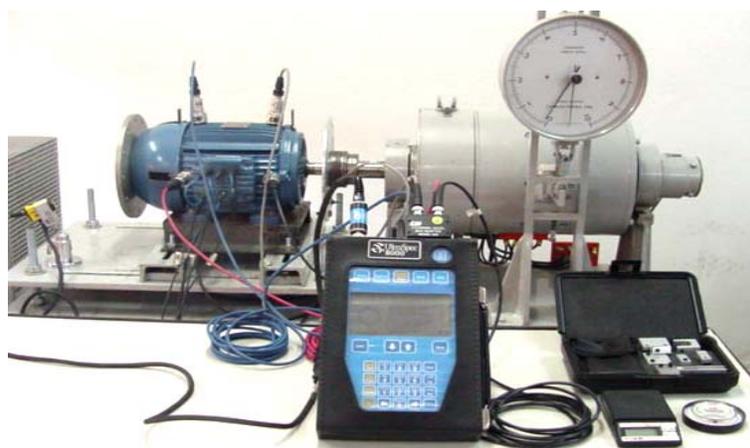


Figura 4. 3 - Balanceamento da bancada experimental.

Foram coletados 1170 espectros no módulo *UltraSpec Analyzer* (540 - análise de vibração, 90 - análise de corrente e 540 - análise de fluxo magnético), numa série de 10 testes para cada excitação e repetidos aleatoriamente 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 e horizontal, 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 a validação do transdutor (bobina de fluxo) implementado dentro do motor.

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

Os espectros de vibração foram coletados para monitorar a eventual influência de outros tipos de problemas (mecânico ou elétrico) que poderiam interferir nos espectros de fluxo magnético. Procurou-se com isto controlar o processo experimental e garantir a repetibilidade e a correlação entre falhas introduzidas e sinais analisados.

Os sinais de vibração foram coletados através do acelerômetro A0720GP, SN6714, sensibilidade de 0.1000 mV/m/s², Figura 4.1 [4]. O analisador foi configurado para janela *Hanning*, 3200 linhas, 10 médias, faixa de frequência de 0 a 400 Hz e amplitudes medidas em velocidade (mm/s). As especificações técnicas do analisador e sensores são apresentadas no Anexo I.

O acelerômetro foi colocado alternadamente nas direções vertical, horizontal e axial, lado do ventilador e lado do acoplamento do motor. Os espectros de vibração podem ser identificados por três letras: a primeira indica as condições estudadas e poderá ser **A** de sem defeito, **B** de desbalanceamento de tensão (210 V), **C** de desbalanceamento de tensão (200 V), **D** de subtensão (200 V), **E** de subtensão (190 V), **F** de sobretensão (240 V), **G** de sobretensão (230 V), **H** de desbalanceamento mecânico (16,0 g), **J** de barras quebradas; a segunda indica o lado em que foram colocados os acelerômetros e poderá ser **V** de ventoinha ou **A** de acoplamento e a última indica a direção dos acelerômetros e poderá ser **V** de vertical, **A** de axial ou **H** de horizontal. Por exemplo: AVV - Teste sem defeito, lado da ventoinha e posição vertical do acelerômetro. Nos gráficos a seguir apresentados nas Figuras 4.13 a 4.17, as letras correspondem também às condições estudadas.

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.

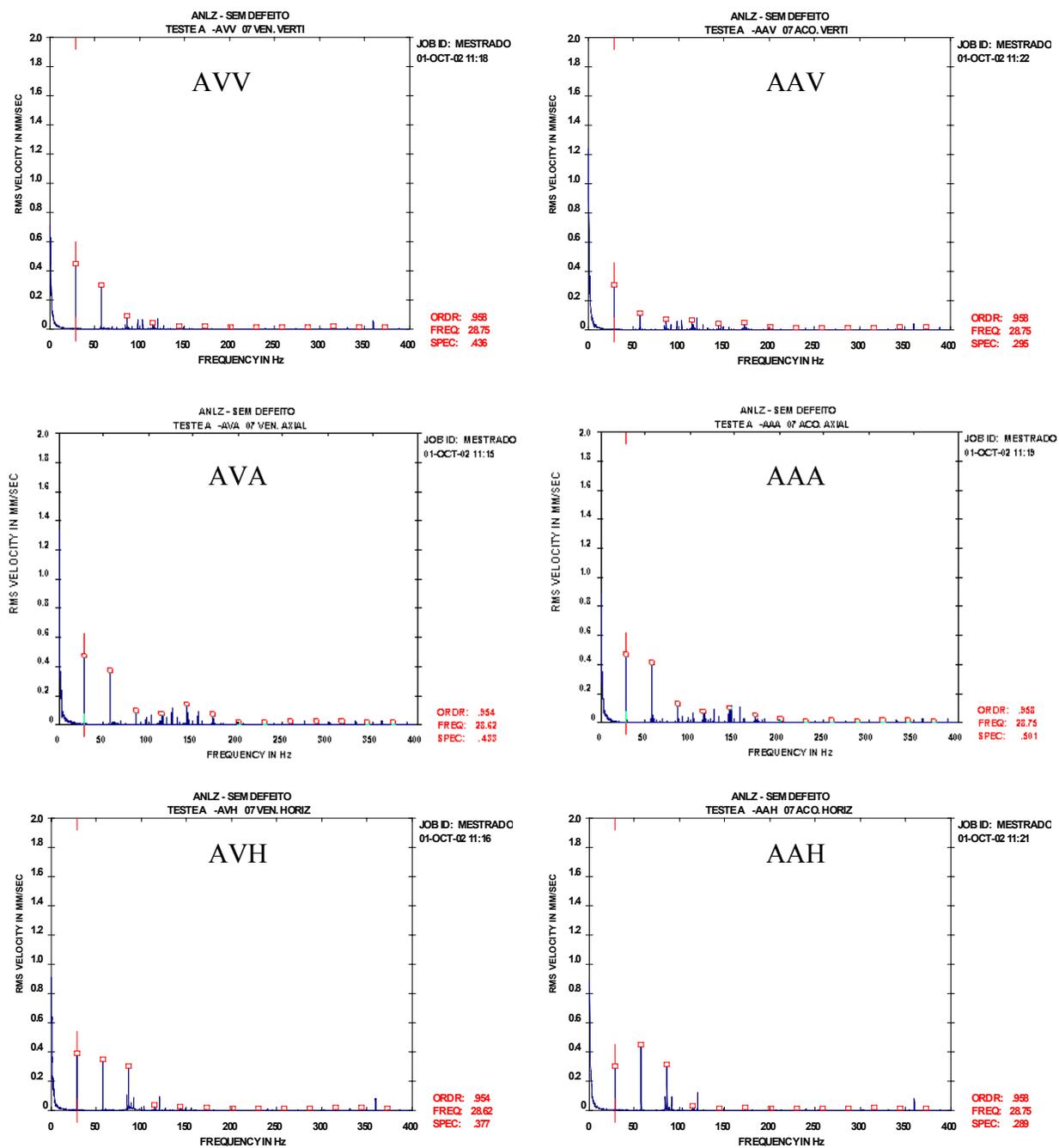


Figura 4. 4 - Espectros de vibração para a condição normal de funcionamento.

4.2.2 Desbalanceamento de tensão

A excitação por desbalanceamento de tensão foi obtida inserindo-se uma resistência em série com uma das fases de alimentação do motor elétrico. Na Figura 4.5, têm-se os espectros de vibração para o desbalanceamento de tensão.

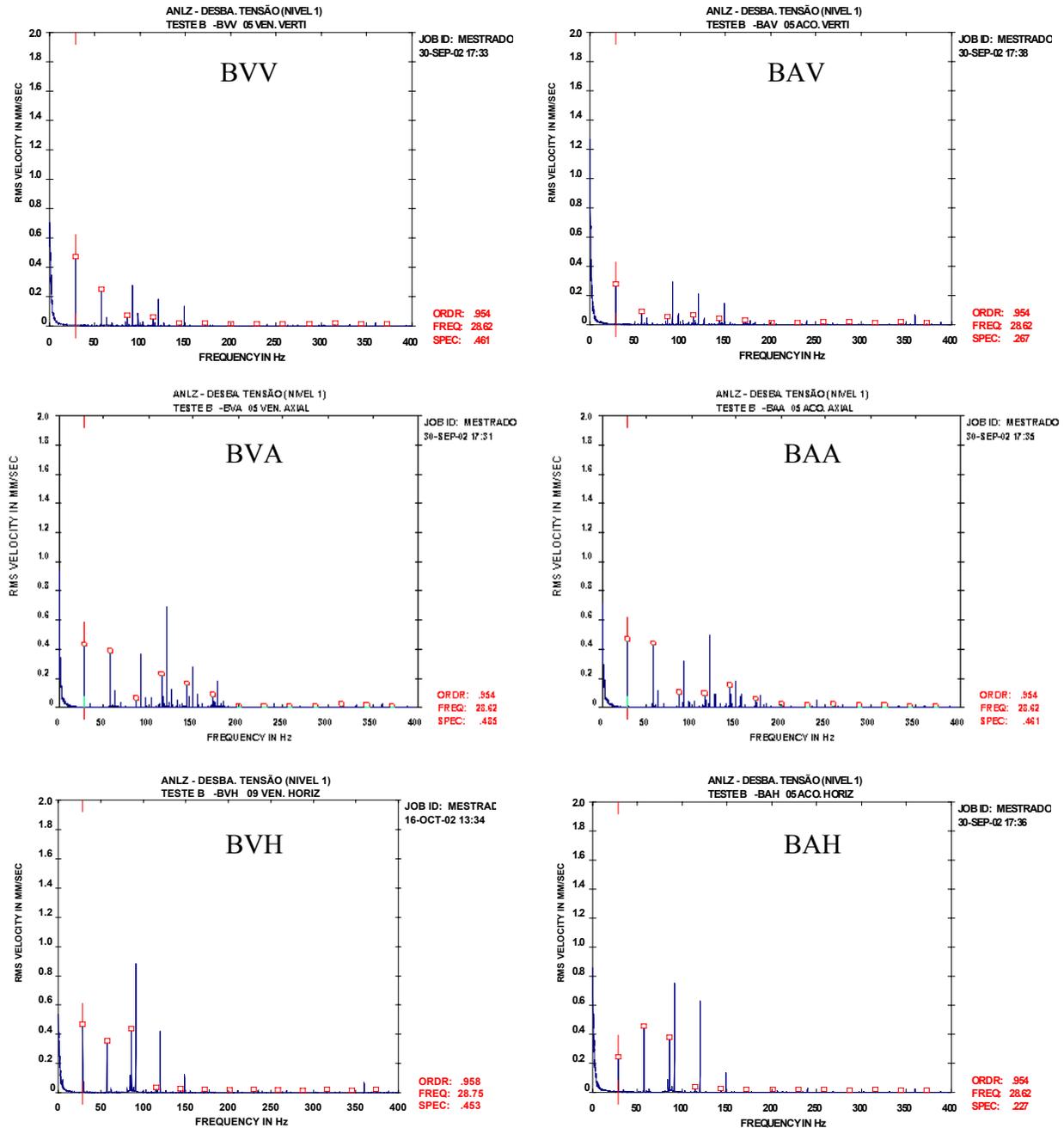


Figura 4. 5 - Espectros de vibração para o desbalanceamento de tensão (210 V).

Na Figura 4.6 têm-se os espectros de vibração para desbalanceamento de tensão (200 V).

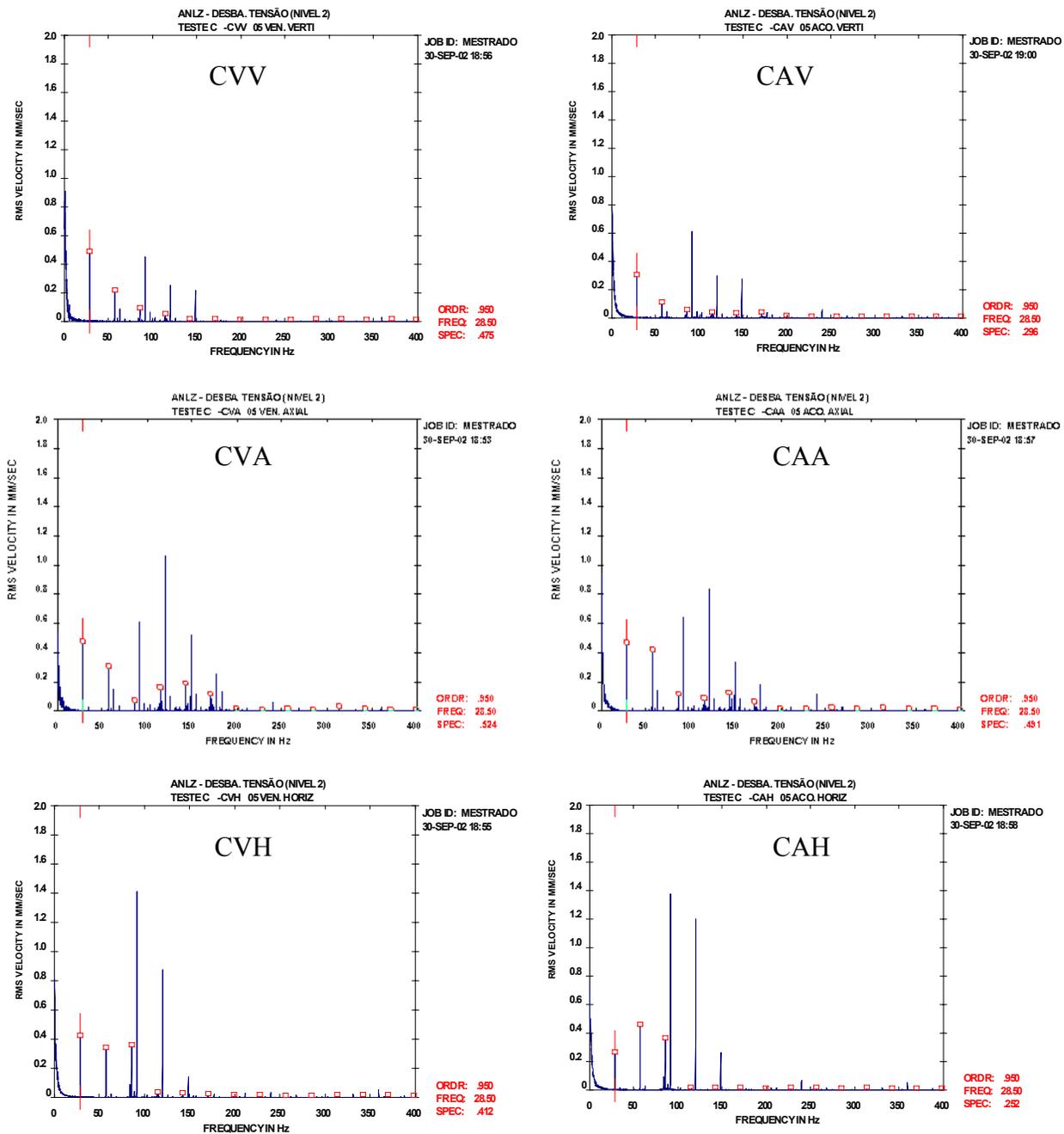


Figura 4. 6 - Espectros de vibração para o desbalanceamento de tensão (200 V).

4.2.3 Subtensão

A excitação por subtensão foi obtida diminuindo-se as tensões de saída do variavolt, Figura 4.1 [16], que alimentam o motor elétrico. Na Figura 4.7 têm-se os espectros de vibração para subtensão (200 V).

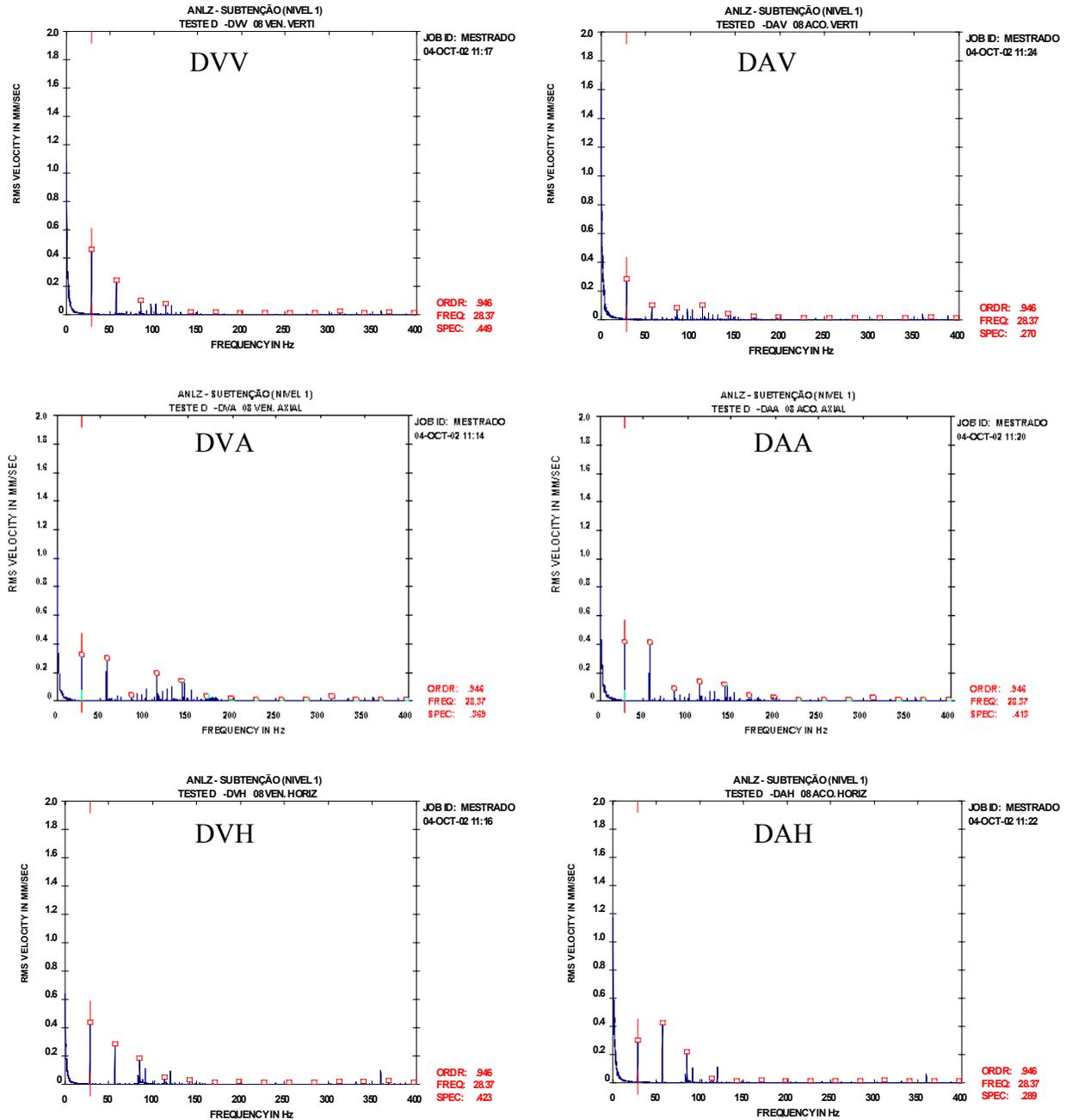


Figura 4. 7 - Espectros de vibração para subtensão (200 V).

Na Figura 4.8 têm-se os espectros de vibração para subtenção (190 V).

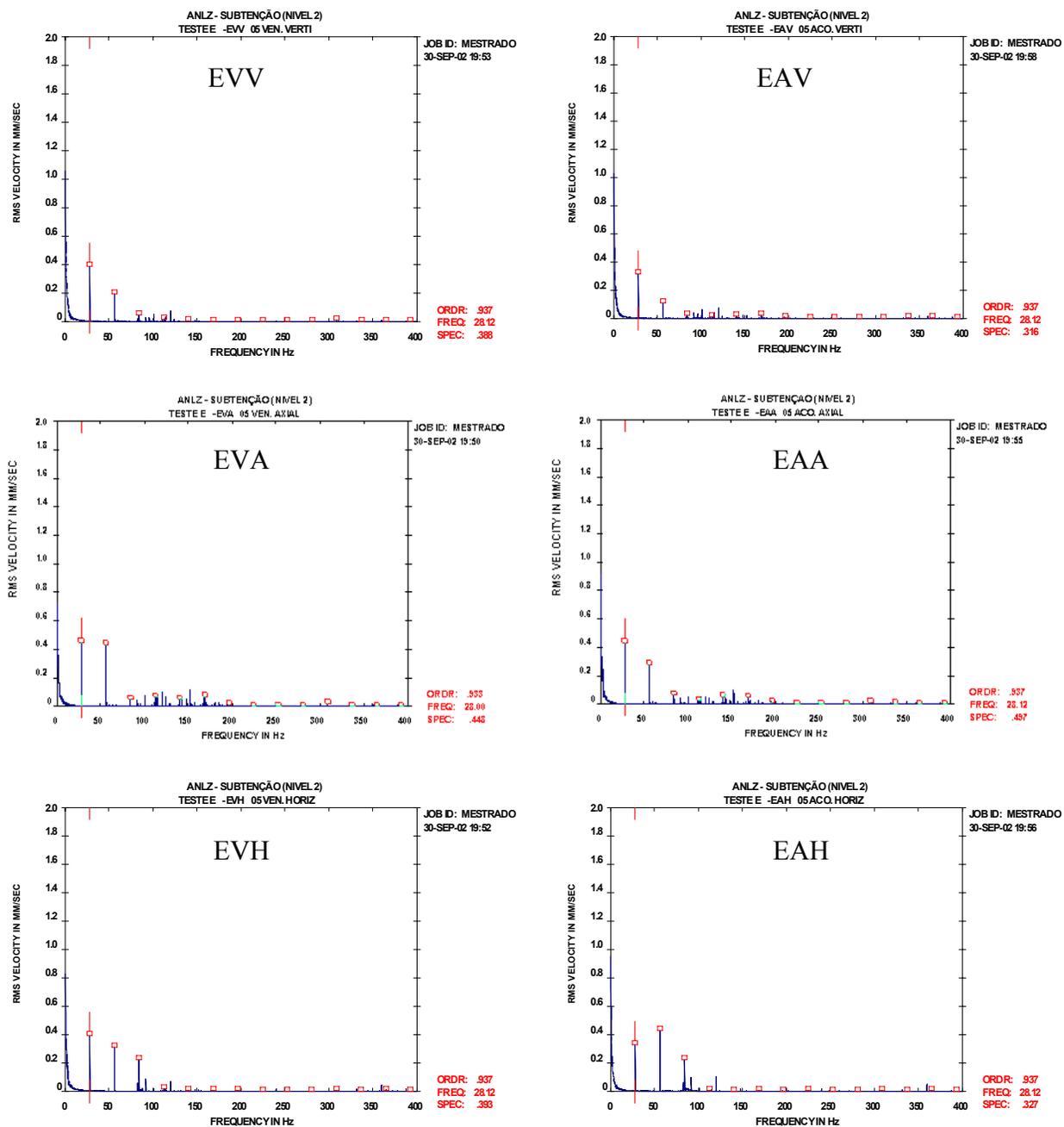


Figura 4. 8 - Espectros de vibração para subtenção (190 V).

4.2.4 Sobretensão

A excitação por sobretensão foi obtida aumentando-se as tensões de saída do variavolt que alimentam o motor elétrico. Na Figura 4.9 têm-se os espectros de vibração para sobretensão (230 V).

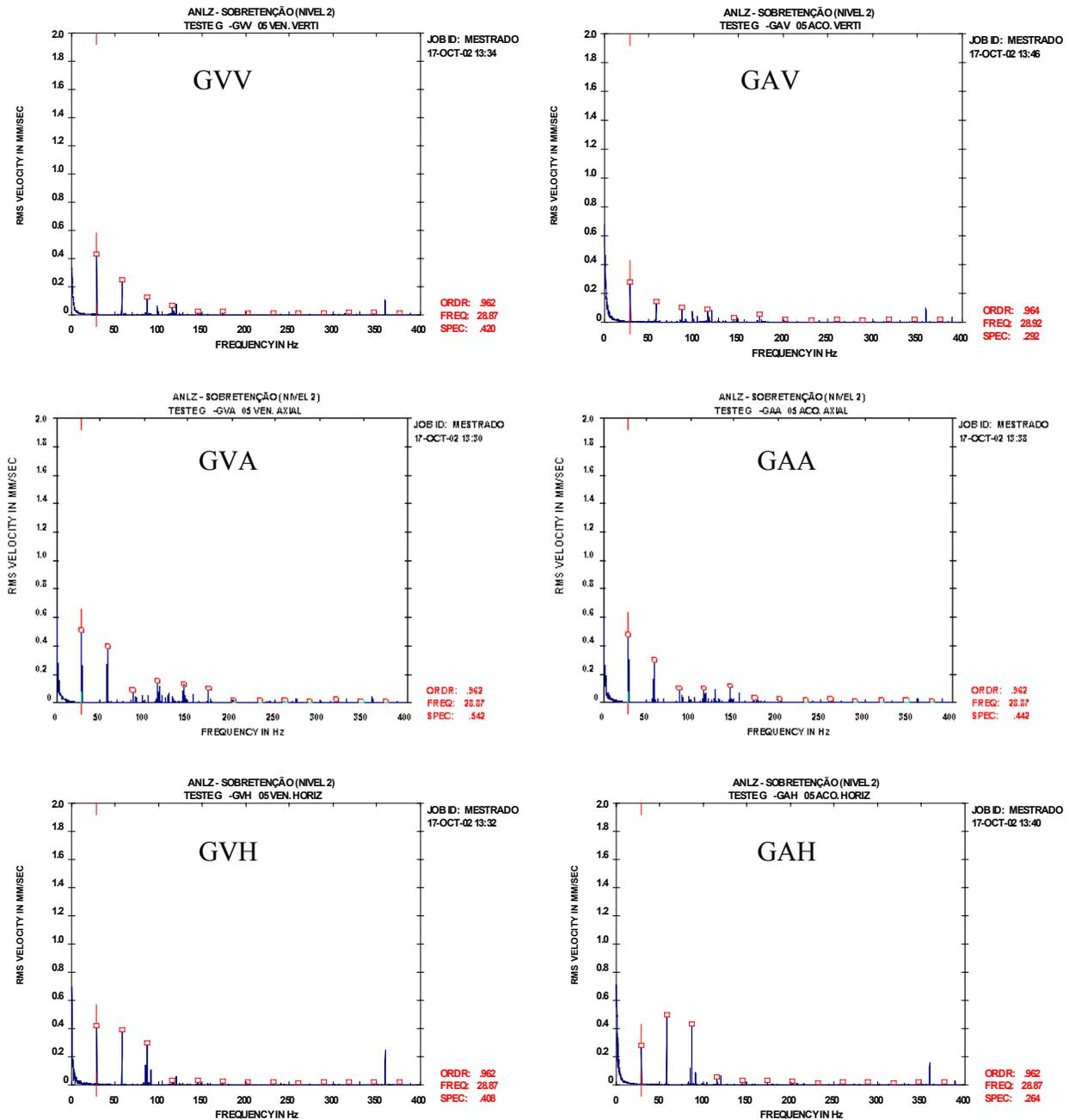


Figura 4. 9 - Espectros de vibração para sobretensão (230 V).

Na Figura 4.10 têm-se os espectros de vibração para sobretensão (240 V).

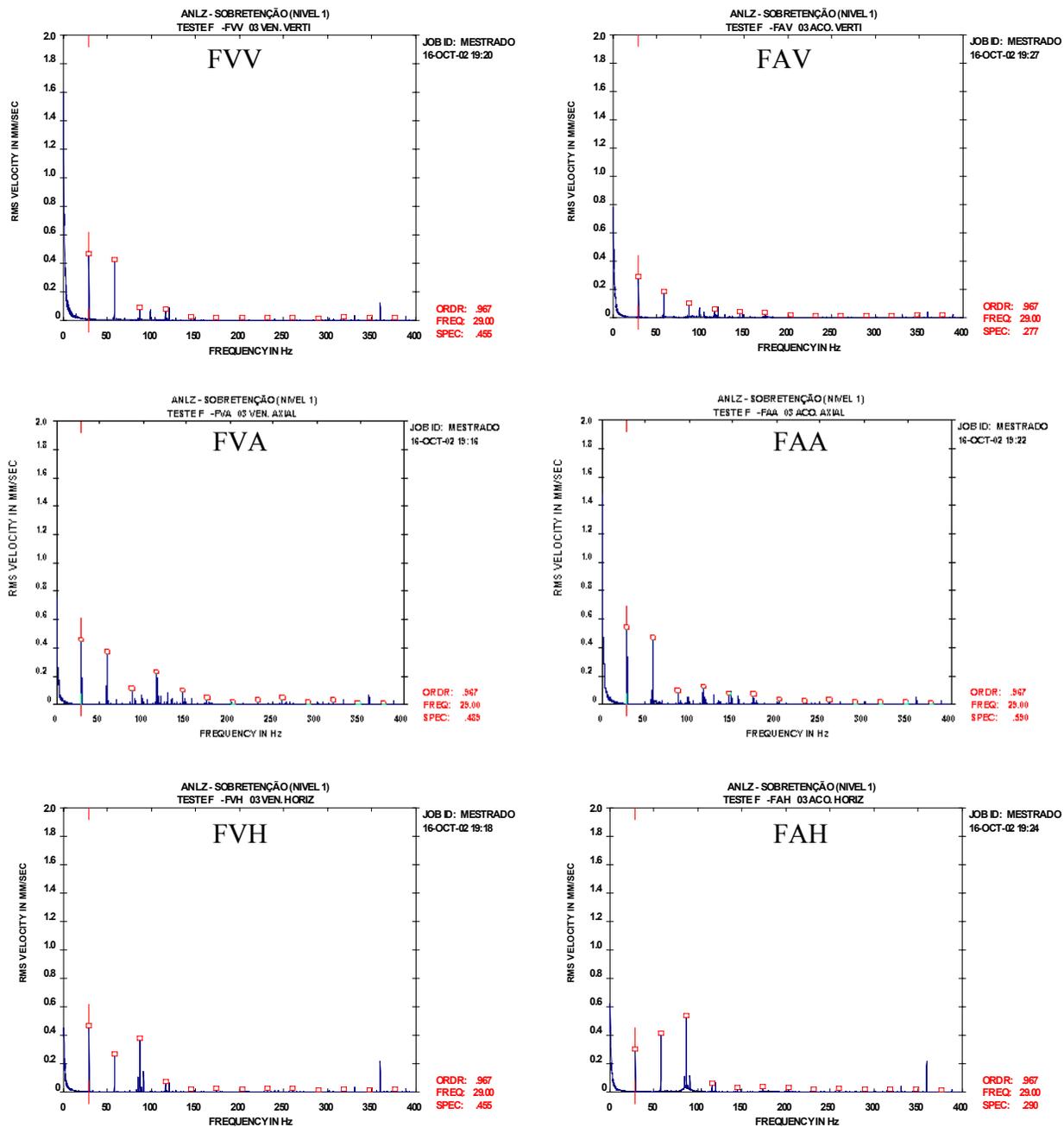


Figura 4. 10 - Espectros de vibração para sobretensão (240 V).

4.2.5 Desbalanceamento mecânico

A massa de desbalanceamento de 16g foi colocada no disco do lado do ventilador. Seus espectros de vibração são mostrados na Figura 4.11.

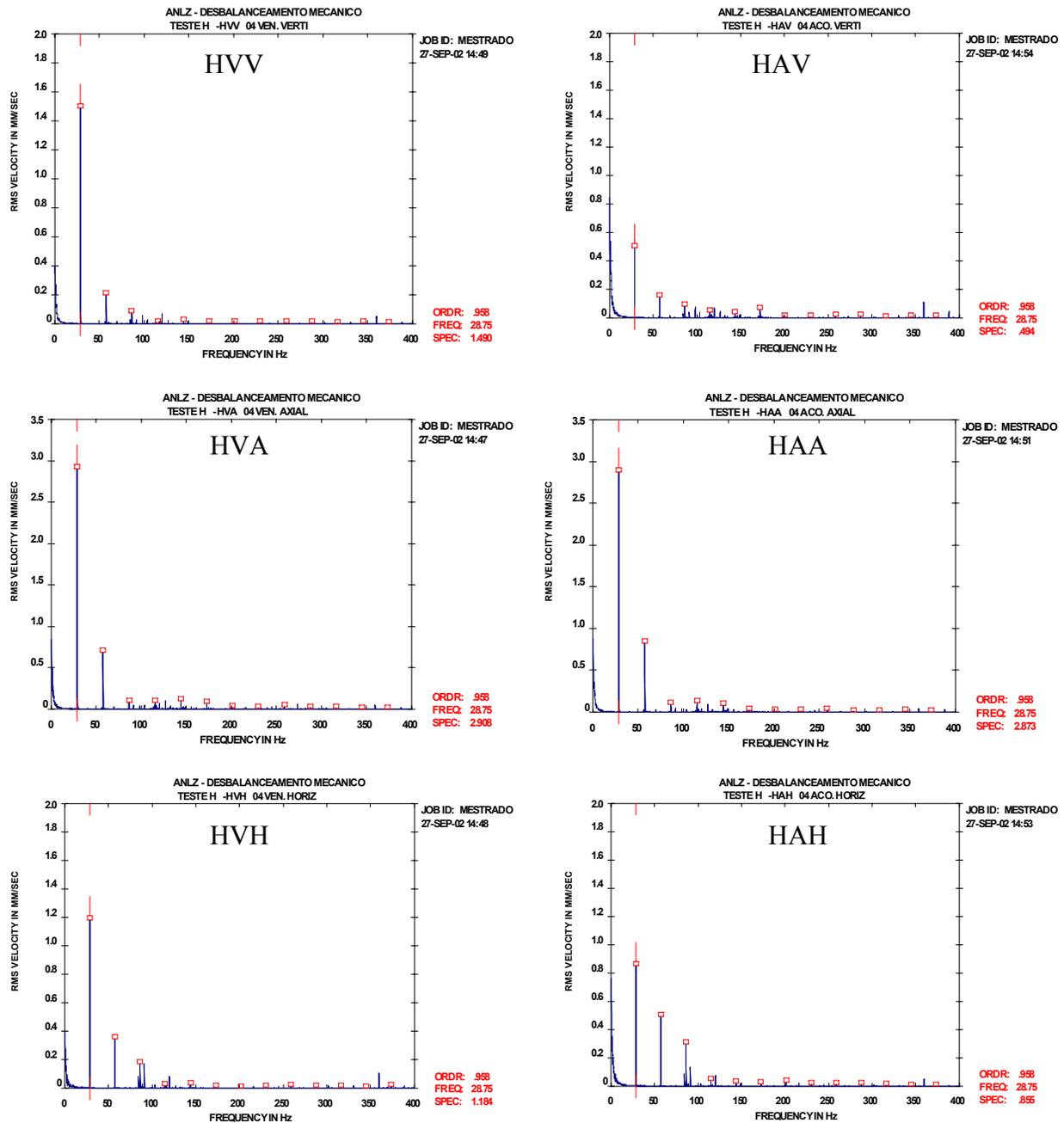


Figura 4. 11 - Espectros de vibração para desbalanceamento mecânico (16,0g).

4.2.6 Barras quebradas ou trincadas

A excitação por barras quebradas ou trincadas foi obtida furando 7 barras do rotor. Na Figura 4.12 têm-se os espectros de vibração para barras quebradas ou trincadas.

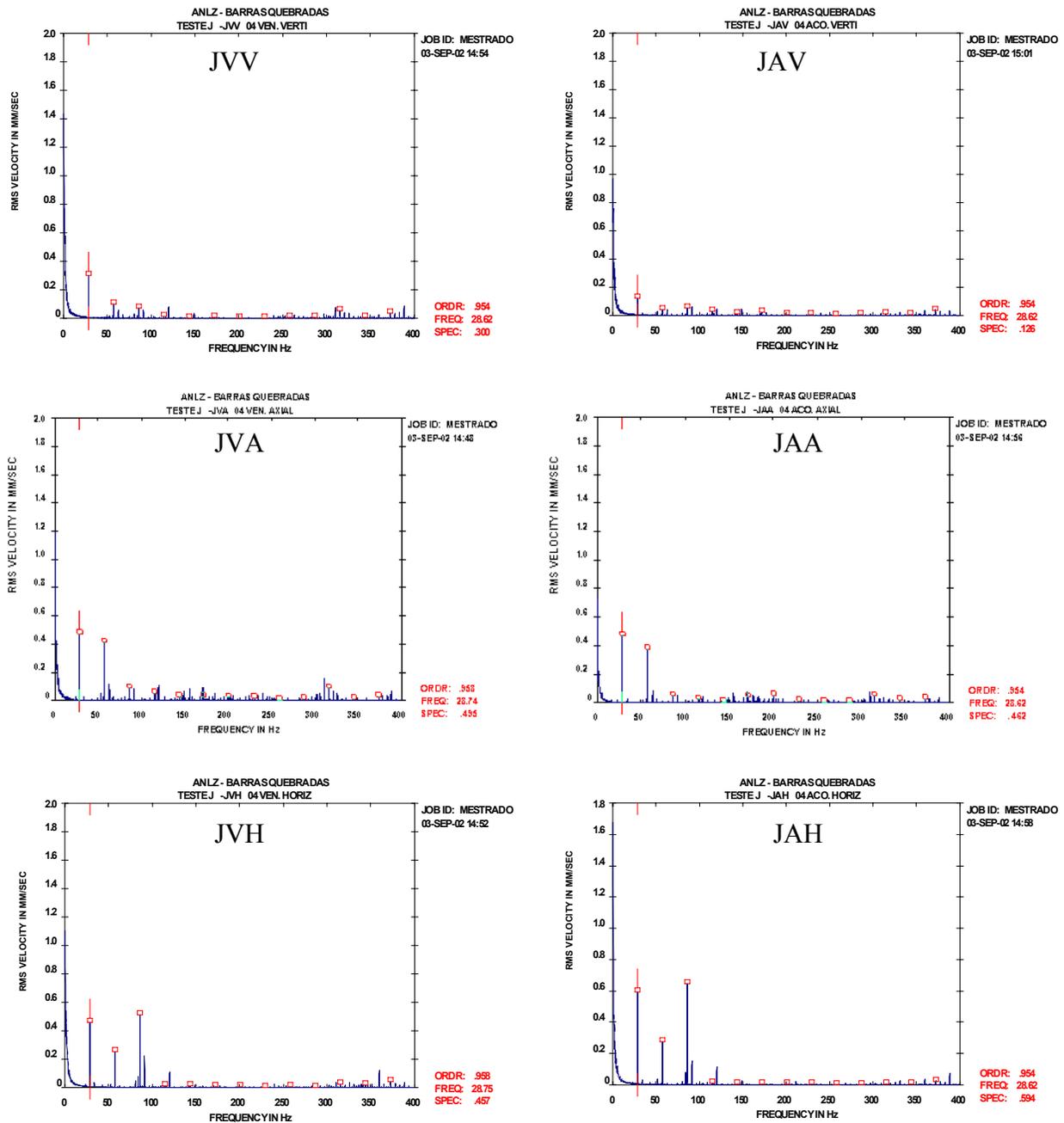


Figura 4. 12 - Espectros de vibração para barras quebradas ou trincadas.

4.2.7 Análise dos resultados

Na Figura 4.13 apresenta-se, de forma compacta a análise da frequência de rotação (f_r), para facilitar a comparação de possíveis variações entre os diferentes defeitos introduzidos. Nesta figura têm-se a média, desvio padrão e a variação em $1 \times f_r$ para a posição horizontal no lado da ventoinha. Observa-se através do desvio padrão, que os testes tiveram uma boa repetibilidade. Os defeitos de origem elétrica têm as médias de suas amplitudes baixas, próximas da condição normal de funcionamento (sem defeito) para a frequência analisada ($1 \times f_r$). Para a excitação desbalanceamento mecânico, a média das amplitudes ficou próxima de 1,2 mm/s, como esperado, uma vez que o desbalanceamento se manifesta fortemente nesta frequência.

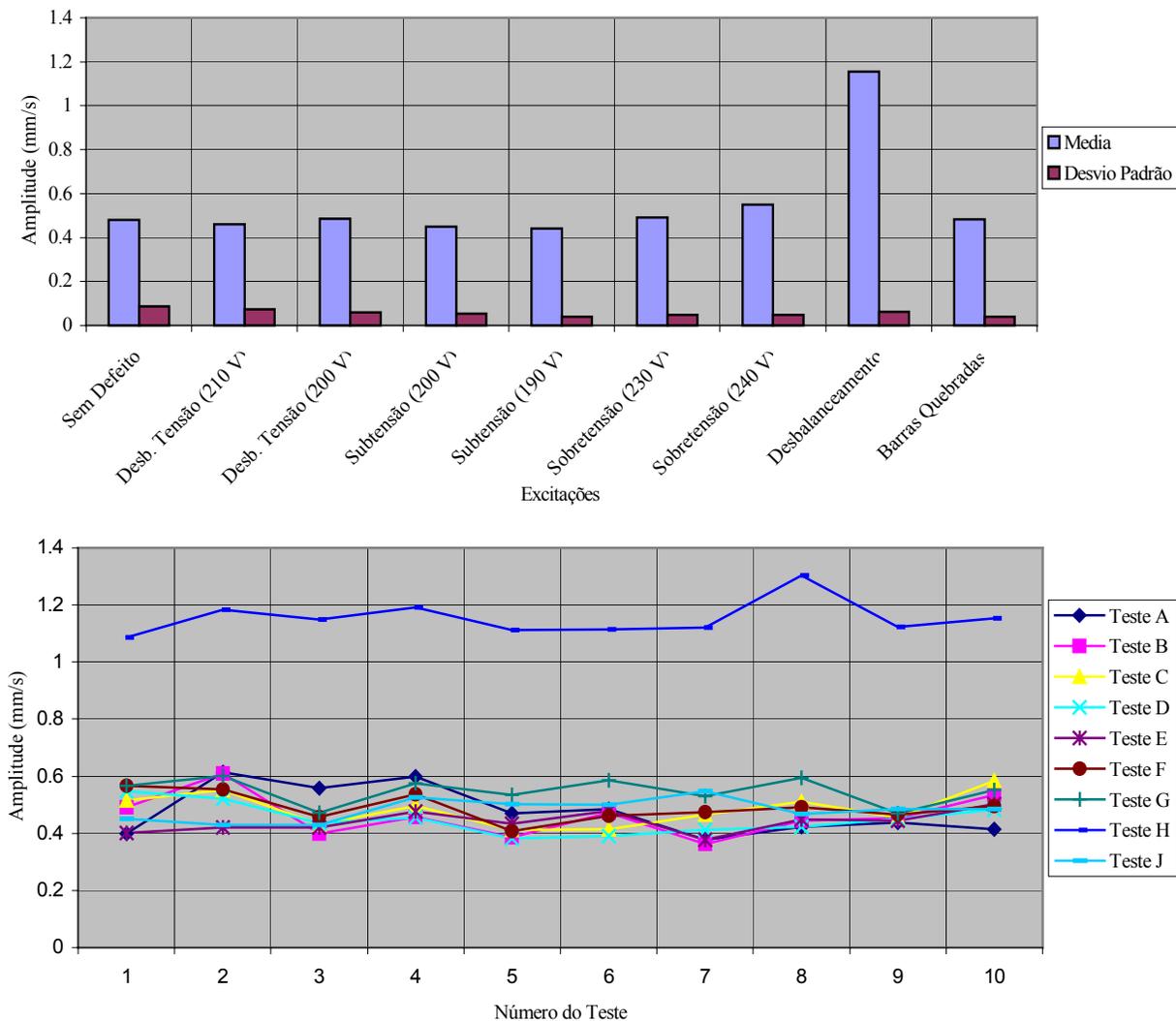


Figura 4. 13 - Média, desvio padrão e variação em $1 \times f_r$.

Para $2 \times f_r$, o desvio padrão também mostra uma boa repetibilidade dos testes, Figura 4.14. Aqui é interessante destacar que todas as médias das amplitudes estão abaixo de 0,5 mm/s, que é a condição normal de funcionamento. Isto porque o desbalanceamento não se manifesta fortemente nesta frequência. Essa frequência é característica de desalinhamento e sua baixa amplitude indica que a bancada manteve-se alinhada.

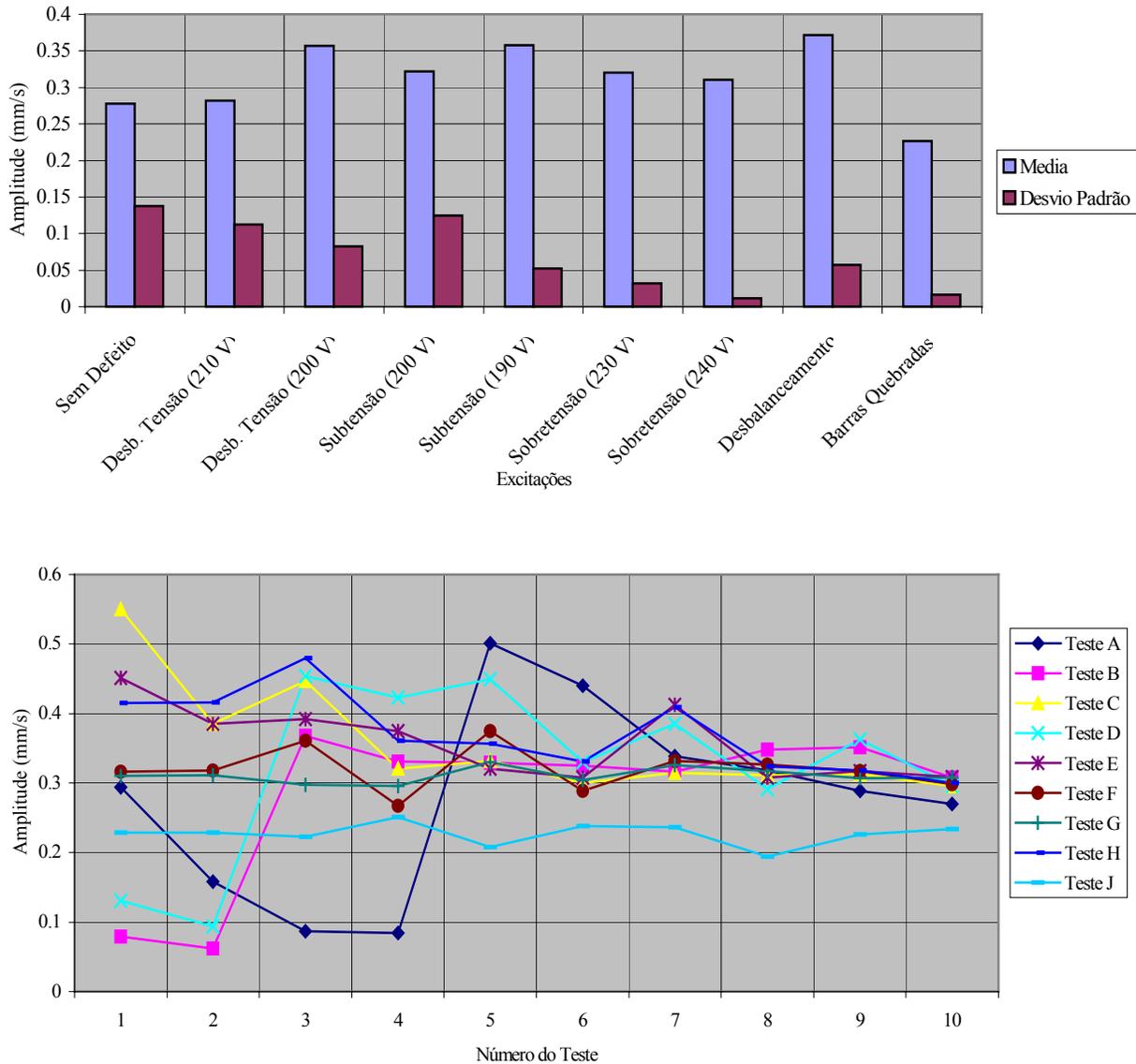


Figura 4. 14 - Média, desvio padrão e variação em $2 \times f_r$.

Para $3 \times f_r$, o desvio padrão também mostra uma boa repetibilidade dos testes, Figura 4.15. Todas as médias das amplitudes estão baixas e sendo consideradas dentro da condição normal de funcionamento. Isto porque o desbalanceamento não se manifesta fortemente nesta frequência. Essa frequência é característica de desalinhamento e sua baixa amplitude indica que a bancada manteve-se alinhada.

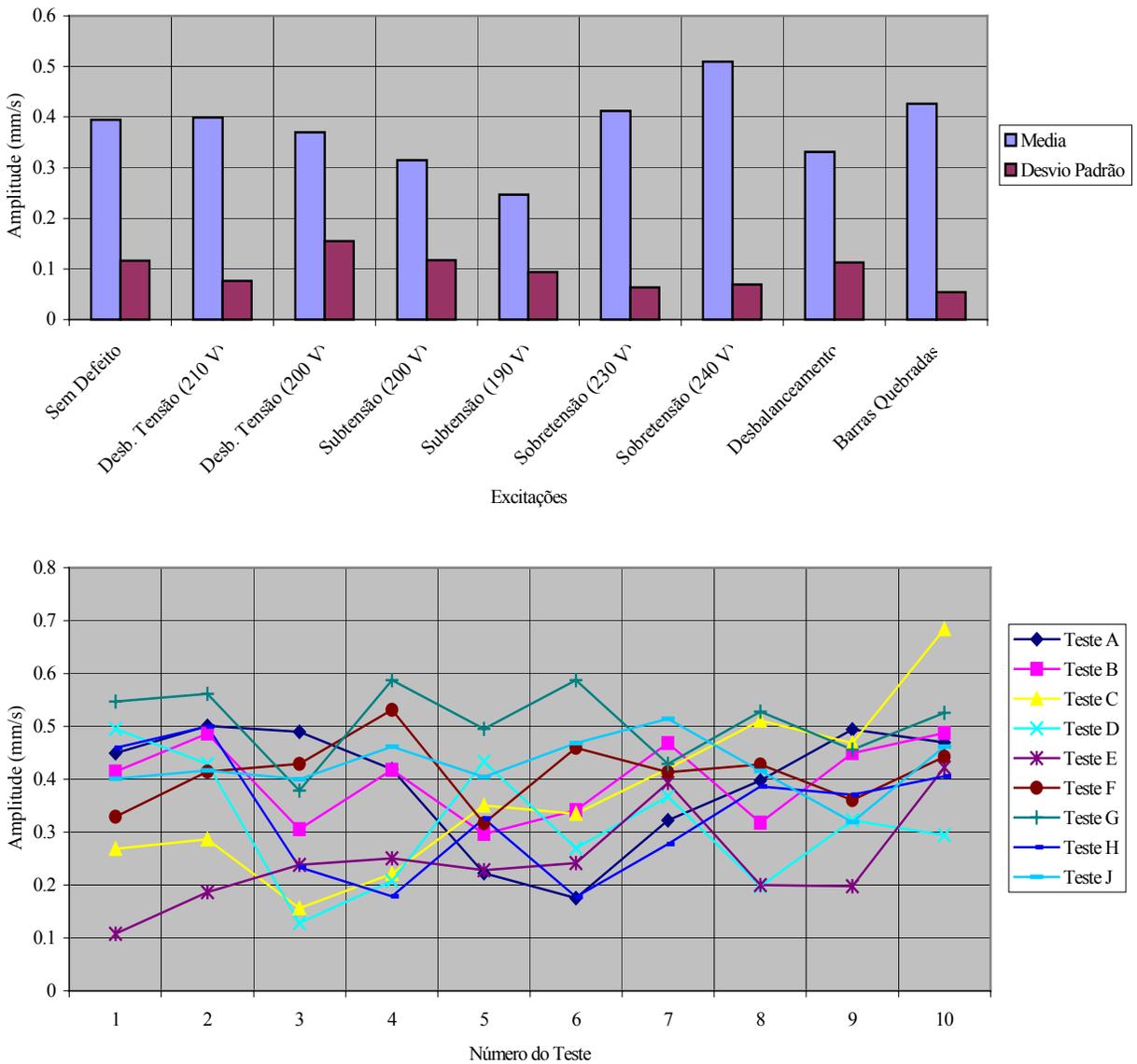


Figura 4. 15 - Média, desvio padrão e variação em $3 \times f_r$.

Na Figura 4.16 têm-se a média, desvio padrão e a variação em $2 \times f_i$, para os dez testes realizados. Observa-se através do desvio padrão, que os testes tiveram uma boa repetibilidade. O defeito de origem mecânica (desbalanceamento mecânico) e de origem elétrica (subtensão, sobretensão e barras quebradas) têm a média de sua amplitude baixa, próxima da condição normal de funcionamento (sem defeito). Para a excitação desbalanceamento de tensão, a média das amplitudes ficaram próximas de 0,6 e 1,2 mm/s, como esperado, uma vez que este problema se manifesta fortemente nesta frequência.

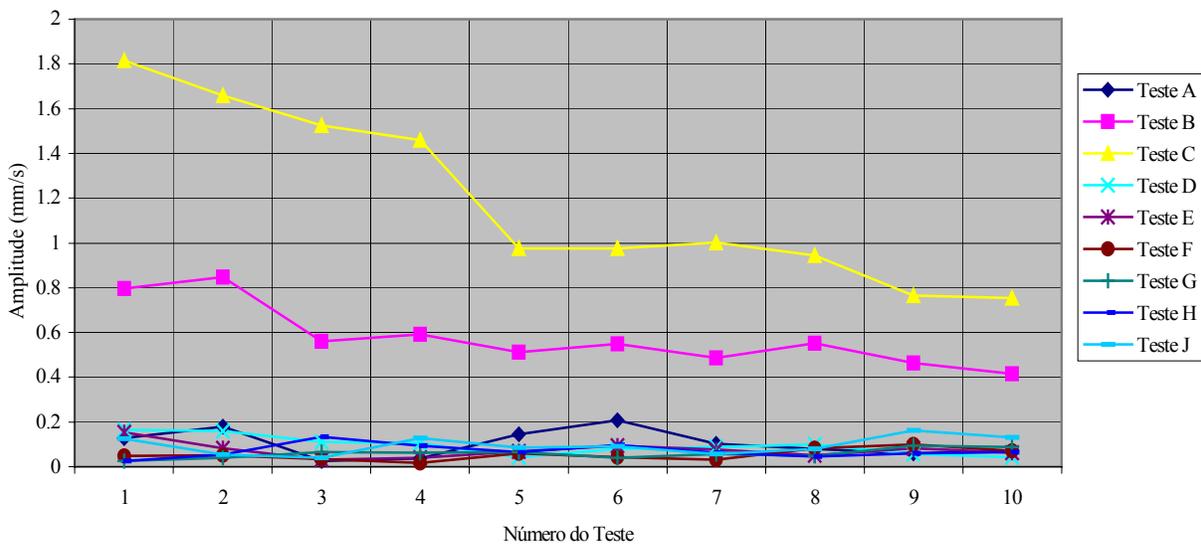
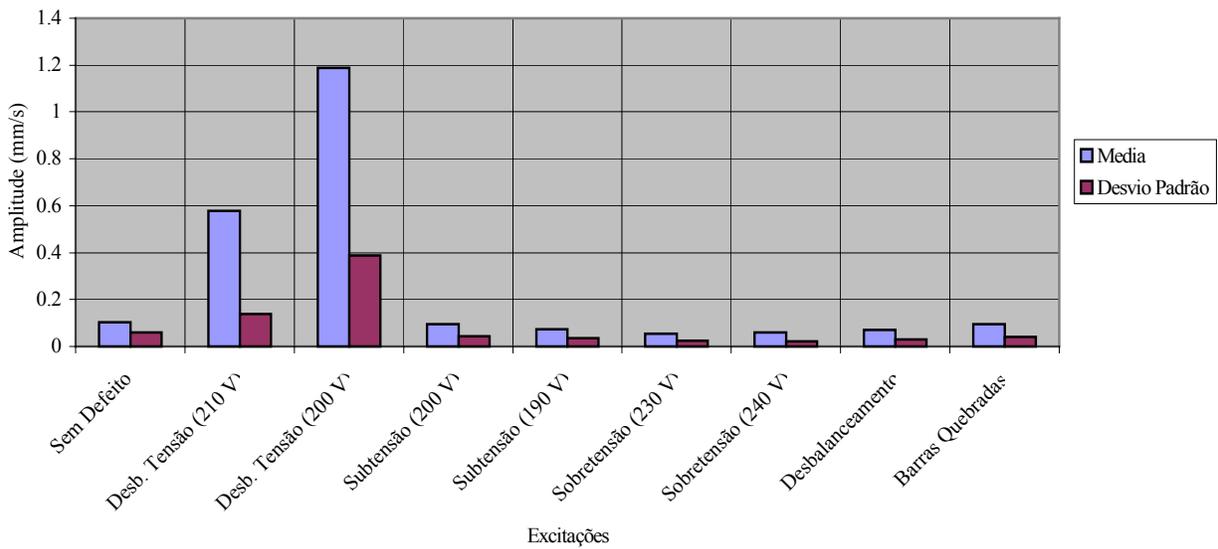


Figura 4. 16 - Média, desvio padrão e variação em $2 \times f_i$.

Na Figura 4.17 tem-se a média, desvio padrão e a variação em uma $2 \times f_1 - f_r$, para os dez testes realizados. Observa-se através do desvio padrão, que os testes tiveram uma boa repetibilidade e se comportaram de forma análoga a anterior. Para a excitação desbalanceamento de tensão, a média das amplitudes ficaram próximas de 1,0 e 1,4 mm/s, como esperado, uma vez que este problema se manifesta fortemente nesta frequência.

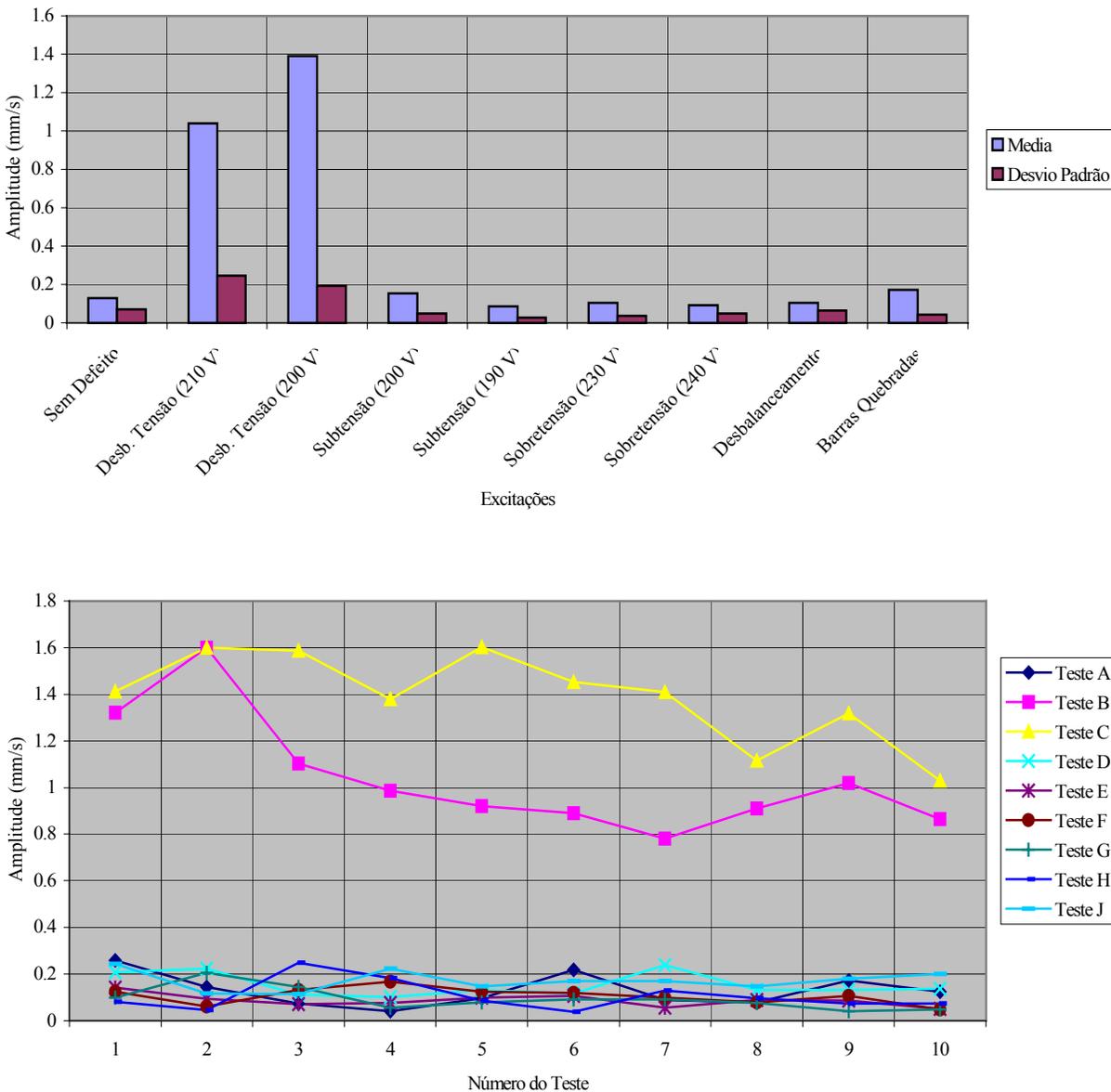


Figura 4. 17 - Média, desvio padrão e variação em $2 \times f_1 - f_r$.

4.3 Detecção das excitações de origem mecânica e elétrica através da análise de fluxo em baixa frequência

Os espectros de fluxo magnético foram coletados através da bobina de fluxo implementada na posição radial e da bobina de fluxo (343 *Flux Coil*) da CSI, afixada central e axialmente ao motor elétrico, mantendo-se sempre a mesma posição, Figura 4.18.

Devido à necessidade de colocação do disco de balanceamento no lado da ventoinha, instalou-se a bobina de fluxo num suporte (pneu), fixado à estrutura da bancada. Na Figura 4.19 têm-se a bobina de fluxo CSI e um exemplo da medição em campo.

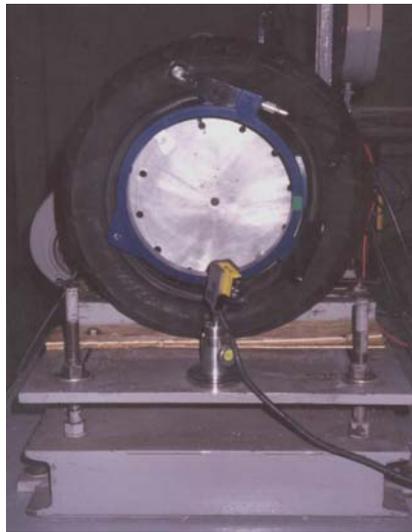


Figura 4. 18 - Bobina de fluxo fixada axialmente.



Figura 4. 19 - Medição em campo com a bobina CSI.

Os espectros coletados com o sensor comercial, serão usados para validação dos espectros coletados com a bobina de fluxo implementada.

O coletor de sinais foi configurado para janela *Hanning*, 3200 linhas, 10 médias, faixa de frequência de 0 a 200 Hz para baixa frequência, sendo as amplitudes medidas em dB. Os espectros de fluxo magnético em dB são referenciados à tensão de 1 V.

Os espectros de fluxo magnético podem ser identificados por três caracteres: o primeiro indica o tipo de excitação e poderá ser, *A* de sem defeito: valor eficaz da tensão $V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = 220$ V; *B* de desbalanceamento de tensão: $V_{ab} = 210$ V, $V_{bc} = 220$ e $V_{ca} = 210$ V; *C* de desbalanceamento de tensão: $V_{ab} = 200$ V, $V_{bc} = 220$ e $V_{ca} = 200$ V; *D* de subtensão: $V_{ab} = 200$ V, $V_{bc} = 200$ e $V_{ca} = 200$ V; *E* de subtensão: $V_{ab} = 190$ V, $V_{bc} = 190$ e $V_{ca} = 190$ V; *F* de sobretensão: $V_{ab} = 240$ V, $V_{bc} = 240$ e $V_{ca} = 240$ V; *G* de sobretensão: $V_{ab} = 230$ V, $V_{bc} = 230$ e $V_{ca} = 230$ V e *H* de desbalanceamento mecânico: colocação da massa de 16,0 g no disco do lado do ventilador.

O segundo e o terceiro caracteres poderão ser, *F1* de análise de fluxo - bobina CSI baixa frequência; *F3* de análise de fluxo - bobina implementada na posição radial baixa frequência; *F4* de análise de fluxo - bobina CSI alta frequência e *F6* de análise de fluxo - bobina implementada na posição radial alta frequência.

No item 4.3.6 têm-se um estudo das principais frequências características dos problemas de origem elétrica e mecânica ($f_1 \pm 1 \times f_r$, $f_1 + 2 \times f_r$ e $f_1 + 3 \times f_r$) para baixa frequência.

4.3.1 Condição normal de funcionamento

Na Figura 4.20 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição normal de funcionamento do motor elétrico.

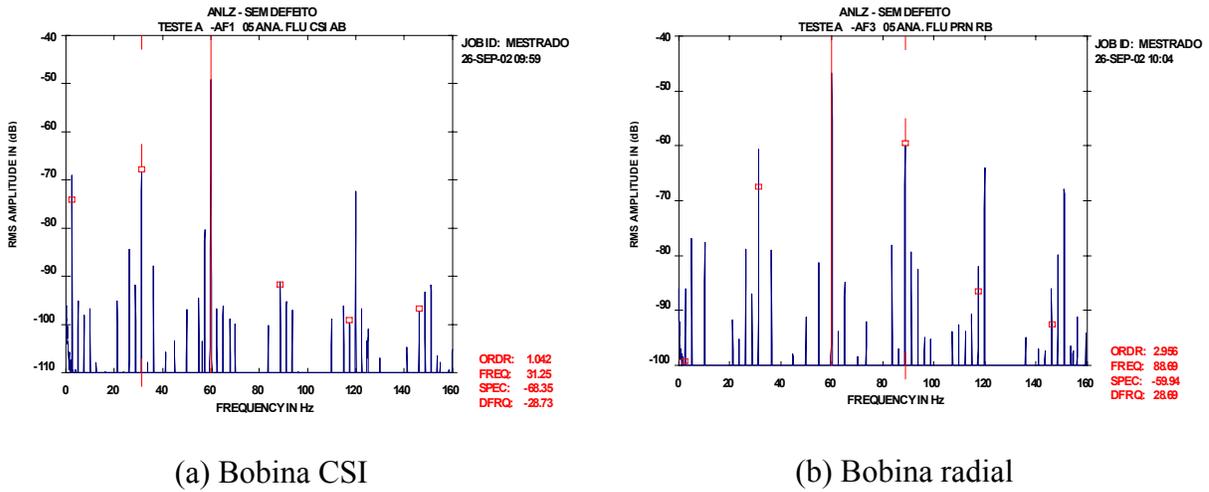


Figura 4. 20 - Espectros de fluxo magnético para a condição normal de funcionamento.

4.3.2 Desbalanceamento de tensão

Na Figura 4.21 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de desbalanceamento de tensão (210 V) do motor elétrico.

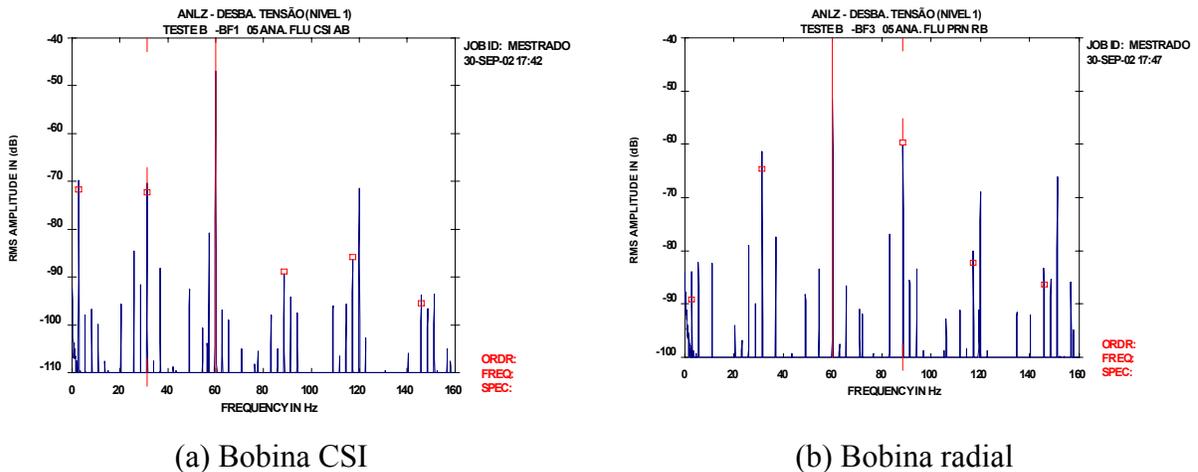
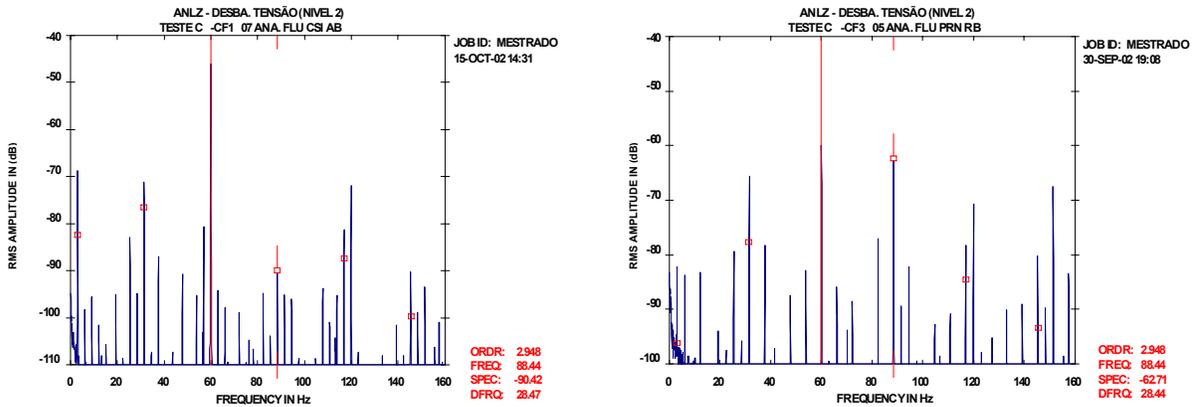


Figura 4. 21 - Espectros de fluxo magnético para o desbalanceamento de tensão (210 V).

Na Figura 4.22 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de desbalanceamento de tensão (200 V) do motor elétrico.



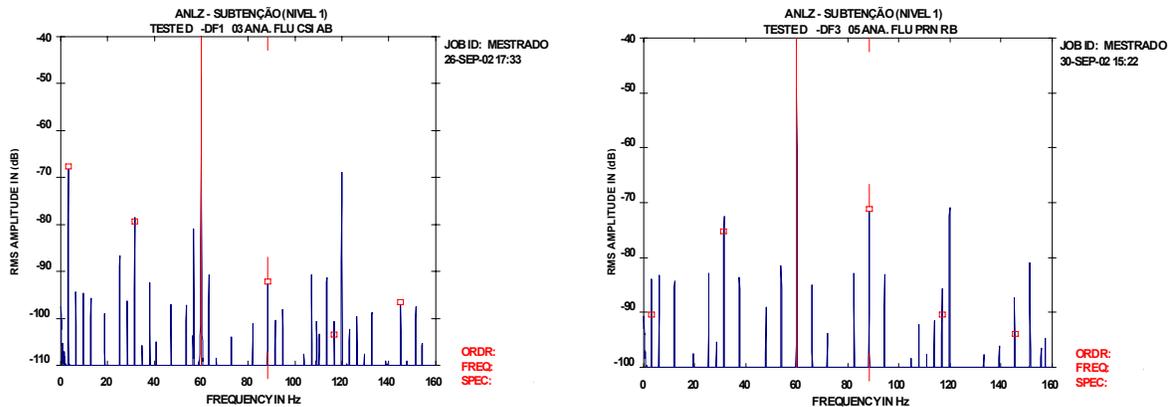
(a) Bobina CSI

(b) Bobina radial

Figura 4. 22 - Espectros de fluxo magnético para desbalanceamento de tensão (200 V).

4.3.3 Subtensão

Na Figura 4.23 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de subtensão (200 V) do motor elétrico.

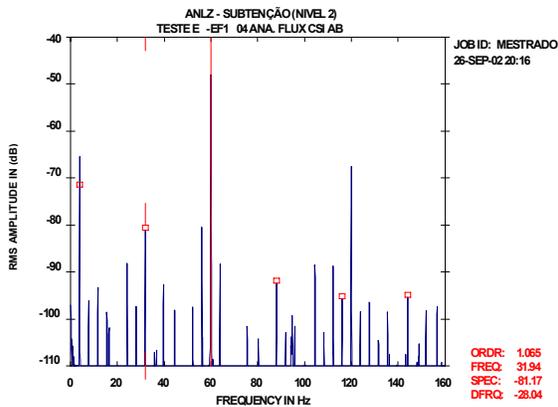


(a) Bobina CSI

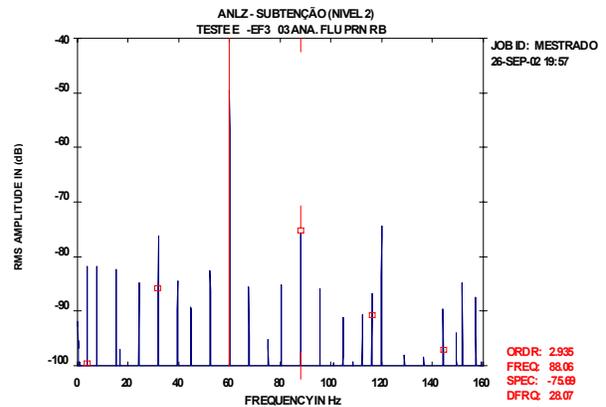
(b) Bobina radial

Figura 4. 23 - Espectros de fluxo magnético para subtensão (200 V).

Na Figura 4.24 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de subtensão (190 V) do motor elétrico.



(a) Bobina CSI

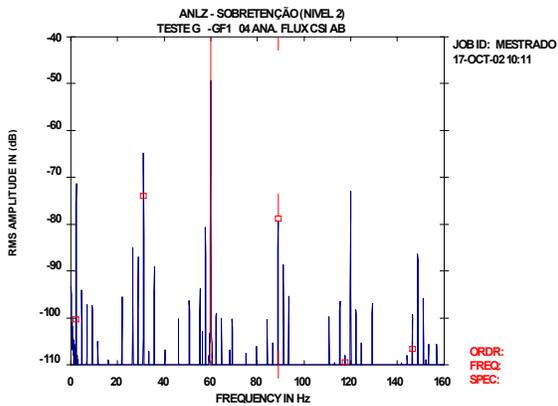


(b) Bobina Radial

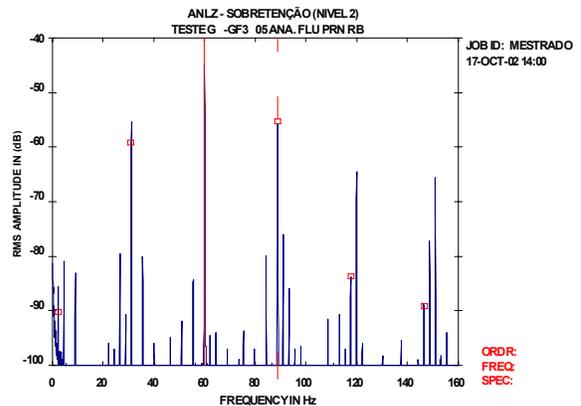
Figura 4. 24 - Espectros de fluxo magnético para subtensão (190 V).

4.3.4 Sobretensão

Na Figura 4.25 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de sobretensão (230 V) do motor elétrico.



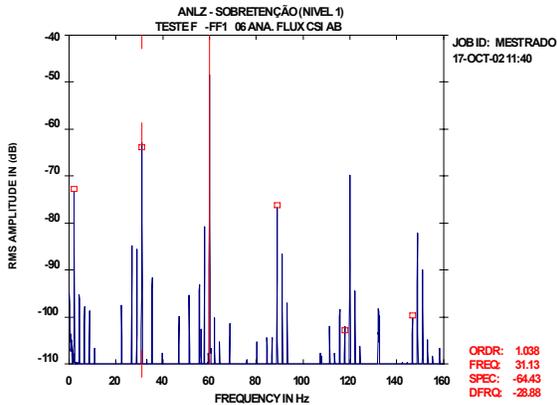
(a) Bobina CSI



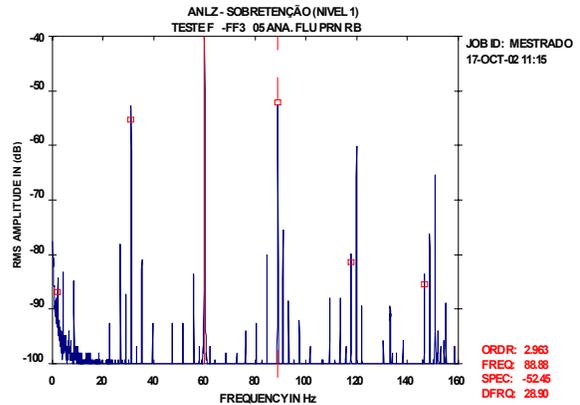
(b) Bobina radial

Figura 4. 25 - Espectros de fluxo magnético para sobretensão (230 V).

Na Figura 4.26 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de sobretensão (240 V) do motor elétrico.



(a) Bobina CSI

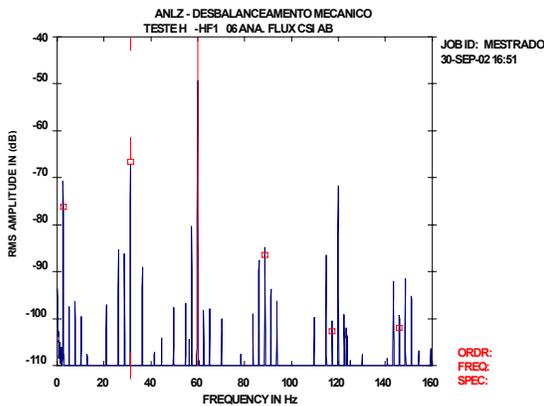


(b) Bobina radial

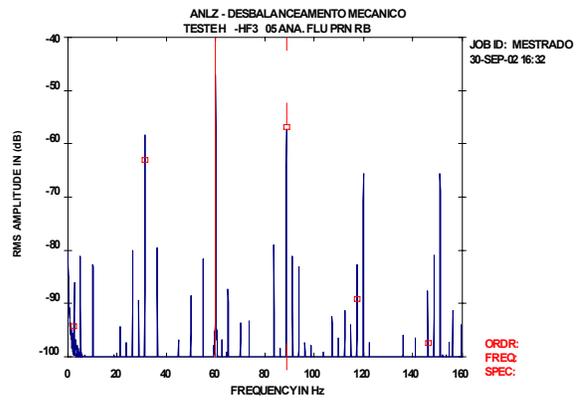
Figura 4. 26 - Espectros de fluxo magnético para sobretensão (240 V).

4.3.5 Desbalanceamento mecânico

Na Figura 4.27 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de desbalanceamento mecânico do motor elétrico.



(a) Bobina CSI



(b) Bobina radial

Figura 4. 27 - Espectros de fluxo magnético para desbalanceamento mecânico (16,0g).

4.3.6 Análise dos resultados

Nas Figuras 4.28 e 4.29 têm-se a média e o desvio padrão da amplitude em $f_l - 1 \times f_r$, para os dez testes realizados. Observa-se que a amplitude desta frequência diminuiu para a condição de subtensão e aumentou para a sobretensão, podendo ser considerada como frequência determinísticas para estes tipos de problemas. As duas bobinas, CSI e implementada (posição radial), detectaram as variações das amplitudes nesta frequência.

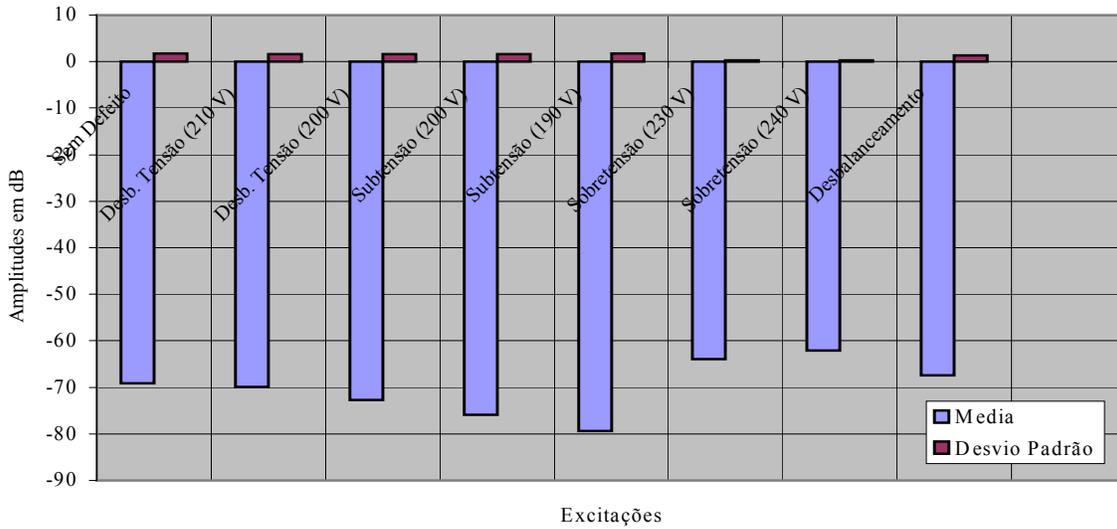


Figura 4. 28 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_l - 1 \times f_r$ (bobina CSI).

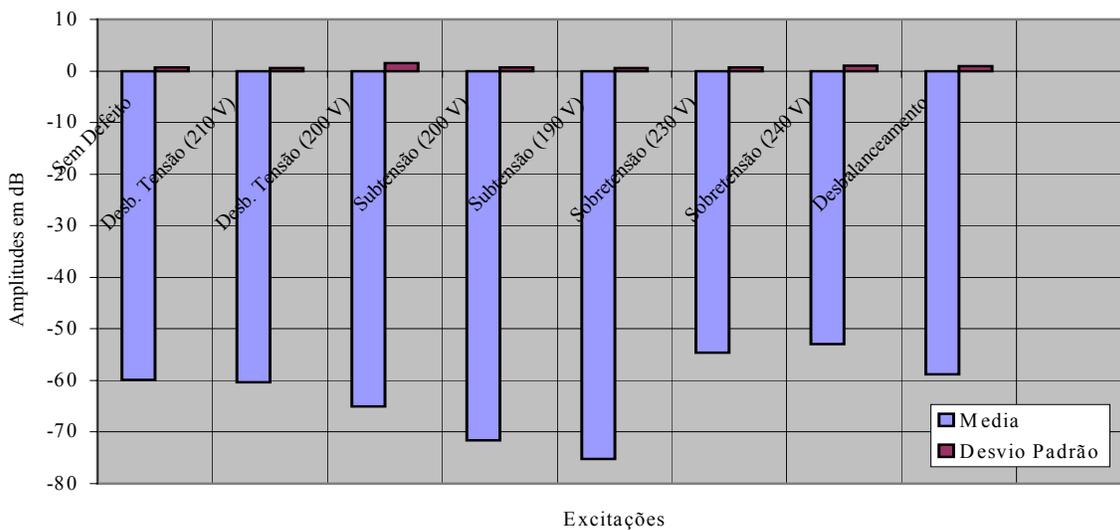


Figura 4. 29 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_l - 1 \times f_r$ (bobina radial).

Nas Figuras 4.30 e 4.31 têm-se a média e o desvio padrão da amplitude em f_1 , para os dez testes realizados. Observa-se que a amplitude desta frequência manteve-se constante para a bobina CSI.

Para a bobina radial, f_1 diminuiu no teste de desbalanceamento de tensão e teve um pequeno aumento para a sobretensão, podendo ser considerada como frequência determinística para estes tipos de problemas.

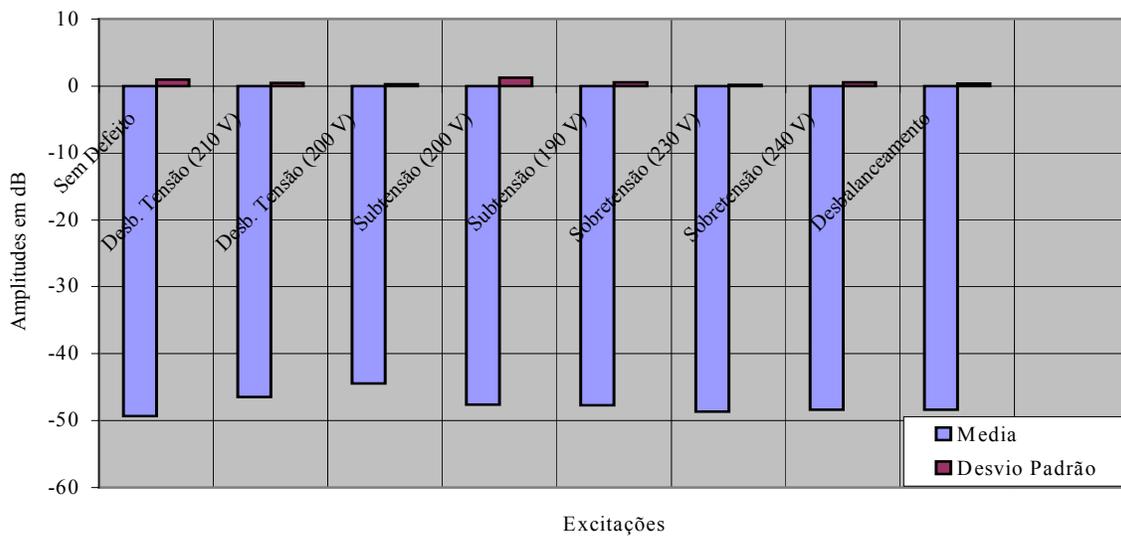


Figura 4. 30 - Média e desvio padrão para a amplitude em f_1 (bobina CSI).

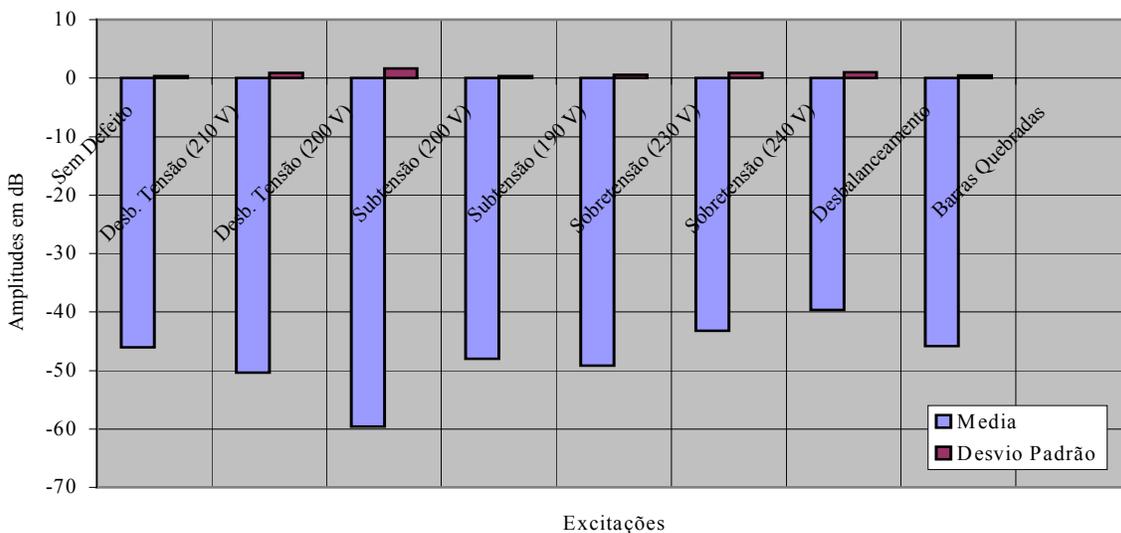


Figura 4. 31 - Média e desvio padrão para a amplitude em f_1 (bobina radial).

Nas Figuras 4.32 e 4.33 têm-se a média e o desvio padrão da amplitude em $f_1 + f_r$, para os dez testes realizados. Observa-se que a amplitude desta frequência manteve-se com pequenas variações no teste de subtensão e sobretensão usando a bobina CSI.

Para a bobina radial, $f_1 + f_r$ diminuiu no teste de subtensão e teve uma pequena variação para os demais testes, podendo ser considerada como frequência determinística para este tipo de problema.

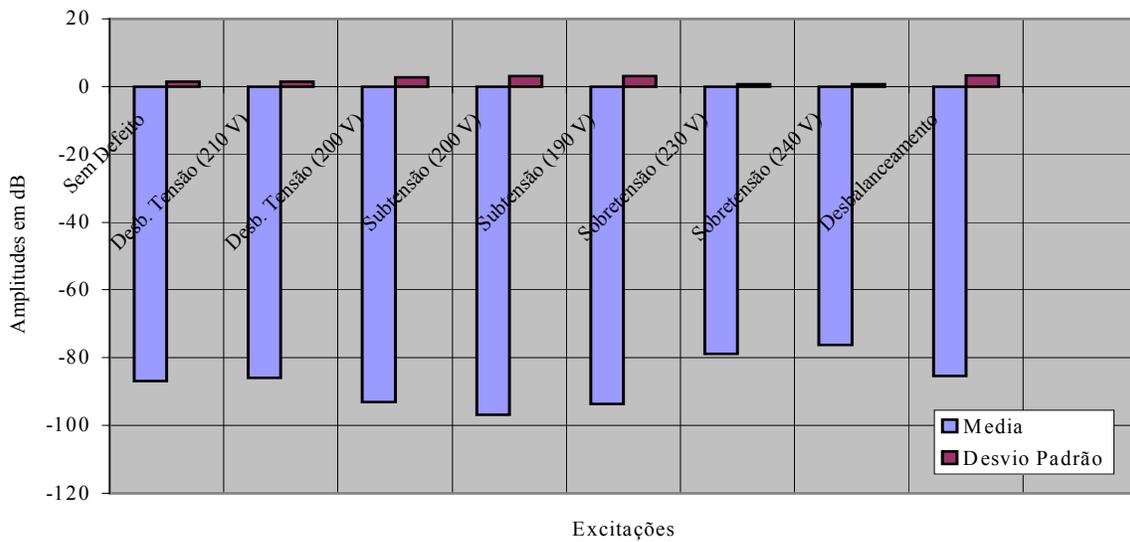


Figura 4.32 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_1 + f_r$ (bobina CSI).

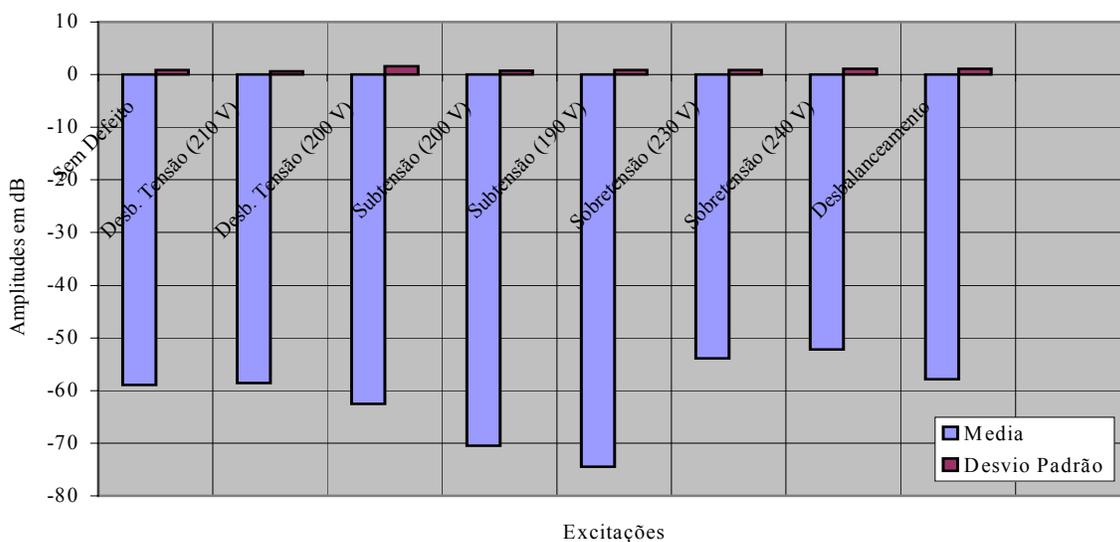


Figura 4.33 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_1 + f_r$ (bobina radial).

Nos espectros coletados com a bobina CSI, Figura 4.34, observa-se que as amplitudes desta frequência aumentaram para o teste de desbalanceamento de tensão e mantiveram-se com pequenas variações nos demais testes. Neste caso, $f_1 + 2 \times f_r$ pode ser considerada como frequência determinísticas para estes tipos de problemas.

Para os espectros coletados com a bobina radial, as amplitudes mantiveram-se com pequenas variações, Figura 4.35. Neste caso, $f_1 + 2 \times f_r$ não pode ser considerada como frequência determinísticas para estes tipos de problemas.

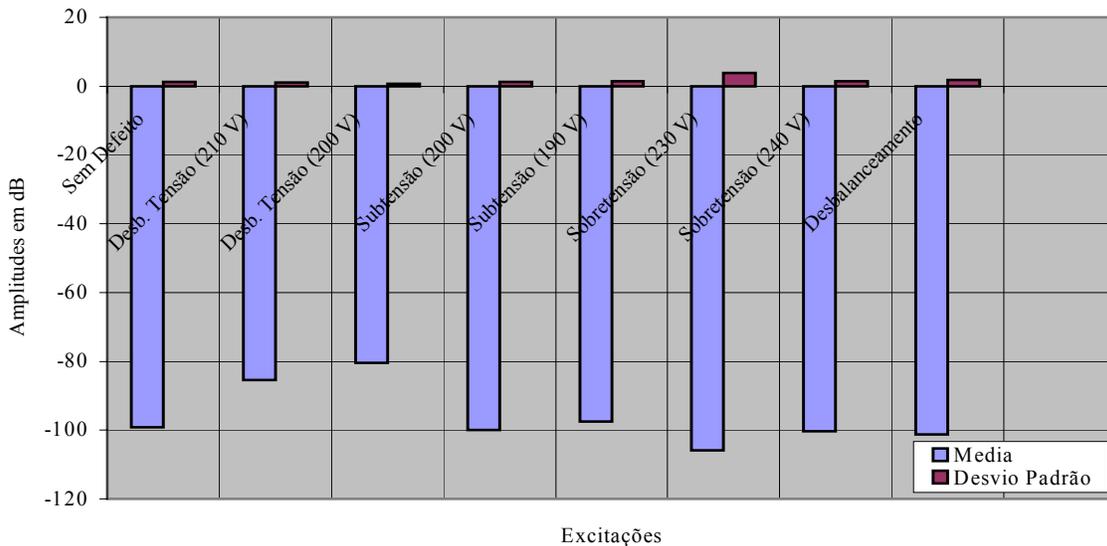


Figura 4. 34 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_1 + 2 \times f_r$ (bobina CSI).

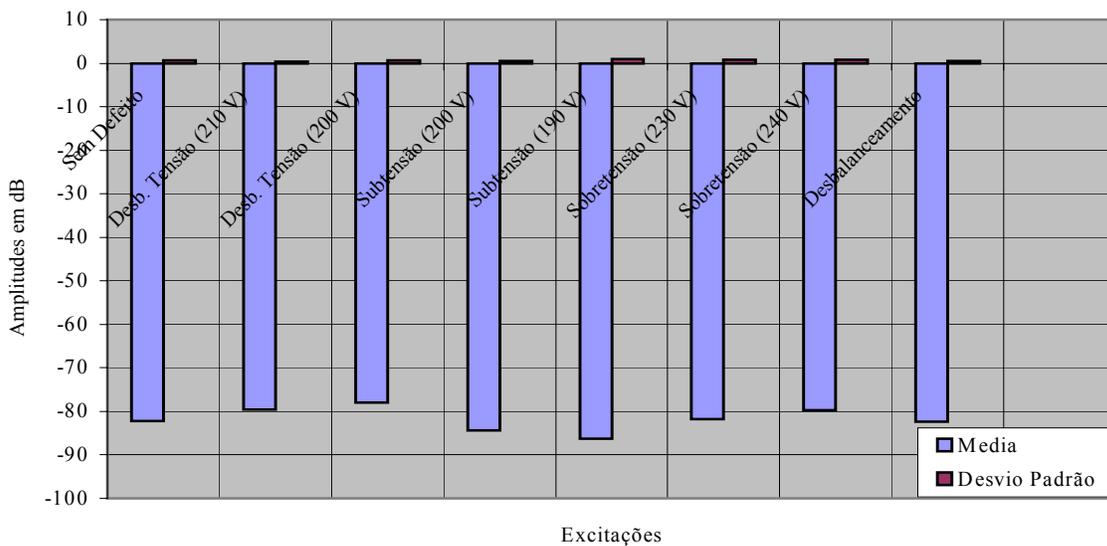


Figura 4. 35 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_1 + 2 \times f_r$ (bobina radial).

Nas Figuras 4.36 e 4.37 têm-se a média e o desvio padrão da amplitude em $f_1 + 3 \times f_r$, para os dez testes realizados. Observa-se que a amplitude desta frequência manteve-se com pequenas variações para todos os testes realizados, tanto para a bobina CSI quanto para a radial.

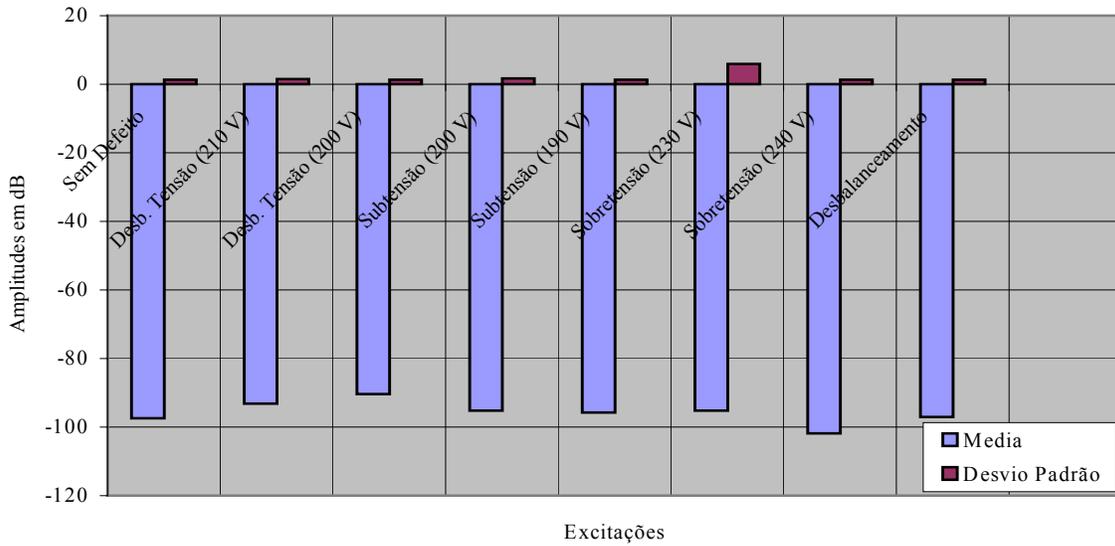


Figura 4. 36 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_1 + 3 \times f_r$ (bobina CSI).

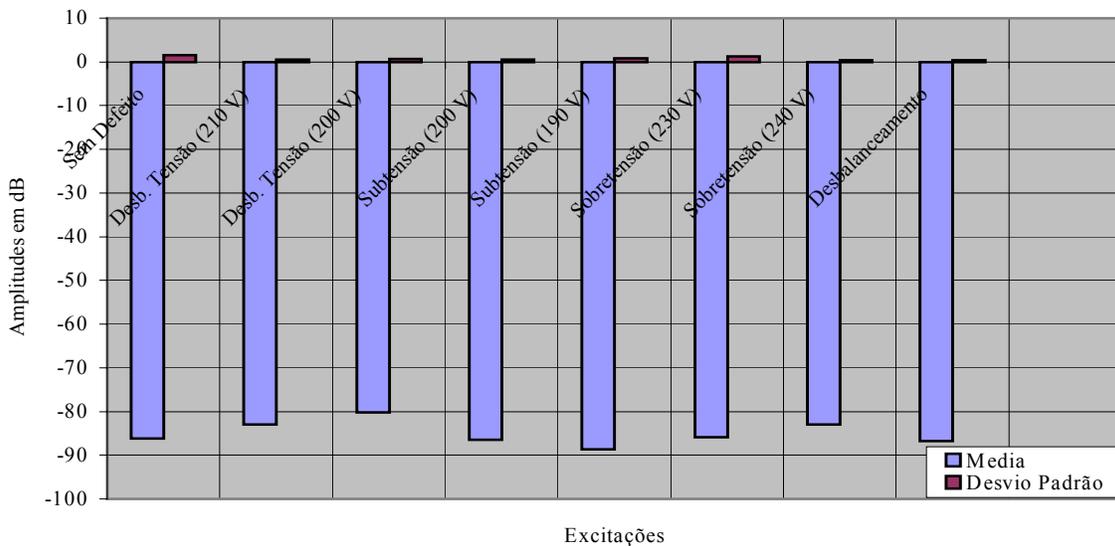


Figura 4. 37 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_1 + 3 \times f_r$ (bobina radial).

4.4 Detecção das excitações de origem mecânica e elétrica através da análise de fluxo em alta frequência

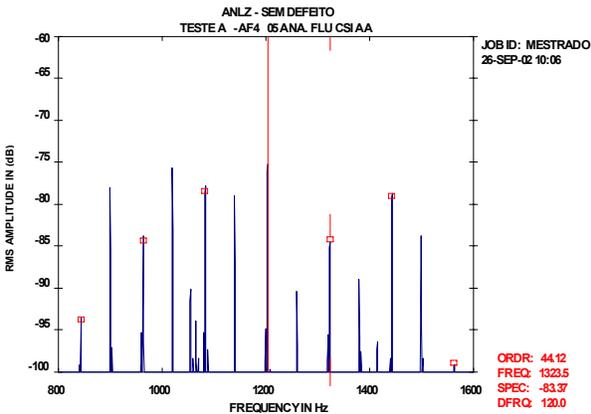
Os sinais foram coletados através das bobinas de fluxo implementada na posição radial e CSI. O analisador foi configurado para janela *Hanning*, 3200 linhas, 10 médias, faixa de frequência de 0 a 2000 Hz para alta frequência, sendo as amplitudes medidas em dB. Os espectros de fluxo magnético em dB são referenciados à corrente de 1 A.

No item 4.8 têm-se o estudo das modulações de $\pm 2 \times f_l$, $4 \times f_l$ e $6 \times f_l$ ($f_l = 60$ Hz) com a frequência da passagem de ranhuras (f_p), permitindo avaliar a condição do motor.

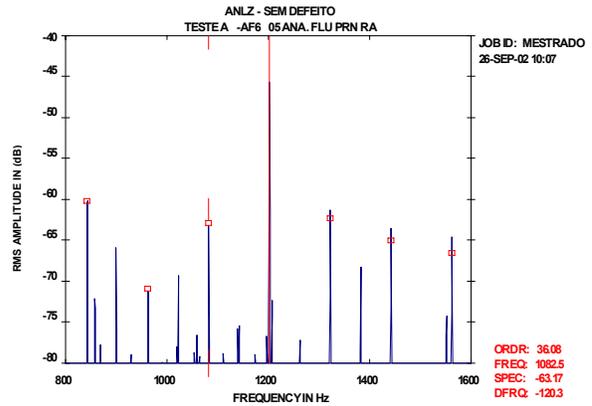
A frequência da passagem de ranhura (f_p) é igual ao número de barras do rotor ou ranhuras do estator (R) vezes a velocidade de rotação em Hz (f_r), menos a frequência de linha ($R \times f_r - f_l$).

4.4.1 Condição normal de funcionamento

Na Figura 4.38 têm-se dois espectros, escolhidos aleatoriamente, para a condição normal de funcionamento do motor elétrico.



(a) Bobina CSI

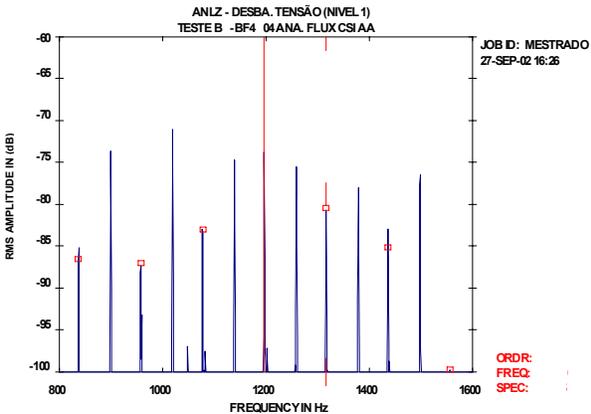


(b) Bobina radial

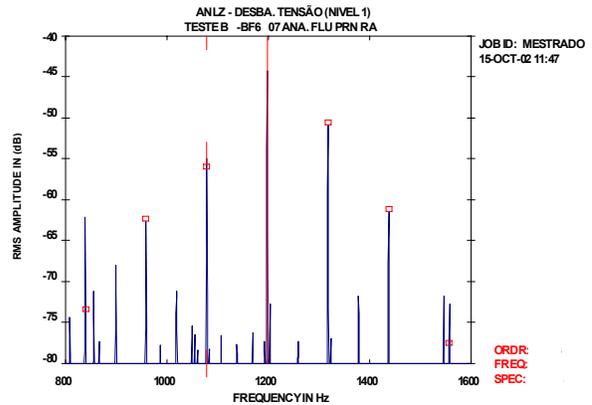
Figura 4. 38 - Espectros de fluxo magnético para a condição normal de funcionamento.

4.4.2 Desbalanceamento de tensão

Na Figura 4.39 têm-se os espectros, escolhidos aleatoriamente, para a condição de desbalanceamento de tensão (210 V) do motor elétrico.



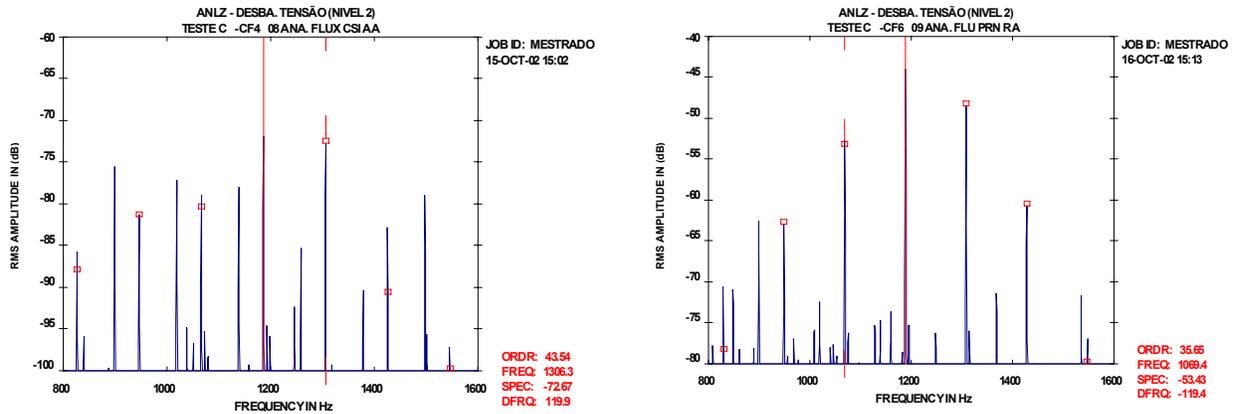
(a) Bobina CSI



(b) Bobina radial

Figura 4. 39 - Espectros de fluxo magnético para o desbalanceamento de tensão (210 V).

Na Figura 4.40 têm-se os espectros, escolhidos aleatoriamente, para a condição de desbalanceamento de tensão (200 V) do motor elétrico.



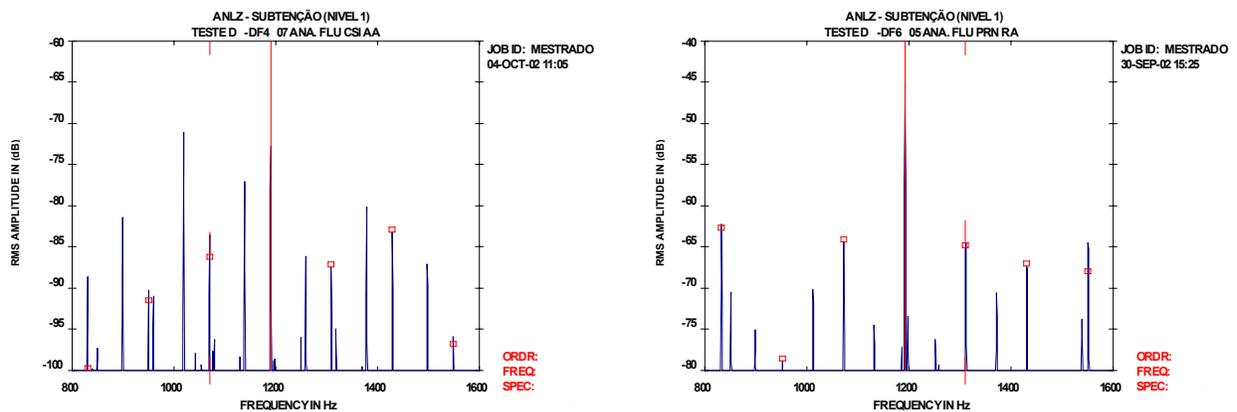
(a) Bobina CSI

(b) Bobina radial

Figura 4. 40 - Espectros de fluxo magnético para desbalanceamento de tensão (200 V).

4.4.3 Subtensão

Na Figura 4.41 têm-se os espectros, escolhidos aleatoriamente, para a condição de subtensão (200 V) do motor elétrico.

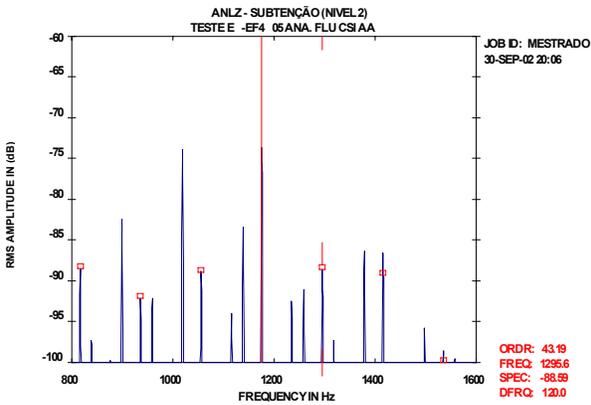


(a) Bobina CSI

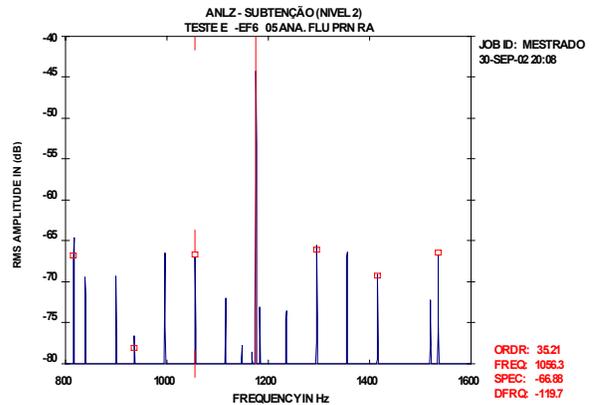
(b) Bobina radial

Figura 4. 41 - Espectros de fluxo magnético para subtensão (200 V).

Na Figura 4.42 têm-se os espectros, escolhidos aleatoriamente, para a condição de subtensão (190 V) do motor elétrico.



(a) Bobina CSI

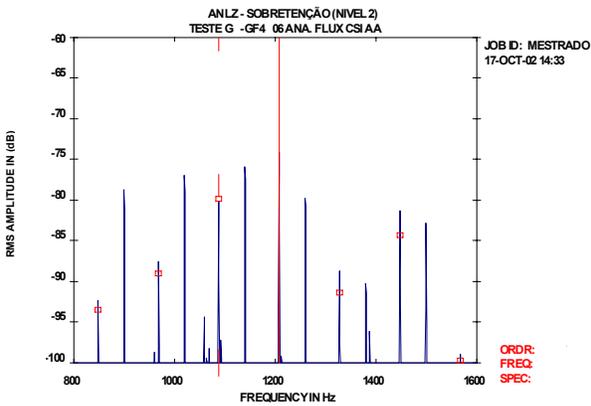


(b) Bobina Radial

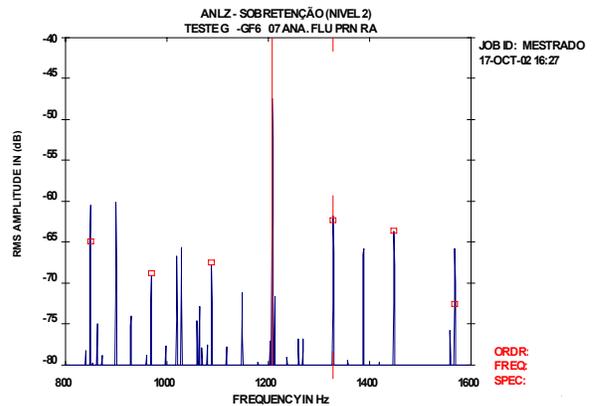
Figura 4. 42 - Espectros fluxo magnético para subtensão (190 V).

4.4.4 Sobretensão

Na Figura 4.43 têm-se os espectros, escolhidos aleatoriamente, para a condição de sobretensão (230 V) do motor elétrico.



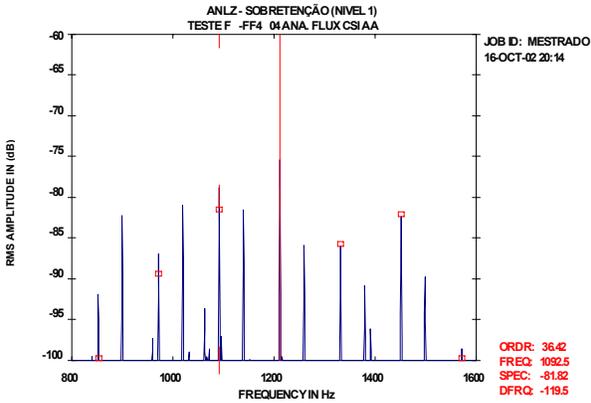
(a) Bobina CSI



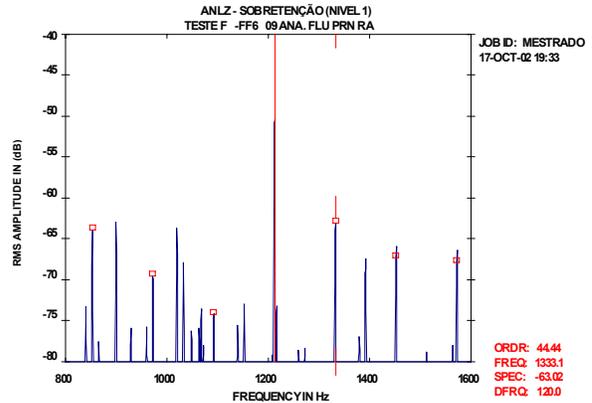
(b) Bobina radial

Figura 4. 43 - Espectros de fluxo magnético para sobretensão (230 V).

Na Figura 4.44 têm-se os espectros, escolhidos aleatoriamente, para a condição de sobretensão (240 V) do motor elétrico.



(a) Bobina CSI

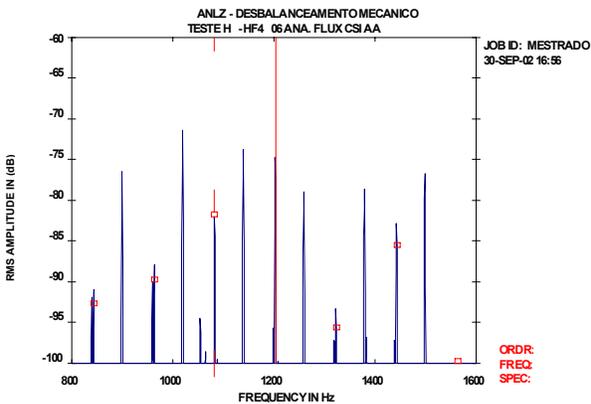


(b) Bobina radial

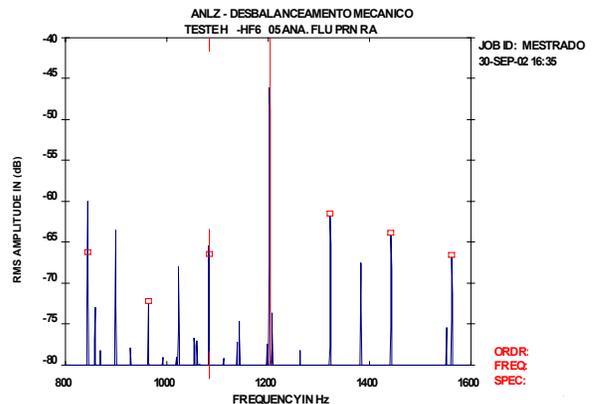
Figura 4. 44 - Espectros de fluxo magnético para sobretensão (240 V).

4.4.5 Desbalanceamento mecânico

Na Figura 4.45 têm-se os espectros, escolhidos aleatoriamente, para a condição de desbalanceamento mecânico do motor elétrico.



(a) Bobina CSI



(b) Bobina radial

Figura 4. 45 - Espectros de fluxo magnético para desbalanceamento mecânico (16,0g).

4.4.6 Análise dos resultados

Nas Figuras 4.46 e 4.47 têm-se a média e o desvio padrão da amplitude em $f_p - 6 \times f_1$, para os dez testes realizados. Observa-se que a amplitude desta frequência manteve-se constante para a bobina CSI.

Para a bobina radial, $f_p - 6 \times f_1$ diminuiu no teste de desbalanceamento de tensão, podendo ser considerada uma frequência determinística para este tipo de problema.

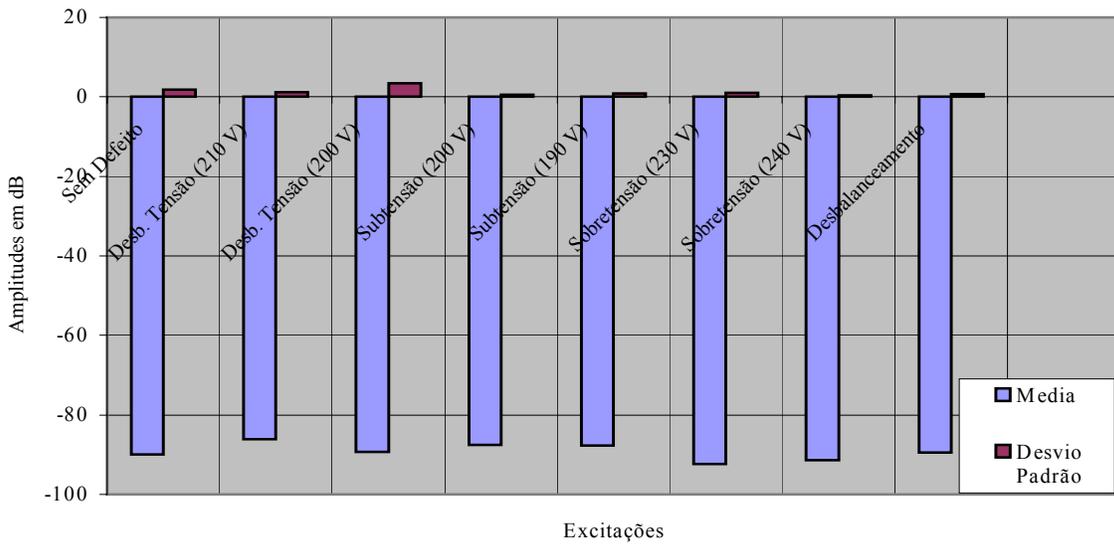


Figura 4. 46 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p - 6 \times f_1$ (bobina CSI).

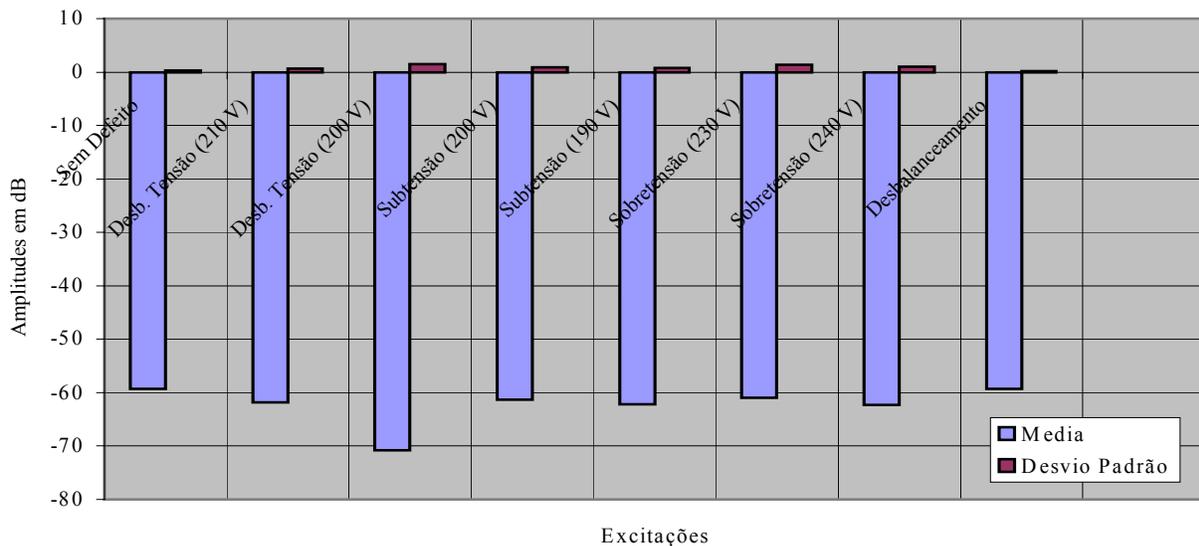


Figura 4. 47 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p - 6 \times f_1$ (bobina radial).

Nas Figuras 4.48 e 4.49 têm-se a média e o desvio padrão da amplitude em $f_p - 4 \times f_i$, para os dez testes realizados. Observa-se que a amplitude desta frequência manteve-se com pequenas variações para a bobina CSI.

Para a bobina radial, $f_p - 4 \times f_i$ aumentou para o desbalanceamento de tensão e diminuiu no teste de subtensão, podendo ser considerada uma frequência determinística para este tipo de problema.

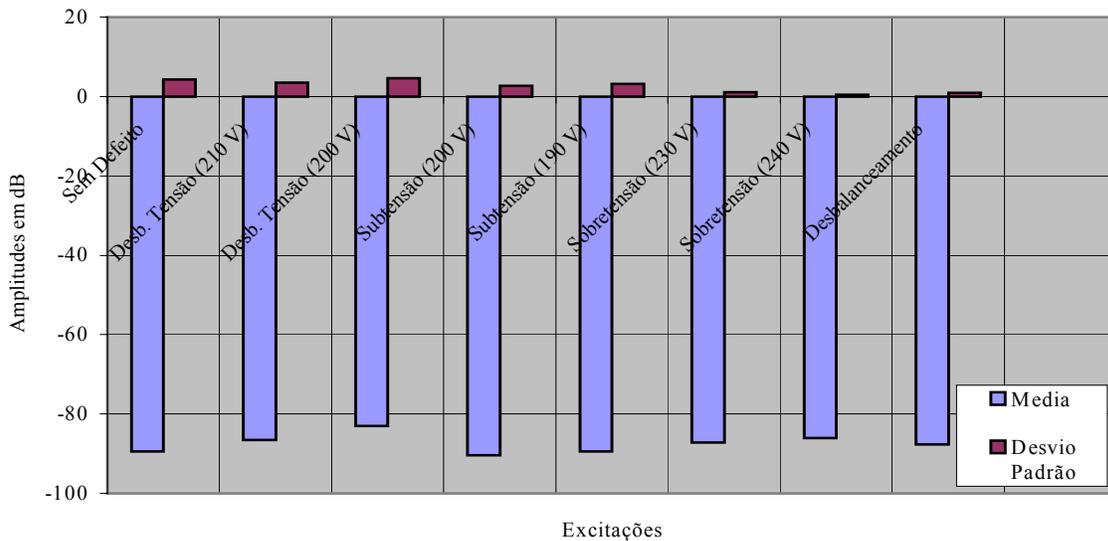


Figura 4. 548 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p - 4 \times f_i$ (bobina CSI).

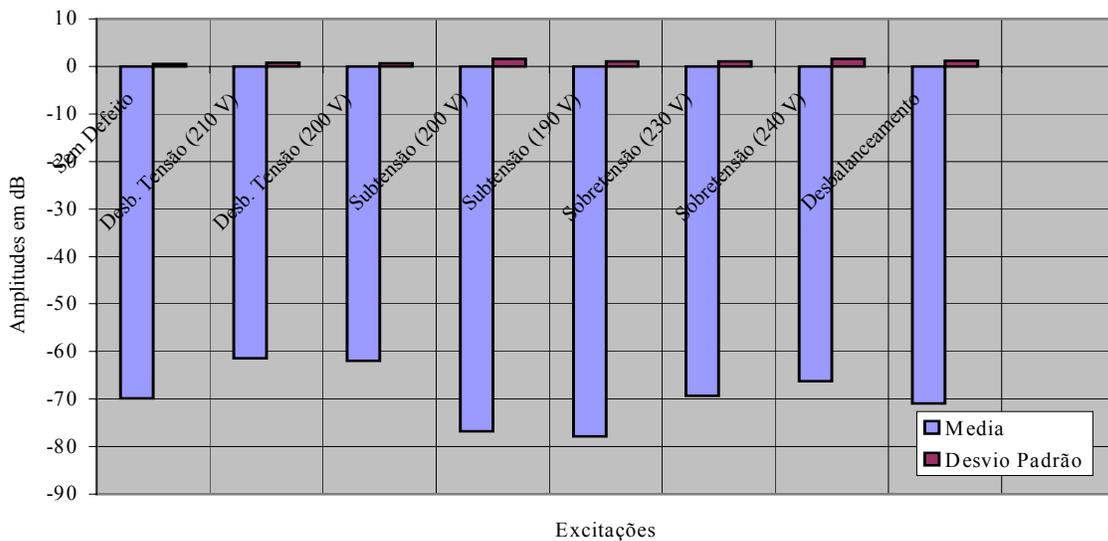


Figura 4. 49 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p - 4 \times f_i$ (bobina radial).

Nas Figuras 4.50 e 4.51 têm-se a média e o desvio padrão da amplitude em $f_p - 2 \times f_l$, para os dez testes realizados. Observa-se que a amplitude desta frequência manteve-se com pequenas variações para a bobina CSI.

Para a bobina radial, $f_p - 2 \times f_l$ aumentou para o desbalanceamento de tensão e diminuiu no teste de sobretensão, podendo ser considerada uma frequência determinística para este tipo de problema.

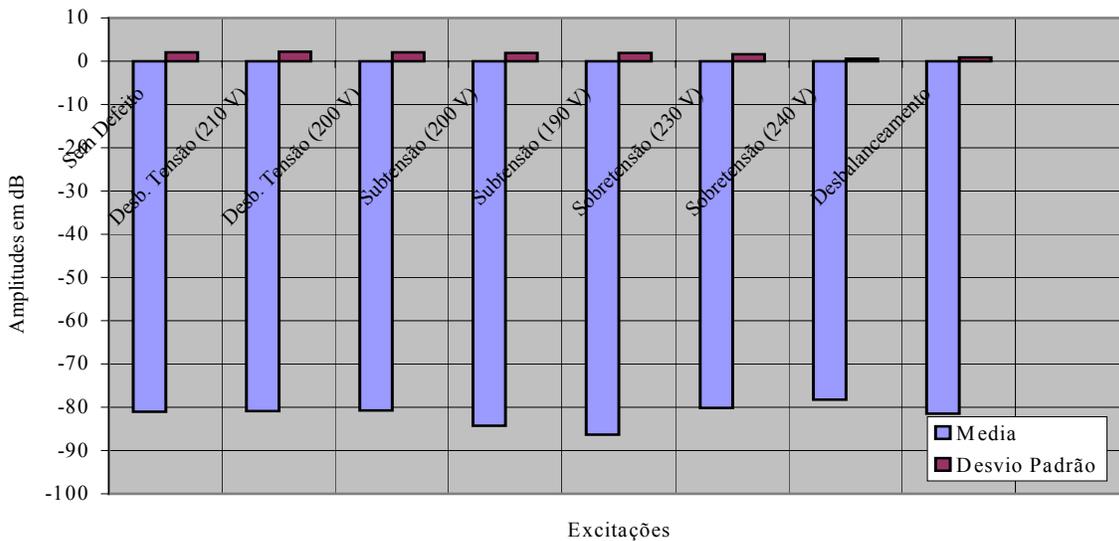


Figura 4. 50 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p - 2 \times f_l$ (bobina CSI).

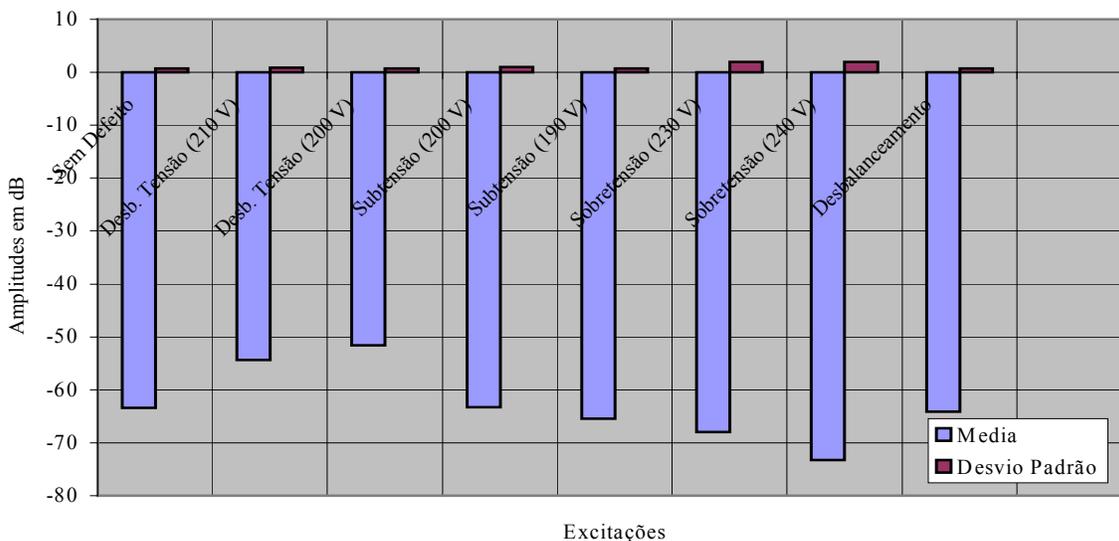


Figura 4. 51 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p - 2 \times f_l$ (bobina radial).

Nas Figuras 4.52 e 4.53 têm-se a média e o desvio padrão da amplitude em f_p , para os dez testes realizados. Observa-se que a amplitude desta frequência manteve-se com pequenas variações para todos os testes realizados, tanto para a bobina CSI quanto para a radial

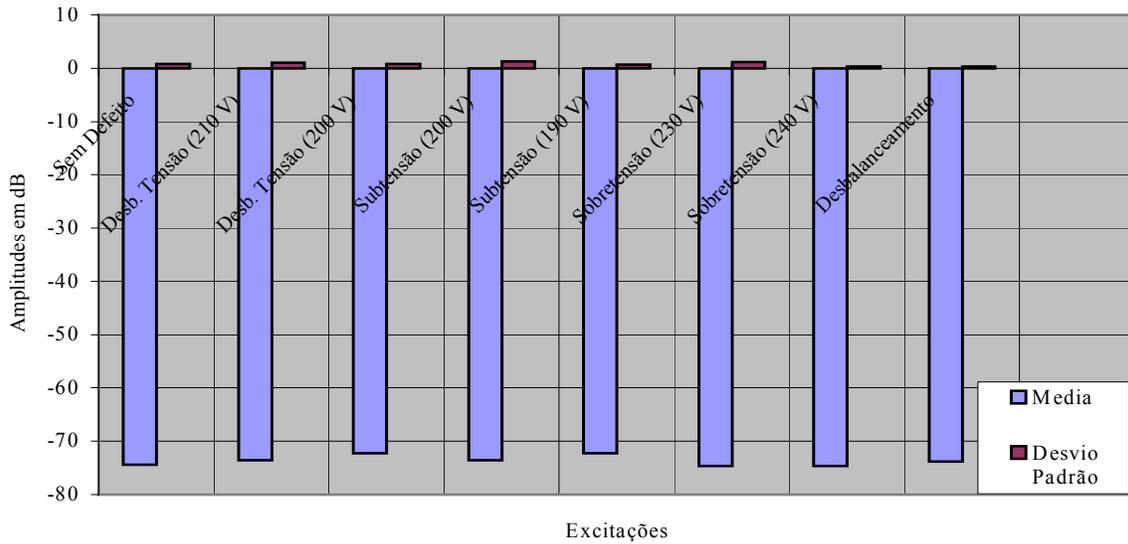


Figura 4. 52 - Média e desvio padrão para a amplitude em f_p (bobina radial).

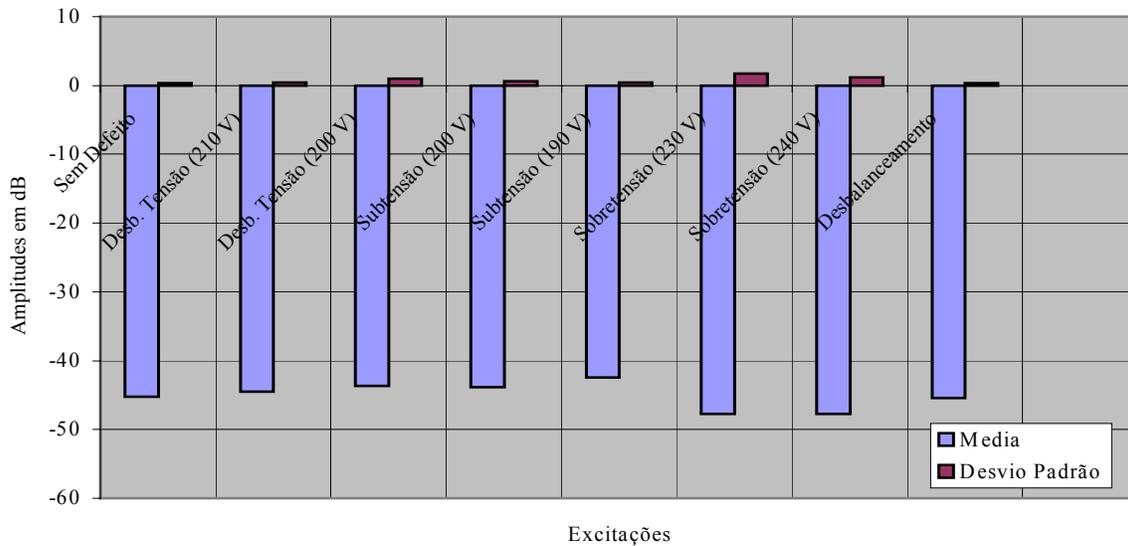


Figura 4. 53 - Média e desvio padrão para a amplitude em f_p (bobina radial).

Nas Figuras 4.54 e 4.55 têm-se a média e o desvio padrão da amplitude em $f_p + 2 \times f_l$, para os dez testes realizados. Observa-se que a amplitude desta frequência aumentou para a condição de desbalanceamento de tensão, podendo ser considerada uma frequência determinística para este tipo de problema. As duas bobinas, CSI e implementada (posição radial), detectaram as variações das amplitudes nesta frequência.

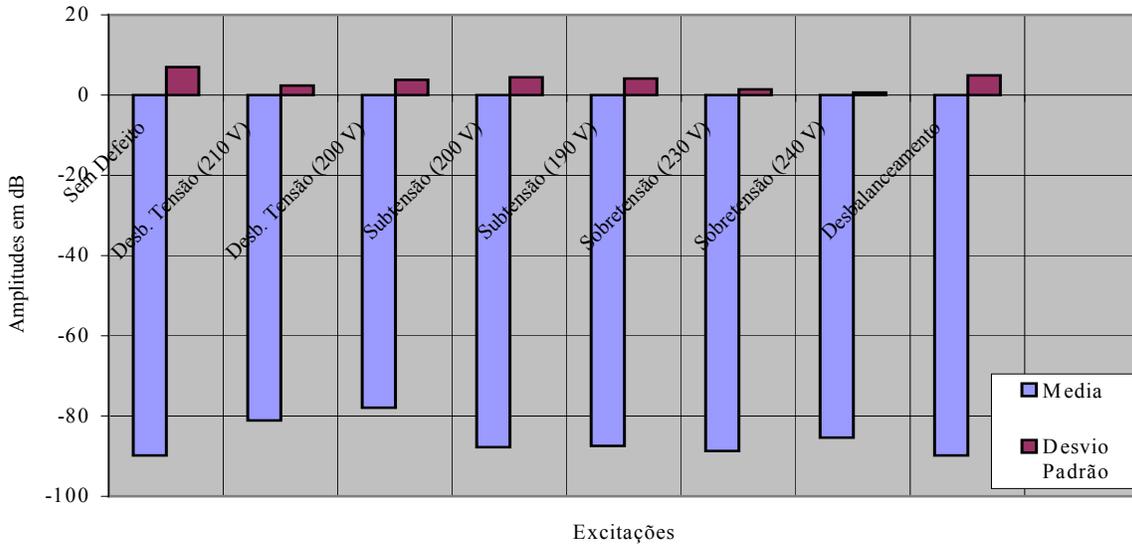


Figura 4. 54 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p + 2 \times f_l$ (bobina CSI).

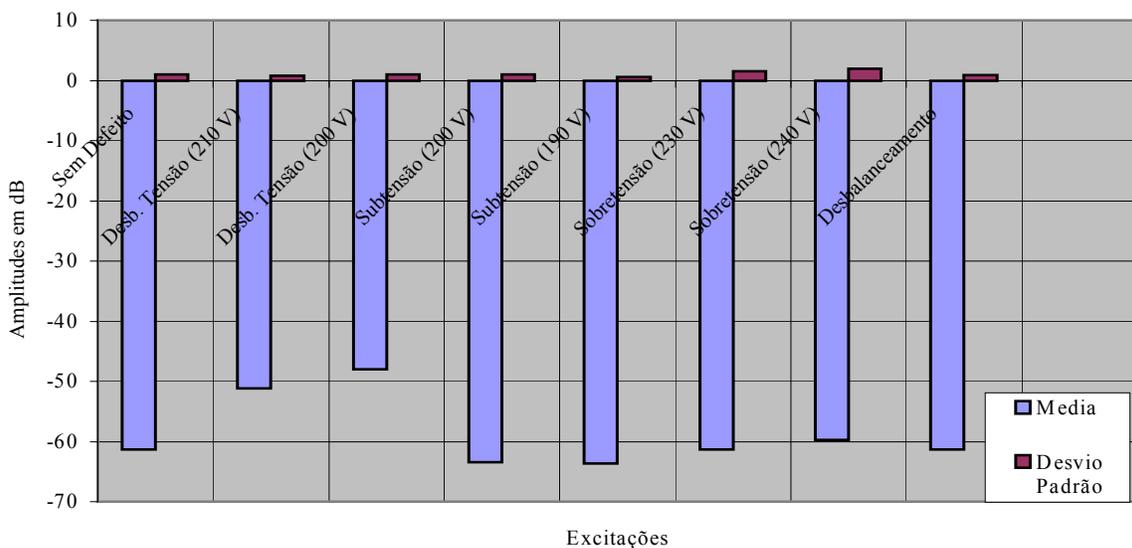


Figura 4. 55 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p + 2 \times f_l$ (bobina radial).

Nas Figuras 4.56 e 4.57 têm-se a média e o desvio padrão da amplitude em $f_p + 4 \times f_l$, para os dez testes realizados. Observa-se que a amplitude desta frequência manteve-se com pequenas variações para todos os testes realizados, tanto para a bobina CSI quanto para a radial.

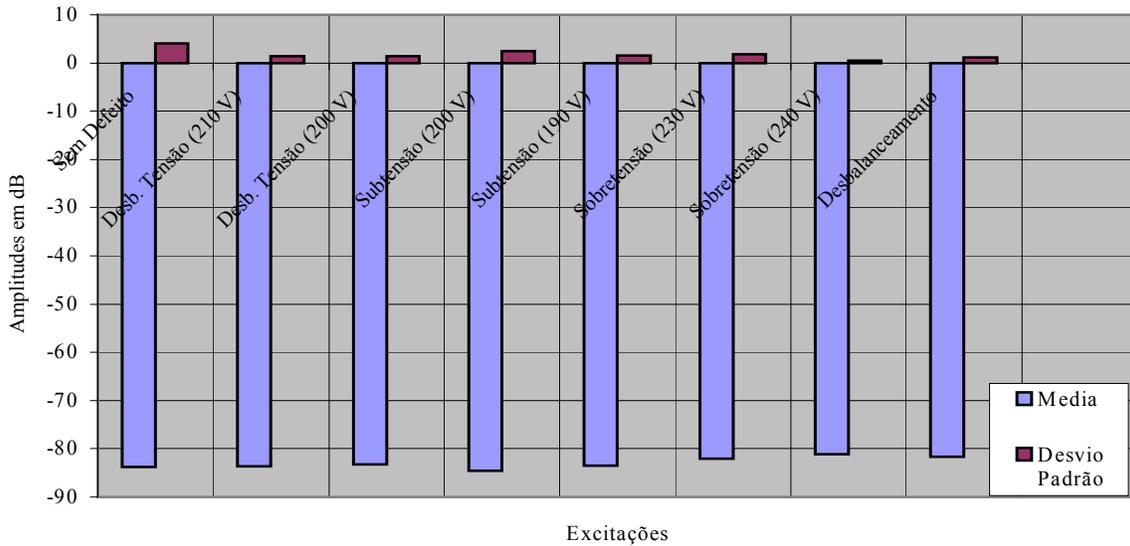


Figura 4. 56 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p + 4 \times f_l$ (bobina CSI).

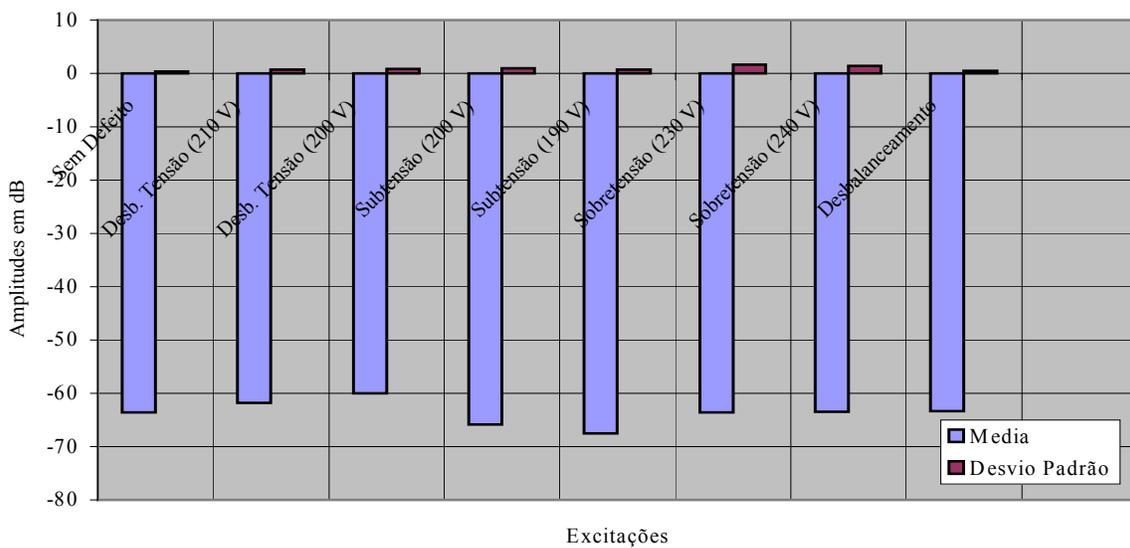


Figura 4. 57 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p + 4 \times f_l$ (bobina radial).

Nas Figuras 4.58 e 4.59 têm-se a média e o desvio padrão da amplitude em $f_p + 6 \times f_l$, para os dez testes realizados. Observa-se que a amplitude desta frequência manteve-se com pequenas variações para a bobina CSI.

Para a bobina radial, $f_p + 6 \times f_l$ diminuiu para o desbalanceamento de tensão. Podendo ser considerada uma frequência determinística para este tipo de problema.

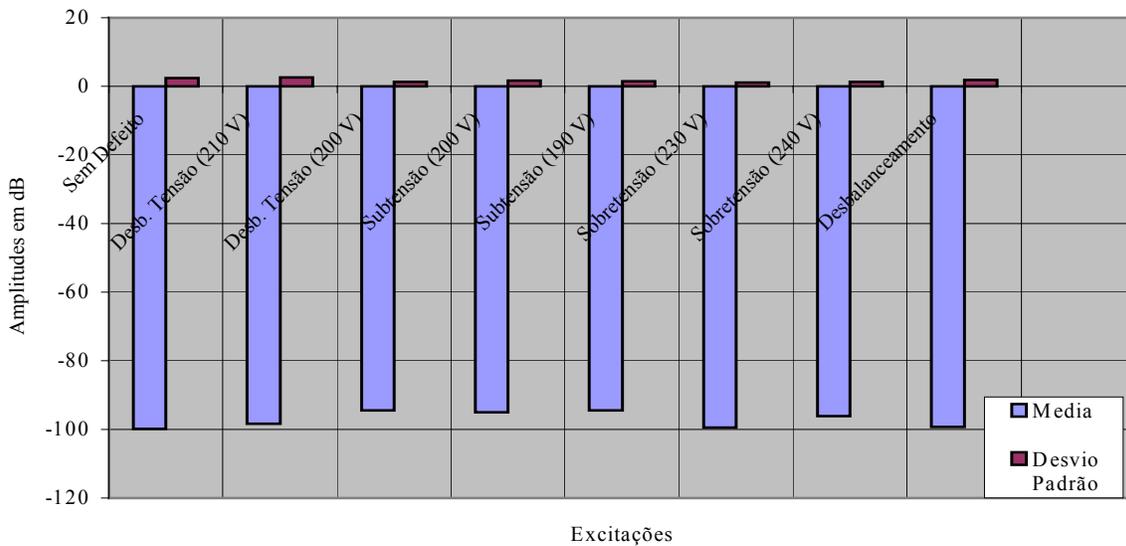


Figura 4. 58 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p + 6 \times f_l$ (bobina CSI).

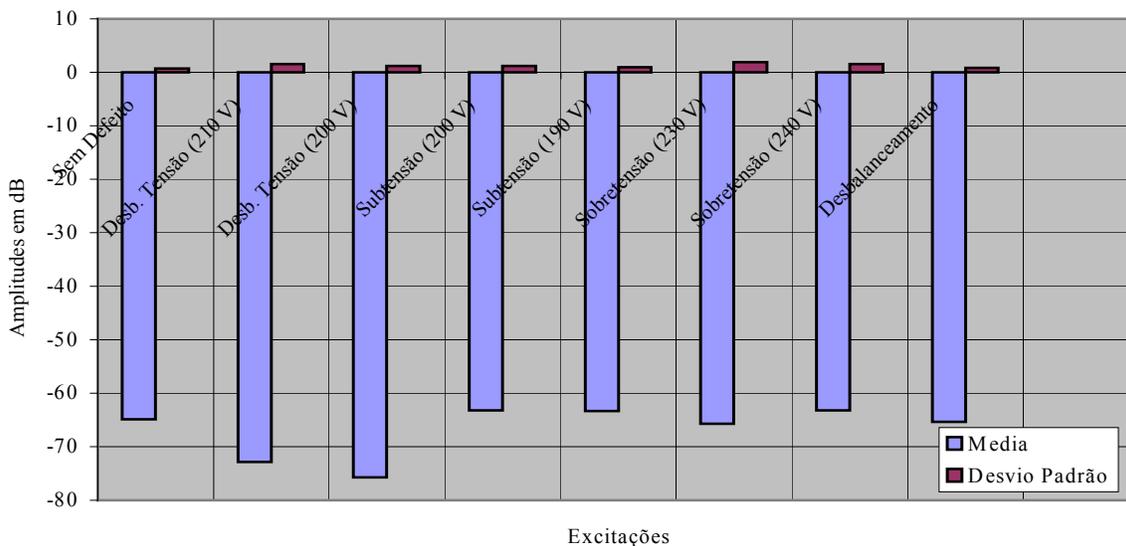


Figura 4. 59 - Média e desvio padrão para a amplitude em $f_p + 6 \times f_l$ (bobina radial).

Na Tabela 4.1 tem-se a generalização dos resultados para os defeitos estudados neste trabalho e suas respectivas frequências determinísticas, em baixa frequência, onde: f_l é a frequência de linha [60 Hz] e f_r é a frequência de rotação.

Tabela 4. 1 - Amplitudes em baixa frequência.

Descrição da Falha	Análise das Amplitudes em Baixa Frequência - Bobina CSI				
	$f_l - 1 \times f_r$	f_l	$f_l + 1 \times f_r$	$f_l + 2 \times f_r$	$f_l - 3 \times f_r$
Sem Defeito	<i>Referência</i> - 69,0 dB	<i>Referência</i> - 49,3 dB	<i>Referência</i> - 86,8 dB	<i>Referência</i> - 99,2 dB	<i>Referência</i> - 97,5 dB
Desb. Tensão	Pouca variação 210 V - 0,9 dB 200 V - 3,7 dB	Pouca variação 210 V + 2,9 dB 200 V + 4,8 dB	Pouca variação 210 V - 0,9 dB 200 V - 6,2 dB	<i>Aumenta</i> 210 V 13,7 dB 200 V 18,2 dB	<i>Aumenta</i> 210 V 5,4 dB 200 V 7,0 dB
Subtensão	<i>Diminui</i> 200 V 6,9 dB 190 V 10,3 dB	Pouca variação 200 V + 1,7 dB 190 V + 1,8 dB	Pouca variação 200 V - 0,8 dB 190 V + 1,7 dB	Pouca variação 200 V - 0,8 dB 190 V + 1,7 dB	Pouca variação 200 V + 2,4 dB 190 V + 1,9 dB
Sobretensão	<i>Aumenta</i> 230 V 5,0 dB 240 V 6,9 dB	Não muda 230 V + 0,6 dB 240 V + 0,7 dB	Pouca variação 230 V - 6,6 dB 240 V - 1,1 dB	Pouca variação 230 V - 4,6 dB 240 V - 1,1 dB	Pouca variação 230 V + 2,4 dB 240 V + 4,0 dB
Desb. Mecânico	Pouca variação + 1,7 dB	Não muda + 0,9 dB	Pouca variação - 2,0 dB	Pouca variação - 2,0 dB	Não muda - 0,3 dB
Análise das Amplitudes em Baixa Frequência - Bobina Radial					
Sem Defeito	<i>Referência</i> - 59,8 dB	<i>Referência</i> - 46,0 dB	<i>Referência</i> - 58,9 dB	<i>Referência</i> - 82,1 dB	<i>Referência</i> - 86,1 dB
Desb. Tensão	Pouca variação 210 V - 0,5 dB 200 V - 4,5 dB	<i>Diminui</i> 210 V 5,0 dB 200 V 13,0 dB	Pouca variação 210 V + 0,3 dB 200 V - 3,7 dB	Pouca variação 210 V + 2,5 dB 200 V + 4,1 dB	Pouca variação 210 V + 3,1 dB 200 V + 4,9 dB
Subtensão	<i>Diminui</i> 200 V 11,7 dB 190 V 15,4 dB	Pouca variação 200 V - 2,0 dB 190 V - 3,1 dB	<i>Diminui</i> 200 V 11,6 dB 190 V 15,5 dB	Pouca variação 200 V - 2,2 dB 190 V - 4,2 dB	Pouca variação 200 V - 0,3 dB 190 V - 2,5 dB
Sobretensão	<i>Aumenta</i> 230 V 5,2 dB 240 V 7,0 dB	<i>Aumenta</i> 230 V 2,8 dB 240 V 6,3 dB	<i>Aumenta</i> 230 V 5,1 dB 240 V 6,8 dB	Pouca variação 230 V + 0,4 dB 240 V + 2,4 dB	Pouca variação 230 V + 0,3 dB 240 V + 3,1 dB
Desb. Mecânico	Não muda + 0,9 dB	Não muda + 0,21 dB	Pouca variação + 1,1 dB	Não muda - 0,16 dB	Não muda - 0,8 dB

Na Tabela 4.2 tem-se a generalização dos resultados para os defeitos estudados neste trabalho e suas respectivas frequências determinísticas, em alta frequência, onde: f_l é a frequência de linha [60 Hz] e f_p é a frequência de passagem de ranhuras.

Tabela 4. 2 - Amplitudes em alta frequência.

Descrição da Falha	Análise das Amplitudes em Alta Frequência - Bobina CSI						
	$f_p - 6 \times f_l$	$f_p - 4 \times f_l$	$f_p + 2 \times f_l$	f_p	$f_p + 2 \times f_l$	$f_p + 4 \times f_l$	$f_p + 6 \times f_l$
Sem Defeito	<i>Referência</i> - 89,9 dB	<i>Referência</i> -89,5 dB	<i>Referência</i> - 80,9 dB	<i>Referência</i> -74,4 dB	<i>Referência</i> - 89,7 dB	<i>Referência</i> - 83,7 dB	<i>Referência</i> - 99,8 dB
Desb. Tensão	Pouca variação 210 V + 3,8 dB 200 V + 0,7 dB	Pouca variação 210 V + 3,0 dB 200 V + 4,7 dB	Não muda 210 V + 0,1 dB 200 V + 0,1 dB	Pouca variação 210 V + 0,9 dB 200 V + 2,1 dB	<i>Aumenta</i> 210 V 8,6 dB 200 V 11,7 dB	Não muda 210 V + 0,1 dB 200 V + 0,4 dB	Pouca variação 210 V + 1,4 dB 200 V + 5,3 dB
Subtensão	Pouca variação 200 V + 2,4 dB 190 V + 2,3 dB	Não muda 200 V - 0,9 dB 190 V + 0,1 dB	Pouca variação 200 V - 3,4 dB 190 V - 5,4 dB	Pouca variação 200 V + 0,9 dB 190 V + 2,2 dB	Pouca variação 200 V + 2,0 dB 190 V + 2,3 dB	Não muda 200 V - 0,8 dB 190 V + 0,2 dB	<i>Aumenta</i> 200 V 4,9 dB 190 V 5,3 dB
Sobretensão	Pouca variação 230 V - 2,3 dB 240 V - 1,5 dB	Pouca variação 230 V + 2,3 dB 240 V + 3,5 dB	Pouca variação 230 V + 0,73 dB 240 V + 2,74 dB	Não muda 230 V - 0,3 dB 240 V - 0,2 dB	Pouca variação 230 V + 1,1 dB 240 V + 4,3 dB	Pouca variação 230 V + 1,1 dB 240 V + 4,3 dB	Pouca variação 230 V + 0,5 dB 240 V + 3,7 dB
Desb. Mecânico	Não muda + 0,5 dB	Pouca variação + 1,9 dB	Não muda - 0,5 dB	Não muda + 0,7 dB	Não muda + 0,2 dB	Não muda - 0,2 dB	Não muda + 0,7 dB
Análise das Amplitudes em Alta Frequência - Bobina Radial							
Sem Defeito	<i>Referência</i> - 59,3 dB	<i>Referência</i> - 69,9 dB	<i>Referência</i> -63,3 dB	<i>Referência</i> - 45,3 dB	<i>Referência</i> - 61,3 dB	<i>Referência</i> -63,5 dB	<i>Referência</i> - 65,0 dB
Desb. Tensão	<i>Diminui</i> 210 V 2,5 dB 200 V 11,5 dB	<i>Aumenta</i> 210 V 8,5 dB 200 V 8,0 dB	<i>Aumenta</i> 210 V 9,0 dB 200 V 11,7 dB	Pouca variação 210 V + 0,8 dB 200 V + 1,7 dB	<i>Aumenta</i> 210 V 10,2 dB 200 V 13,3 dB	Pouca variação 210 V + 1,8 dB 200 V + 3,5 dB	<i>Diminui</i> 210 V 7,9 dB 200 V 10,7 dB
Subtensão	Pouca variação 200 V - 2,1 dB 190 V - 2,9 dB	<i>Diminui</i> 200 V 7,0 dB 190 V 8,0 dB	Pouca variação 200 V - 0,1 dB 190 V - 2,7 dB	Pouca variação 200 V + 1,5 dB 190 V + 2,8 dB	Pouca variação 200 V - 2,1 dB 190 V - 2,4 dB	Pouca variação 200 V - 2,3 dB 190 V - 4,0 dB	Pouca variação 200 V + 1,8 dB 190 V + 1,6 dB
Sobretensão	Pouca variação 230 V - 1,6 dB 240 V - 2,9 dB	Pouca variação 230 V + 0,6 dB 240 V + 3,7 dB	<i>Diminui</i> 230 V 5,0 dB 240 V 10,0 dB	Pouca variação 230 V - 2,4 dB 240 V - 2,4 dB	Pouca variação 230 V + 0,1 dB 240 V + 1,6 dB	Não muda 230 V + 0,1 dB 240 V + 0,2 dB	Pouca variação 230 V - 0,7 dB 240 dB + 1,8 dB
Desb. Mecânico	Não muda + 0,1 dB	Não muda - 0,9 dB	Não muda - 0,7 dB	Não muda - 0,7 dB	Não muda - 0,1 dB	Não muda + 0,2 dB	Não muda - 0,3 dB

Nas Tabelas 4.1 e 4.2, as amplitudes de referência representam a média dos dez testes realizados e a partir dela têm-se as variações para todas as excitações introduzidas na bancada experimental.

Foi considerado que o sinal não mudou quando suas amplitudes variaram de 0,0 a 0,9 dB, teve pouca variação quando suas amplitudes variaram de 1,0 a 4,9 dB e aumentou ou diminuiu quando suas amplitudes ultrapassaram 4,9 dB.

Na Tabela 4.1, pode-se observar que para a bobina de fluxo CSI, o desbalanceamento de tensão é facilmente identificado nas frequências $f_l + 2 \times f_r$ e $f_l + 3 \times f_r$. Já a subtensão e a sobretensão podem ser identificados mais facilmente na frequência $f_l - 1 \times f_r$.

Na Tabela 4.1, pode-se observar que para a bobina de fluxo radial, o desbalanceamento de tensão é facilmente identificado na frequência de linha f_l . Já a subtensão pôde ser identificada mais facilmente nas frequências $f_l - 1 \times f_r$ e $f_l + 1 \times f_r$ e a sobretensão nas frequências $f_l - 1 \times f_r$, f_l e $f_l + 1 \times f_r$.

Na Tabela 4.2, pode-se observar que para a bobina de fluxo CSI, o desbalanceamento de tensão é facilmente identificado na frequência $f_p + 2 \times f_l$. Já a subtensão e a sobretensão não foram identificadas na análise em alta frequência.

Na Tabela 4.2, pode-se observar que para a bobina de fluxo radial, o desbalanceamento de tensão é facilmente identificado nas frequências $f_p - 6 \times f_l$, $f_p - 4 \times f_l$, $f_p - 2 \times f_l$, $f_p + 2 \times f_l$ e $f_p + 6 \times f_l$. Já a subtensão pôde ser identificada mais facilmente na frequência $f_p - 4 \times f_l$ e a sobretensão na frequência $f_p - 2 \times f_l$.

Conclui-se que para a análise de fluxo em baixa frequência a Bobina CSI e a bobina radial foram capazes de identificar os defeitos introduzidos na bancada experimental, porém, a bobina radial apresentou mais parâmetros de análises tornando-se a identificação do problema mais visível.

Para a análise de fluxo em alta frequência, a bobina CSI foi capaz de identificar mais facilmente o defeito de desbalanceamento de tensão. Já a bobina radial identificou o desbalanceamento de tensão, a subtensão e a sobretensão.

Capítulo 5

Barras Quebradas ou Trincadas

Neste capítulo apresentam-se os espectros coletados através da análise de corrente e análise de fluxo magnético com a bobina de fluxo CSI e bobina de fluxo implementada. Para cada tecnologia são apresentados os espectros e a análise dos resultados para barras quebradas ou trincadas.

Brito (2002), apresentou novos resultados para a detecção de barras quebradas através da análise de corrente, fluxo magnético e vibração. Tendo como parâmetros de análise as frequências de $1 \times f_r \pm 2 \times f_s$ para análise de vibração e $1 \times f_l \pm 2 \times f_s$ para análise de corrente e fluxo magnético.

Geralmente, nas análises de corrente e fluxo, o diagnóstico é feito em $1 \times f_l \pm 2 \times f_s$. Neste capítulo, além dessas frequências, propõe-se a análise em $1 \times f_l \pm 1 \times f_s$.

5.1 Detecção de barras quebradas ou trincadas através da análise de corrente e análise de fluxo magnético

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.

O rompimento das 7 barras do rotor foi feito através de uma broca com diâmetro de 5mm. Na Figura 5.1 tem-se uma vista do rotor com as sete barras rompidas.

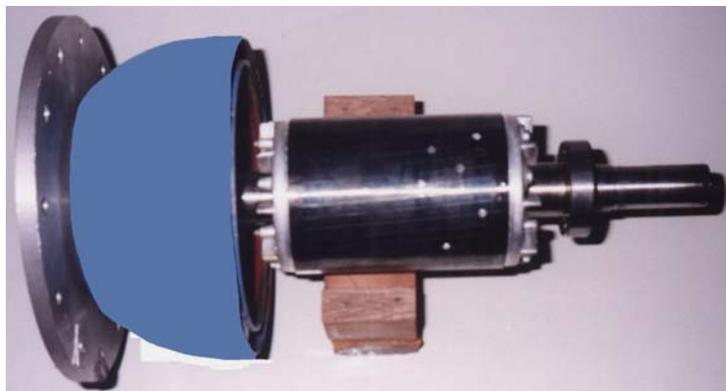


Figura 5. 1 - Rotor com as sete barras rompidas.

Os sinais foram coletados através do transdutor (bobina de fluxo) implementado na posição radial e axial do motor, bobina de fluxo CSI e alicate amperímetro CSI. O analisador foi configurado para janela *Hanning*, 3200 linhas, 10 médias, faixa de frequência de 0 a 200 Hz e amplitudes medidas em dB. Os espectros de fluxo magnético apresentados em dB são referenciados à tensão de 1 V e os de corrente elétrica apresentados em dB são referenciados à corrente de 1 A.

Os espectros de fluxo e corrente podem ser identificados por três caracteres: o primeira indica o tipo de excitação e poderá ser a letra *A* de sem defeito ou *J* de barras quebradas; o segundo e o terceiro poderá ser *AC* de análise de corrente ou *F1* de análise de fluxo (bobina CSI baixa frequência), *F2* de análise de fluxo (bobina implementada na posição axial baixa frequência) e *F3* de análise de fluxo (bobina implementada na posição radial baixa frequência).

5.1.1 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* e colocado sempre na fase "c" de alimentação do motor elétrico. Este sensor tem entrada de 150 A, AC saída de 1 mA/A AC, relação de 1 para 0,005.

Nas Figuras 5.2 e 5.3 têm-se os espectros, escolhidos aleatoriamente, para a condição normal de funcionamento e sete barras quebradas, respectivamente.

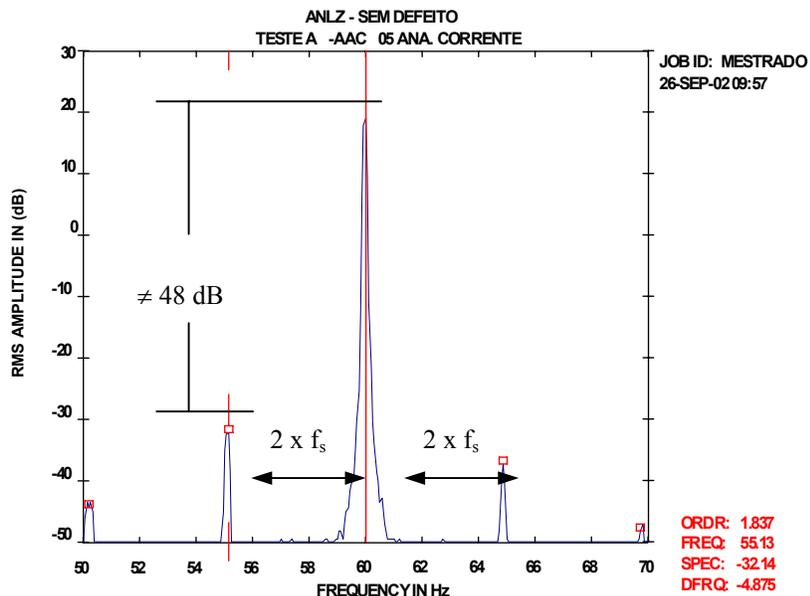


Figura 5. 2 - Espectro de corrente sem defeito.

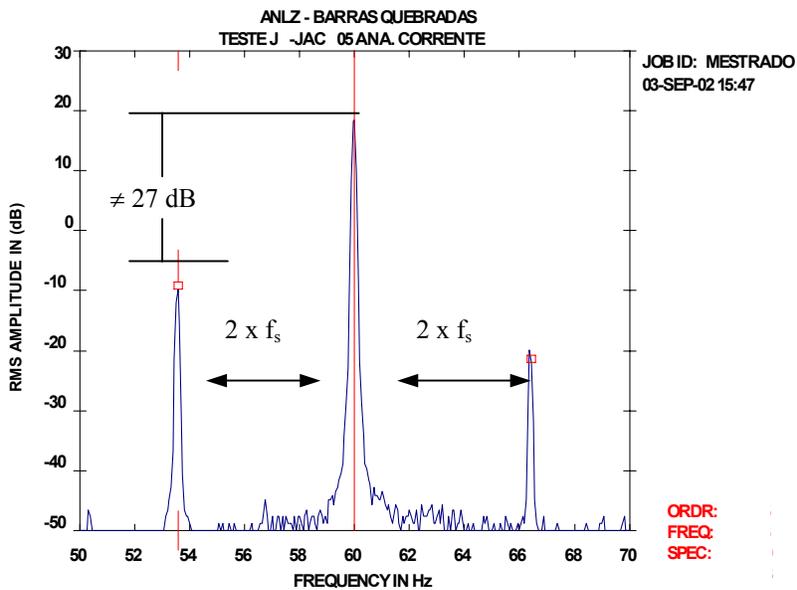


Figura 5. 3 - Espectro de corrente com 7 barras quebradas.

Na Figura 5.4 têm-se a média , desvio padrão e variação para a diferença em dB da amplitude da frequência da linha (f_l) e as bandas laterais de uma e duas vezes a frequência de escorregamento (f_s) para os dez testes realizados. Observa-se que para a situação sem defeito (SD) as diferenças estão em torno de 70 e 47 dB e para 7 barras quebradas (BQ), essa diferença, diminui para 63 e 27 dB.

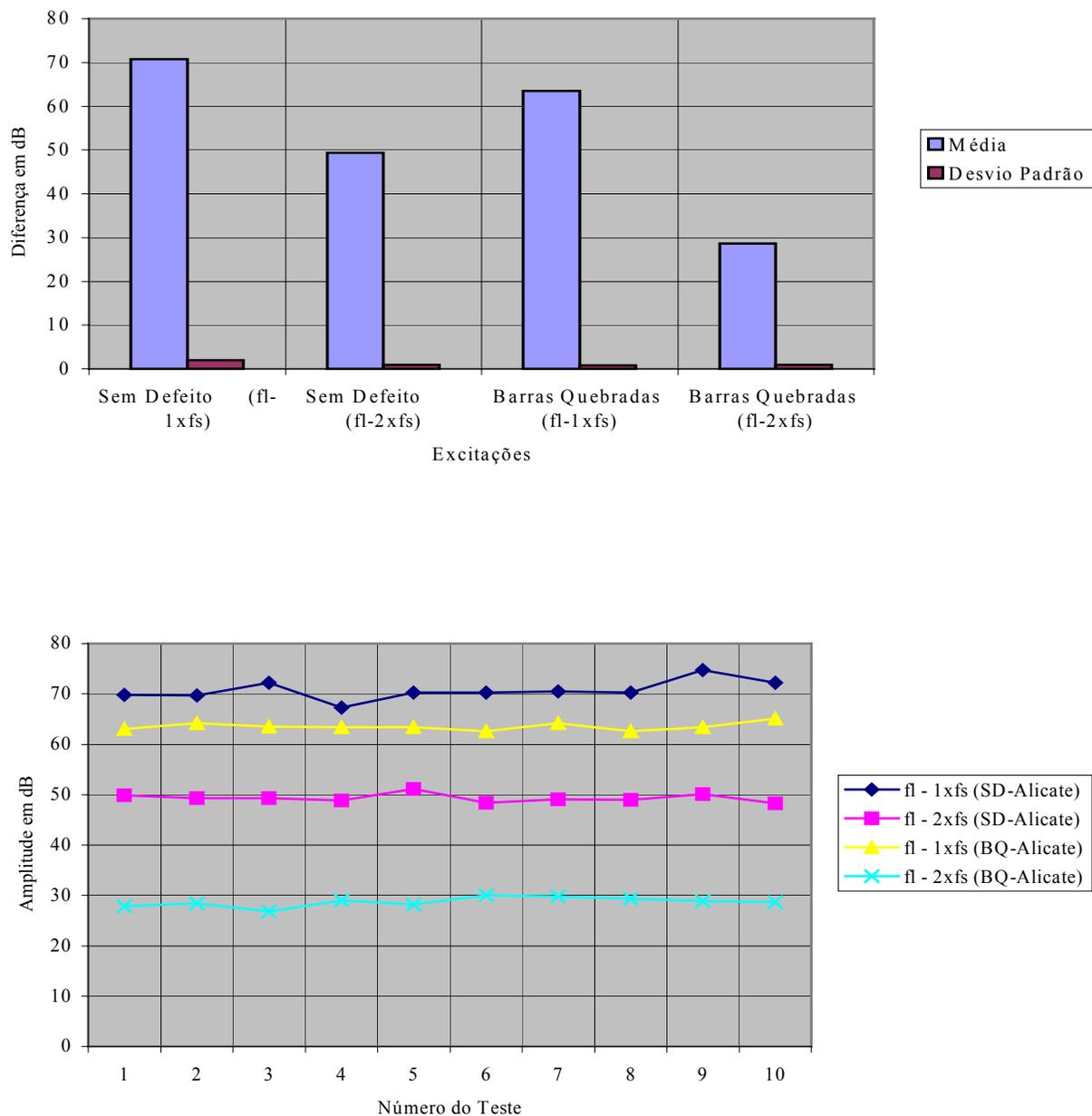


Figura 5. 4 - Média, desvio padrão e variação das diferenças em dB.

5.1.2 Detecção de barras quebradas através da análise de fluxo magnético (bobina CSI)

Nas Figuras 5.5 e 5.6 têm-se os espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição normal de funcionamento e sete barras quebradas, respectivamente.

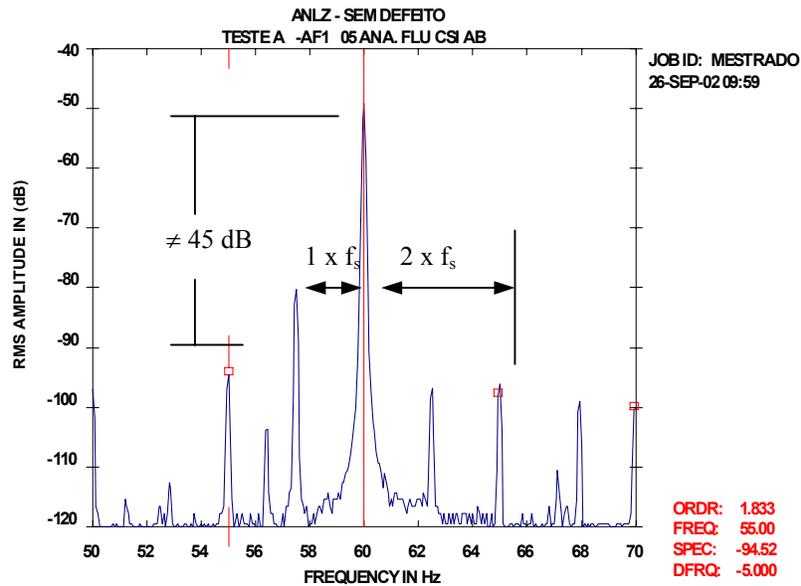


Figura 5. 5 - Espectro de fluxo (bobina CSI) sem defeito.

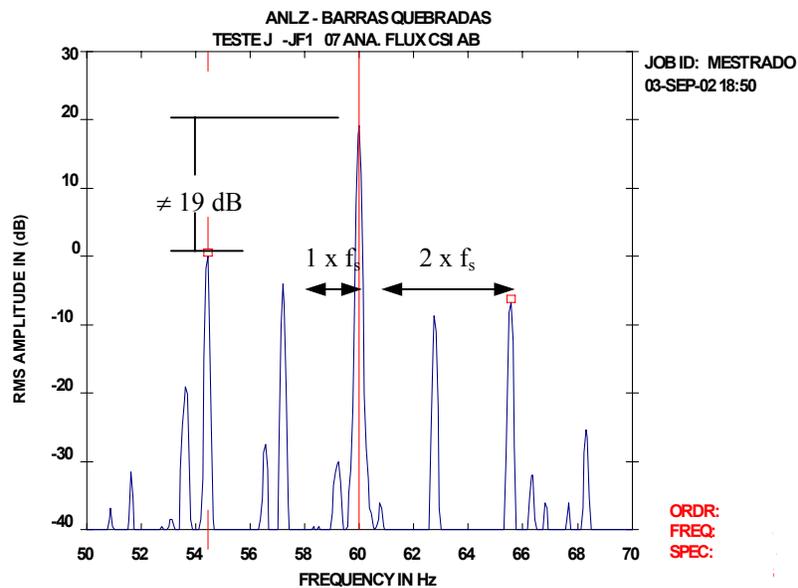


Figura 5. 6 - Espectro de fluxo (bobina CSI) para 7 barras quebradas.

Na Figura 5.7 têm-se a média, desvio padrão e variação para a diferença em dB da amplitude da frequência da linha (f_l) e as bandas laterais de uma e duas vezes a frequência de escorregamento (f_s) para os dez testes realizados. Observa-se que para a situação sem defeito (SD) as diferenças estão em torno de 31 e 46 dB e para 7 barras quebradas (BQ), essa diferença, diminui para 23 e 18 dB.

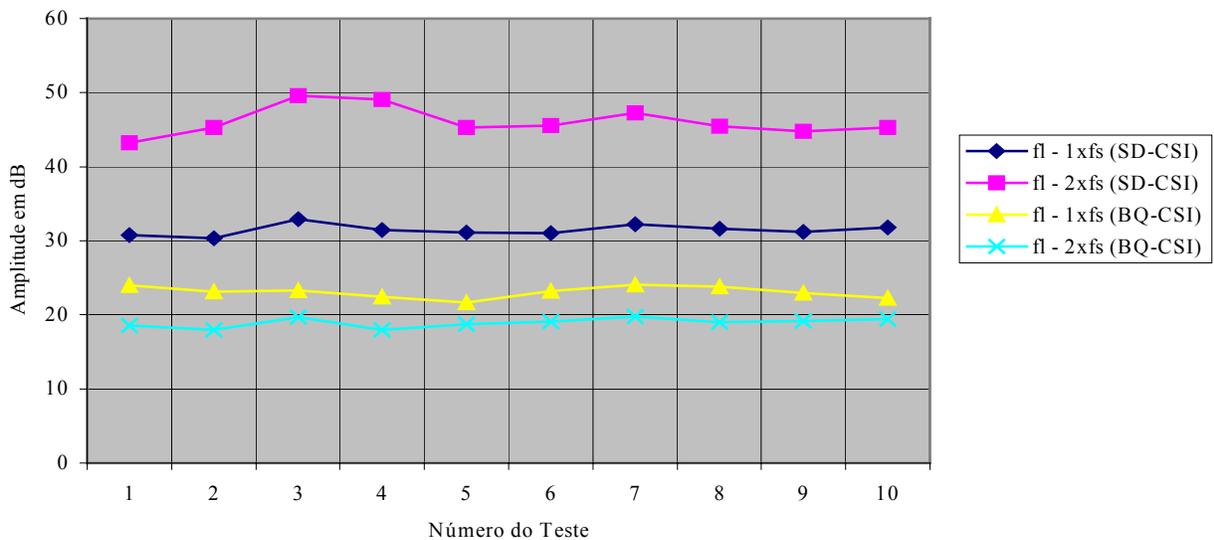
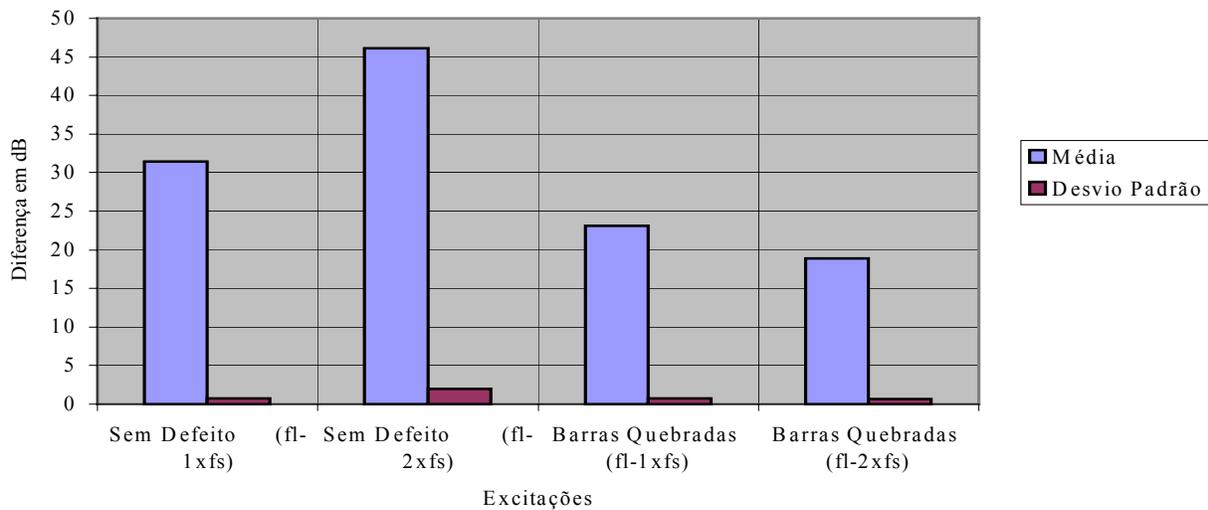


Figura 5. 7 - Média, desvio padrão e variação das diferenças em dB.

5.1.3 Detecção de barras quebradas através da análise de fluxo magnético (bobina radial)

Nas Figuras 5.8 e 5.9 têm-se os espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição normal de funcionamento e sete barras quebradas, respectivamente.

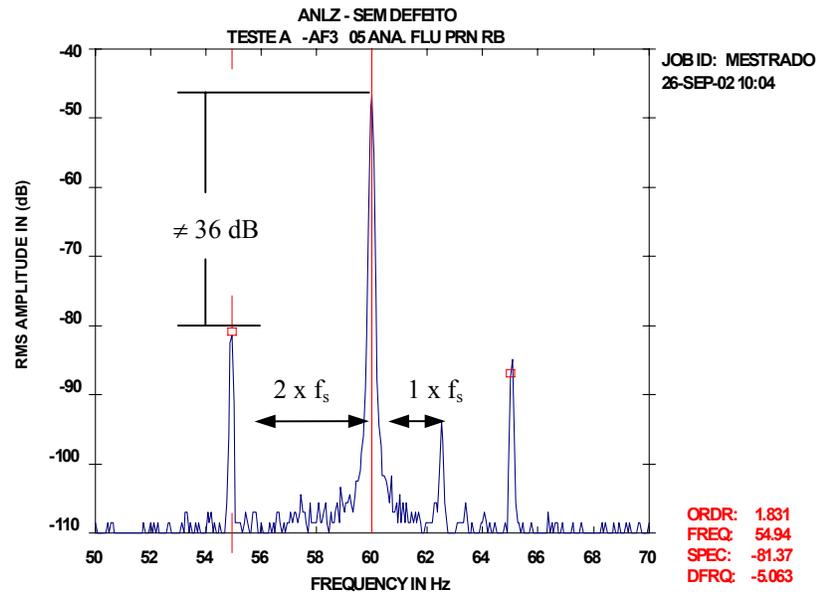


Figura 5. 8 - Espectro de fluxo (bobina radial) sem defeito.

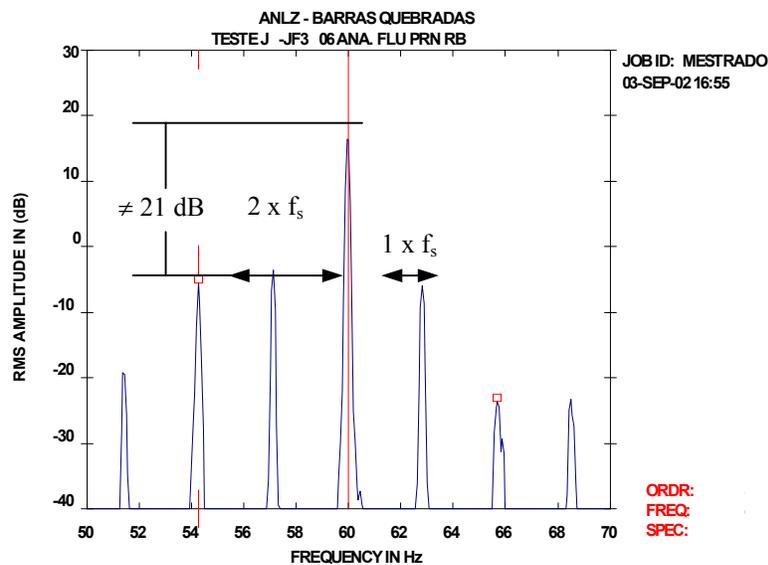


Figura 5. 9 - Espectros de fluxo (bobina radial) para 7 barras quebradas.

Na Figura 5.10 têm-se a média, o desvio padrão e a variação para a diferença em dB da amplitude da frequência da linha (f_l) e as bandas laterais de uma e duas vezes a frequência de escorregamento (f_s). Observa-se que para a situação sem defeito (SD), as diferenças estão em torno de 57 e 36 dB. Para 7 barras quebradas (BQ), essa diferença diminui para 21 e 22 dB.

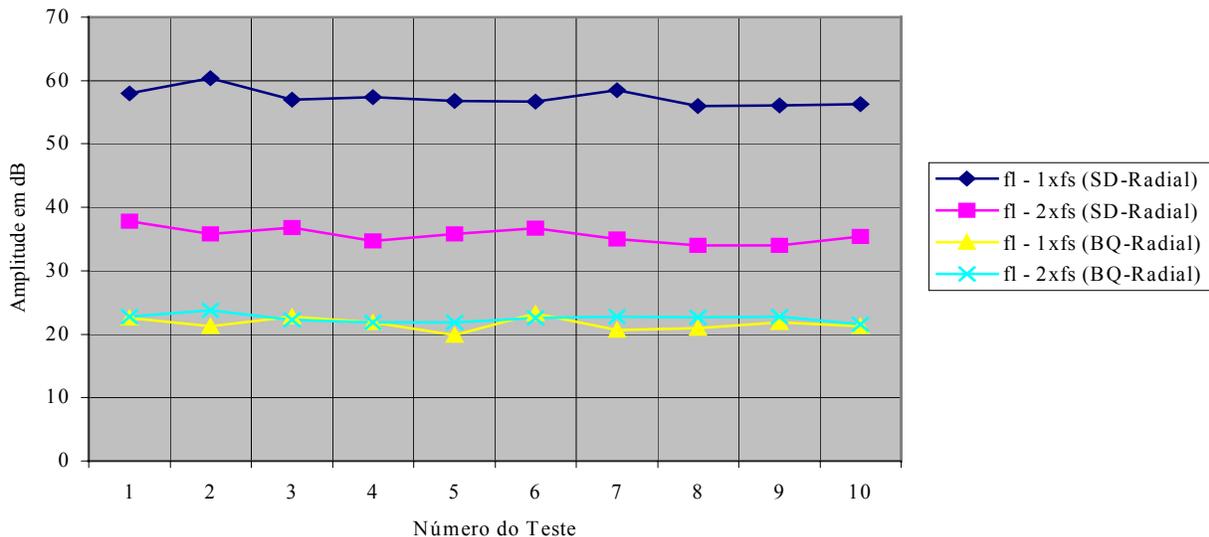
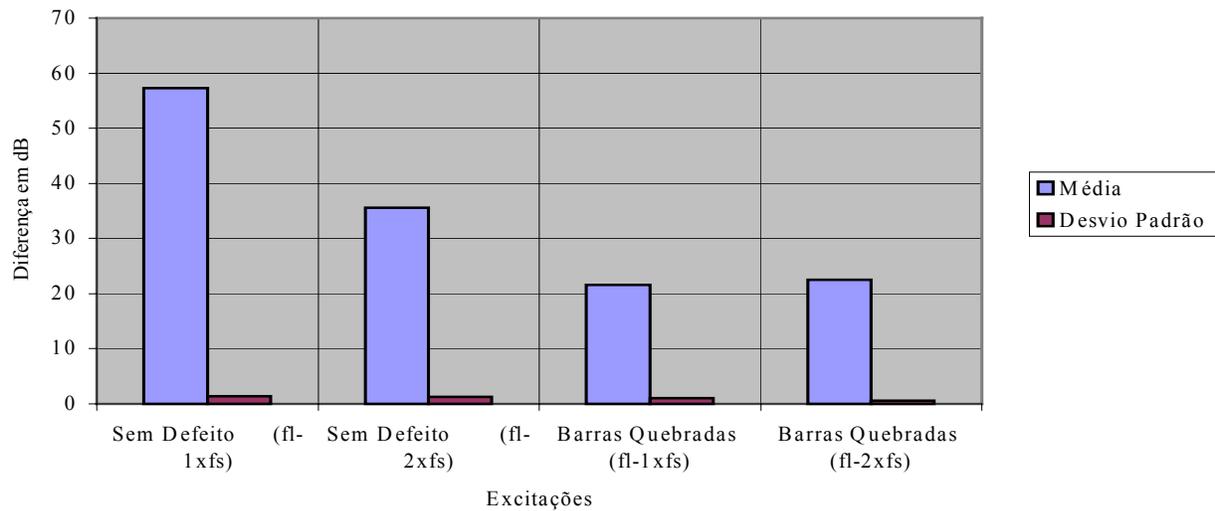


Figura 5. 10 - Média, desvio padrão e variação das diferenças em dB.

5.1.4 Detecção de barras quebradas através da análise de fluxo magnético (bobina axial)

Nas Figuras 5.11 e 5.12 têm-se os espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição normal de funcionamento e sete barras quebradas, respectivamente.

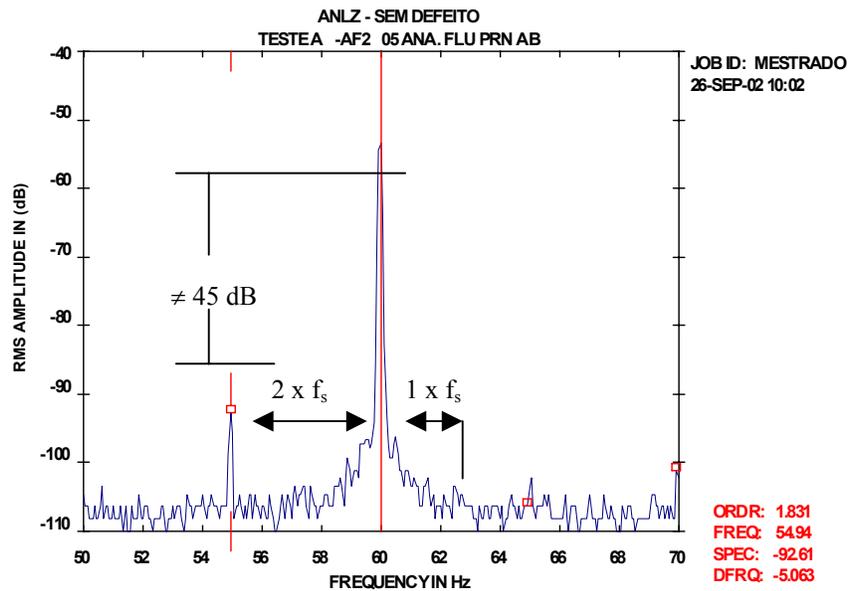


Figura 5. 11 - Espectros de fluxo (bobina axial) sem defeito.

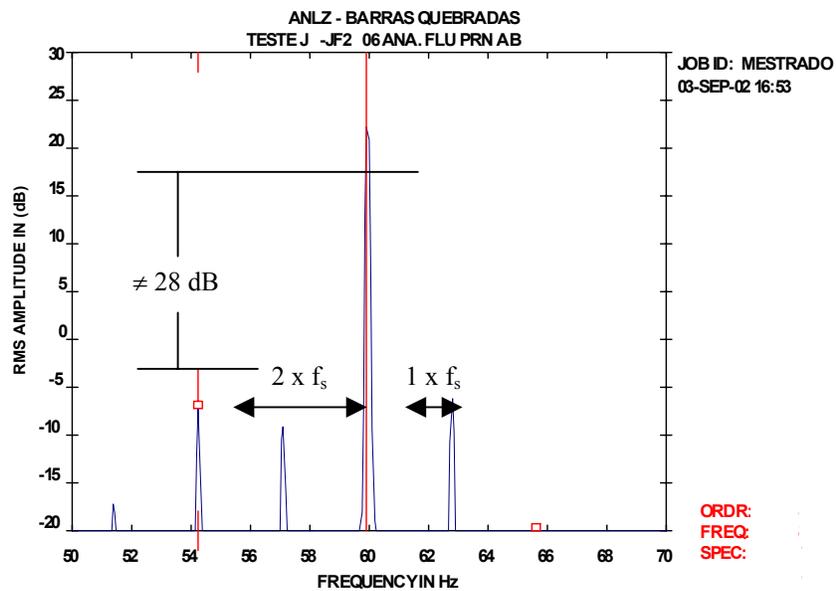


Figura 5. 12 - Espectros de fluxo (bobina axial) para 7 barras quebradas.

Na Figura 5.13 têm-se a média, o desvio padrão e a variação para a diferença em dB da amplitude da frequência de linha (f_l) e as bandas laterais de uma e duas vezes a frequência de escorregamento (f_s). Observa-se que para a situação sem defeito (SD), as diferenças estão em torno de 50 e 45 dB. Para 7 barras quebradas (BQ), essa diferença, diminui para 31 e 27 dB.

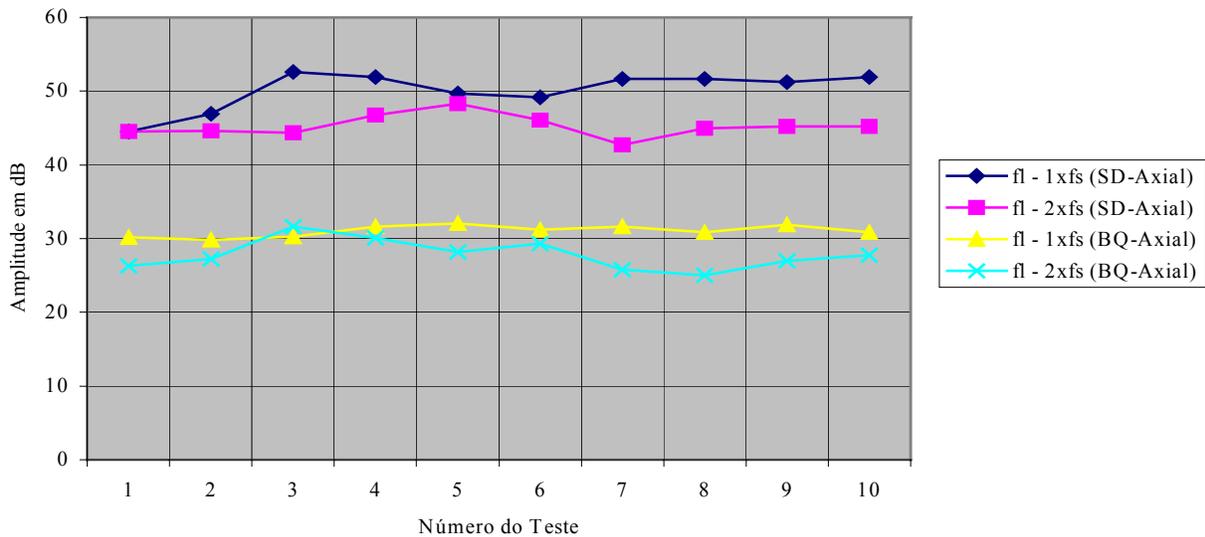
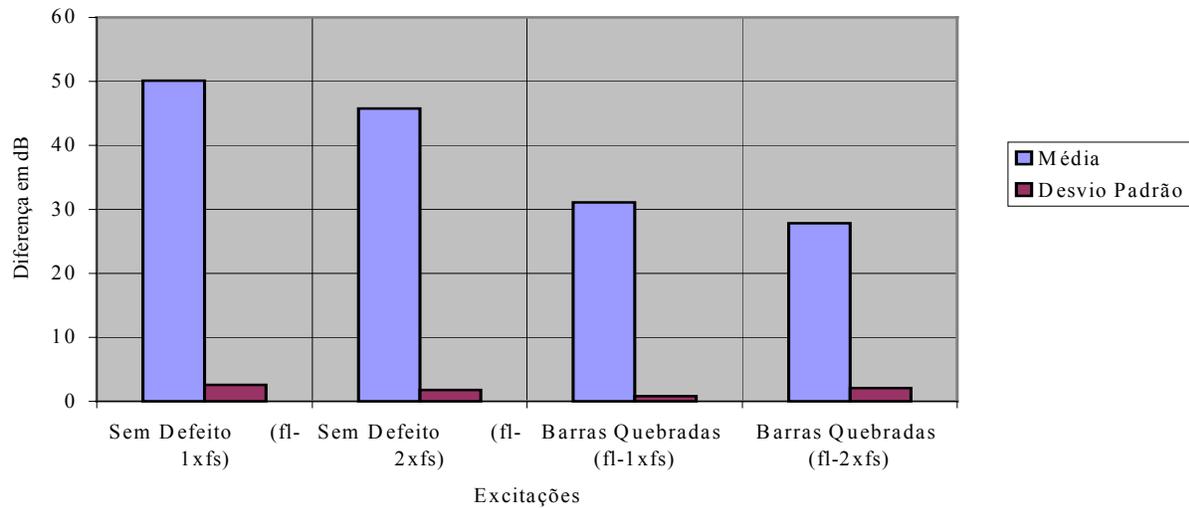


Figura 5. 13 - Média, desvio padrão e variação das diferenças em dB.

5.1.5 Análise dos resultados

A excitação devido a barras quebradas foi pesquisada usando-se três sensores, alicate amperímetro (análise de corrente) bobina de fluxo CSI e bobina de fluxo implementada (análise de fluxo), sendo as amplitudes (A) em dB . Geralmente, nas análises de corrente e fluxo, o diagnóstico é feito em $1 \times f_1 \pm 2 \times f_s$. Neste trabalho, além dessas frequências, também propõe-se a análise em $1 \times f_1 \pm 1 \times f_s$.

Na Figura 5.14 têm-se o quadro comparativo da média para os dez testes realizados com as tecnologias supra citadas.

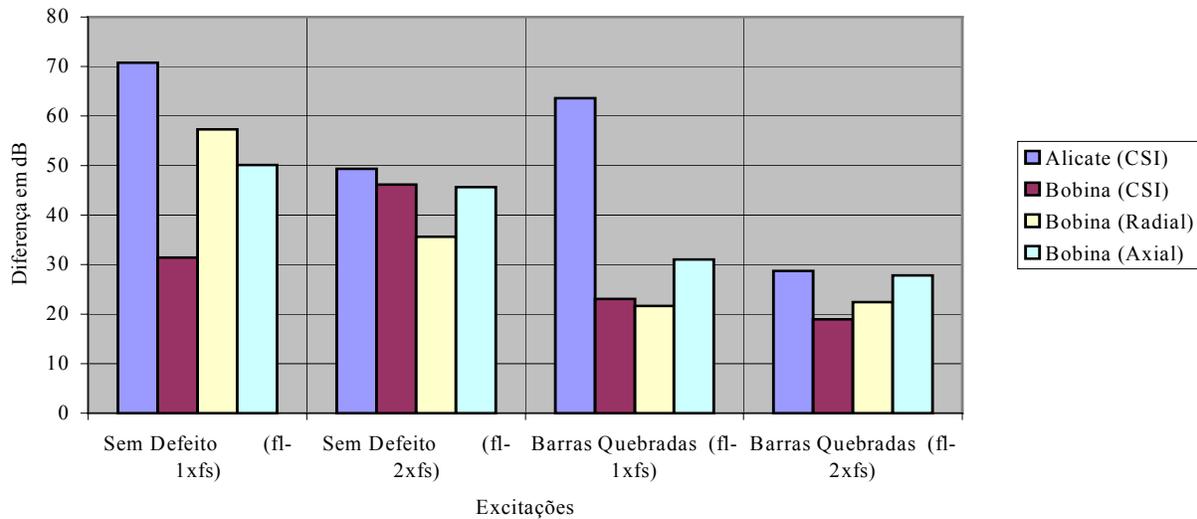


Figura 5. 14 - Quadro comparativo entre as técnicas.

A medida que aumenta o número de barras quebradas, a diferença em dB da banda lateral de $1 \times f_s$ e $2 \times f_s$ em torno da f_1 (análises de corrente e fluxo) diminui. Quanto menor for esta diferença, maior será o número de barras quebradas ou trincadas. Isto ocorre devido a alteração da uniformidade do campo magnético, Brito (2002).

Na Tabela 5.1 tem-se a severidade e recomendações para a análise de corrente, baseado na *Liberty Technologies Inc.*, Brito (2002).

Tabela 5.1 - Severidade e recomendações para análise de corrente.

A [dB] $f_1 - 2 \times f_s$	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

Comparando os resultados da Figura 5.14, para análise de corrente, observa-se que estes valores estão compatíveis com a Tabela 5.1. Para $f_1 - 2 \times f_s$, a *Liberty Technologies Inc.* não faz nenhuma referência e, conseqüentemente, não há como fazer comparações entre os resultados obtidos.

Para análise de fluxo, não existe na literatura tabelas de severidades e recomendações. Este é um campo aberto para novas pesquisas. Neste sentido, este trabalho pretende apresentar as primeiras contribuições.

Para os resultados obtidos com a bobina CSI, as amplitudes apresentam menores valores para as barras quebradas. Este comportamento também foi apresentado por Brito (2002) para $f_1 - 2 \times f_s$.

A análise de fluxo apresenta maior sensibilidade do que a análise de corrente, conseqüentemente, os valores para severidade são menores. Enquanto para a análise de corrente um determinado valor em dB é considerado "sem defeito", para análise de fluxo este mesmo valor pode ser um indicativo de barras quebradas.

As bobinas implementadas, tanto na posição radial quanto na axial, apresentaram resultados mais significativos. A diferença em dB, da condição sem e com defeito, são mais nítidas devido à bobina ser instalada dentro do motor. Este procedimento ajuda a minimizar a dispersão do fluxo magnético. A bobina implementada tem os sinais mais nítidos permitindo um diagnóstico mais seguro em $f_1 - 1 \times f_s$.

Capítulo 6

Conclusões

Através da comparação com o alicate amperímetro e a bobina de fluxo (exclusividade CSI), pôde-se observar que o novo sensor bobina de fluxo implementado dentro do motor elétrico mostrou-se eficiente e capaz de detectar em baixa e alta frequência os problemas de origem elétrica (*desbalanceamento de tensão, subtensão, sobretensão e barras quebradas ou trincadas*) introduzidos na bancada experimental.

Tanto a bobina CSI quanto a bobina implementada foram capazes de identificar as excitações introduzidas na bancada experimental, porém, para alguns casos, Tabelas 4.1 e 4.2, a bobina implementada apresentou mais parâmetros de análises tornando-se a identificação do problema mais visível.

Geralmente, nas análises de corrente e fluxo, o diagnóstico de barras quebradas ou rompidas é feito em $1 \times f_1 \pm 2 \times f_s$. Porém, pôde-se observar através da análise de fluxo magnético que é possível diagnosticar o problema na frequência $1 \times f_1 - 1 \times f_s$.

A bancada de teste apresentada no Capítulo IV mostrou-se adequada para o estudo das excitações de origem elétrica (*desbalanceamento de tensão, subtensão, sobretensão e barras quebradas*) e origem mecânica (*desbalanceamento*), destacando-se principalmente a sua robustez, permitindo a realização de uma série de 10 testes aleatórios e repetidos sobre as mesmas condições. Foram coletados 1170 espectros no módulo *UltraSpec Analyzer* (540 - análise de vibração, 90 - análise de corrente e 540 - análise de fluxo magnético).

Este número significativo de espectros formaram o banco de dados, indispensável para a validação da bobina de fluxo implementada e ao estudo dos motores de indução trifásicos através da análise do fluxo magnético. Através dele, foi possível detectar e diagnosticar as frequências determinísticas relacionadas às excitações de origem elétrica e mecânica introduzidas na bancada experimental.

As frequências determinísticas relacionadas às excitações de origem mecânica confirmaram o que já se conhecia da literatura e não foi possível detectar uma frequência determinística nos espectros de corrente e fluxo magnético que diagnosticasse o problema de desbalanceamento mecânico.

Já as frequências determinísticas relacionadas às excitações de origem elétrica apresentaram novos resultados, principalmente através da análise de fluxo magnético em baixa e alta frequência.

Pôde-se observar, através dos espectros de vibração, que todos os testes realizados tiveram uma boa repetibilidade e que nenhum problema de origem mecânica interferiu nos espectros de fluxo magnético, garantindo uma perfeita análise dos resultados.

Os resultados apresentados mostram que a análise de vibração não detectou os problemas de *subtensão* e *sobretensão*. Porém, para as demais excitações (*desbalanceamento de tensão e desbalanceamento mecânico*) os resultados confirmaram o que já se conhecia da literatura.

Uma das grandes vantagens da análise de vibração na identificação do desbalanceamento de tensão 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 frequências determinísticas.

Já na análise de fluxo é necessário um espectro de referência para, a partir dele, fazer o acompanhamento das frequências 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.

Uma grande vantagem da análise de fluxo magnético em relação à análise de corrente é que os espectros são coletados de forma segura, ou seja, sem acessar painéis elétricos, sem conectar a cabos energizados e sem requerer um eletricista para realizar as medições.

É importante observar que se trata de um estudo inicial e os aspectos referentes a um melhor posicionamento da bobina de fluxo (axial ou radial) dentro dos motores de indução trifásicos, deverão ser pesquisados posteriormente e que o intuito desta etapa do trabalho é validar a idéia como sendo uma forma alternativa, fácil, barata e confiável de se realizar a manutenção preditiva.

Para trabalhos futuros pretende-se:

- verificar um melhor posicionamento da bobina de fluxo dentro do motor;
- realizar novos estudos com a bobina implementada na posição axial;
- introduzir novas excitações na bancada experimental (*curto circuito entre espiras, curto circuito entre espira e estator, sobrecarga, desalinhamento etc...*);
- estender o estudo para diferentes motores;
- realizar o diagnóstico dos problemas de forma on-line.

Este estudo é uma contribuição importante, uma vez que o sensor implementado chega a ter um custo centenas de vezes menores que o sensor comercial. Outra vantagem é a possibilidade deste novo sensor ser compartilhado com qualquer analisador de sinais encontrado no mercado.

Referências Bibliográficas

- Almeida, M. T., Góz, R. D. S. *Apostila do Curso de Vibrações em Motores*. FUPAI, Itajubá, MG, 1994.
- Baccarini, L. M. R., Brito, J. N., Lamim Filho, P. C. M., 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.
- 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., Integrated strategy for predictive maintenance of AC Induction Motors, *Computational Systems Incorporated*, EUA, 1991.
- Bowers, S. V., Davis, W. A., Piety, K. R. Proactive motor monitoring. *CSI 1993 User Conference*, Louisville, K.L., 1993.
- Brito, J. N., *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).
- 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., Baccharini, L. M. R., Pederiva, R. Análisis de vibración y análisis de corriente, herramientas de mantenimiento predictivo 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., Lamim Filho, P. C. M., 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., Lamim Filho, P. C. M.. Detecção de problemas em motores elétricos através de técnicas preditivas. *VII Encontro de Usuários CSI no Brasil*, Belo Horizonte, MG, 1999^b.

- 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.
- 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., 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. *Induction Motor Analysis Software*. Computational Systems, Incorporated, CSI, Rev 2, 1997.
- Douglas, J., Edmonds, J., *et al.* Early warning for hydro generator failure. *EPRI Journal*, pp. 31-35, 1988.

- Elkassabgy N. M., Eastman, 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.
- Finley, W. R., Burke, R. R. Troubleshooting motor problems. *IEEE Transaction on Industrial Applications*, v.30 (5), pp. 1383-1397, 1994.
- Lamim Filho, P. C. M., 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.
- Lamim Filho, P. C. M., Programa de manutenção preditiva da planta unidade *Motor Fire* Unidade 7514, *Relatório de Estágio Supervisionado*, UFSJ, 2001, 110p.
- 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.
- 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.
- Kowal D., Bearing Damage Resulting from Shaft Voltages and Currents, *Computational Systems Incorporated*, EUA, 1999.

- 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.
- 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.
- Mamede, J., *Instalações Eléctricas Industriais*. 5º edição. LCT - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1997, 656 p.
- Milimonfared J., Kelly H. M., Minassians A. D., Namdi S., Toliyat H. A. A Novel approach for broken rotor bar detection in cage induction motors. *IEEE Industry Application Society*, pp. 286-290, 1998.
- Murry, R. J., Mitchell B. F. Cost savings from a practical predictive maintenance program. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1994, pp. 206-209.
- 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.
- 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.
- Sen, P. C., *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc., 1997, 613 p.

- Silveira, P. R., Winderson E. S., *Automação e Controle Discreto*. 2º edição. Editora Érica, 1998, 229 p.
- 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. An 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.
- Tavner, P. J., Penman, J. Condition monitoring of electrical machines. *Research Studies Press Ltd. John & Sons Inc.* 1989.
- 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.
- 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.

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.

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

Especificações Técnicas das Tecnologias CSI

I.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° a 50° C (15° a 120° 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).

I.2 *UltraSpec Laser Aligment*

- 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%.

- Inclinação: interno e automático.
- Eixos de medidas: total de 6, 2 deslocamentos e 1 rotação do eixo para cada cabeçote laser.
- Temperatura de operação: 32^o a 115^o F (0^o a 45^o C).
- Temperatura de armazenamento: 14^o a 140^o F (-10^o a 60^o 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 (0.0025 mm), saída = 0.1 mil (0.0025 mm) e máquina em movimento = 1 mil (0.025 mm).

I.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 frequência:
 - conversor A/D: 12 bits de precisão;
 - faixa dinâmica: maior que 70 dB;
 - número de médias: 1 a 9999;
 - resolução: 100, 200, 400, 800, 1600 ou 3200 linhas;
 - alta frequência: 10 Hz a 30 kHz;
 - distorção de harmônicos: menor que 55 dB.