

MD11
681
P3272
TES/MEM

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**UM ESTUDO SOBRE O USO DE TÉCNICAS NÃO-TRADICIONAIS
APLICADAS À DETECÇÃO DE DEFEITOS DE FABRICAÇÃO EM
CÂMBIOS AUTOMOTIVOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por:

JOSÉ LUIZ OLIVEIRA PENA

como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Mecânica

Aprovada por:

Prof. Dr. Marcus Antonio Viana Duarte - Orientador

Prof. Dr. Carlos Roberto Ribeiro - (FEMEC - UFU)

Prof. Dr. Francisco Paulo Lépore Neto - (FEMEC - UFU)

Prof. Dr. João Antônio Pereira (UNESP - ILHA SOLTEIRA)

Prof. Dr. Nilson Barbieri - (PUC/PR)

Eng. Renato Barreto (POWETRAIN)

SISBI/UFU



1000215047

Uberlândia, Abril de 2003.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
BIBLIOTECA



SISBI/UFU
215047

FU000324535

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

P397e Pena, José Luiz Oliveira, 1963 -

Um estudo sobre o uso de técnicas não tradicionais aplicadas à detecção de defeitos de fabricação em câmbios automotivos / José Luiz Oliveira Pena. - Uberlândia, 2003.

166f. : il.

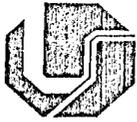
Orientador: Marcus Antonio Viana Duarte.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Vibração - Teses. 3. Processamento de sinais - Técnicas digitais - Teses. 4. Análise espectral - Teses. I. Duarte, Marcus Antonio Viana. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621(043.3)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Av. João Naves de Ávila, 2121 - 38400-902 Fone: 0XX(34)32394149 Ramal 42
FAX: 0XX(34)32394282 - Campus Santa Mônica - Uberlândia MG



ALUNO: JOSÉ LUIZ OLIVEIRA PENA

NÚMERO DE MATRÍCULA: 5001615-3

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL DOUTORADO

TÍTULO DA TESE:

“Um Estudo Sobre o Uso de Técnicas Não Tradicionais Aplicadas à Detecção de Defeitos de Fabricação em Câmbios Automotivos”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte

A tese foi **APROVADA** em reunião pública, realizada na Sala 218 da Faculdade de Engenharia Mecânica, Bloco IM do Campus Santa Mônica, em 11 de abril de 2003, às 09:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME		ASSINATURA
Marcus Antônio Viana Duarte, Prof. Dr.	UFU	
Carlos Roberto Ribeiro, Prof. Dr.	UFU	
Francisco Paulo Lépore Neto, Prof. Dr.	UFU	
João Antônio Pereira, Prof. Dr.	UNESP/FEIS	
Nilson Barbieri, Prof. Dr.	PUC-PR	
Renato Barreto, Eng°	POWERTRAIN/FIAT	

Uberlândia, 11 de abril de 2003.

Aos meus pais,
Maria da Glória Oliveira e Raimundo Jesus Ferreira Pena (in memoriam).

Aos meus filhos,
Luiz Felipe Fernandes Pena e Rafael Veloso Pena.

E a Celma Dias

Meus agradecimentos,

- Ao professor Marcus Antonio Viana Duarte, pela amizade e confiança demonstrada;
- Ao aluno de doutorado Tobias Anderson Guimarães, pela ajuda significativa a respeito da Transformada Choi-Williams;
- A Fiat Automóveis SIA - FIASA, por preparar os experimentos utilizados neste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	x
Lista de Quadros	xi
Lista de Símbolos	xv
Letras latinas	xii
Letras gregas	xiv
Resumo	xv
Abstract	xvi
1. Introdução e motivação para o trabalho	01
2. Modelo teórico para simulação dos sinais de vibração de engrenamento	07
2.1 Modelo para o sinal de engrenamento	08
3. Análises preliminares sobre o uso de novas metodologias aplicadas á detecção de rumorosidades em sinais de engrenamento.	13
3.1 Demodulação em amplitude e fase via Mínimos Quadrados	14
3.1.1 Modelo simplificado para o engrenamento	14
3.1.2 Algoritmo adaptativo para demodulação de amplitude e fase	15
3.1.3 Simulações numéricas	17
3.1.4 Conclusões a respeito do procedimento de demodulação	28
3.2 Decomposição de sinais de engrenamento via Transformada Stockwell Generalizada	29
3.2.1 Transformadas bidimensionais	30
3.2.2 A transformada wavelet	30
3.2.3 A transformada S	32
3.2.4 A transformada S generalizada	34
3.2.5 Considerações sobre as funções janelas	36
3.2.6 Implementação para o cálculo da transformada S	37
3.2.7 O procedimento de decomposição	38
3.2.8 Simulações numéricas para avaliação da metodologia	42
3.2.9 Conclusões a respeito da transformada Stockwell	51

3.3	Uso de transformada Choi-Williams na análise de sinais de engrenamento	52
3.3.1	Representações quadráticas bidimensionais	52
3.3.2	Simulações numéricas para avaliação da metodologia	57
3.3.3	Conclusões a respeito do uso da transformada Choi-Williams	69
3.4	Diagnóstico e identificação de falhas em engrenagens no domínio biespectral	70
3.4.1	Representações quadráticas bidimensionais	70
3.4.2	Simulações numéricas para avaliação da metodologia	72
3.4.3	Soma das magnitudes dos biespectros	72
3.4.4	Biespectros calculados fixando a frequência de engrenamento	76
3.4.5	Conclusões a respeito dos biespectros	81
4.	Análise de sensibilidade para a metodologia de estimadores estatísticos aplicados às parcelas temporais da transformada Choi-Williams de sinais de engrenamento.	82
4.1	Avaliação da influência do ruído sobre os estimadores	87
4.1.1	Análise para os sinais simulados da segunda marcha	87
a)	Comportamento das kurtosis estimadas	87
b)	Comportamento das energias estimadas	89
4.2	Avaliação da influência dos fatores de modulação sobre os estimadores	92
4.2.1	Análise para os sinais simulados da segunda marcha	92
a)	Comportamento das kurtosis estimadas	92
b)	Comportamento das energias estimadas	93
4.3	Avaliação conjunta da influência dos fatores de banda lateral e ruído sobre os estimadores	95
4.3.1	Análise para os sinais simulados da segunda marcha	95
a)	Comportamento das kurtosis estimadas	95
b)	Comportamento das energias estimadas	97
4.4	Conclusões	99
5.	Análise de sensibilidade para os valores de amplitude e fase de sinais simulados de engrenamento demodulados via procedimento de mínimos quadrados	100
5.1	Avaliação da influência das amplitudes para os sinais simulados da segunda marcha	103
5.1.1	Comportamento das amplitudes estimadas	103
5.1.2	Comportamento das fases estimadas	105
5.2	Avaliação da influência das bandas laterais sobre os sinais simulados da segunda marcha	107

5.2.1 Comportamento das amplitudes estimadas	107
5.2.2 Comportamento das fases estimadas	109
5.3 Avaliação da influência dos fatores de banda lateral e ruído sobre os sinais simulados da segunda marcha	111
5.3.1 Comportamento das amplitudes estimadas	111
5.3.2 Comportamento das fases estimadas	113
5.4 Conclusões	115
6. Análise dos dados medidos para os câmbios 14-58	116
6.1 Especificações da caixa de transmissão	116
6.2 Bancada de aquisição de sinais e instrumentação utilizada.	117
6.3 Descrição da estratégia adotada	120
6.4 Procedimento de Demodulação da Amplitude e da Fase	120
6.5 Cálculo da Energia da parcela temporal obtida para as frequências de interesse via Transformada Choi-Williams	125
6.6 Índice de Rumorosidade (IR) para a energia da parcela temporal obtida para a frequência de interesse da transformada de Choi-Williams	131
6.6.1 Avaliação do diferencial	131
6.6.2 Avaliação das marchas	133
6.7 Conclusões	135
7. Conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros	136
8. Referências Bibliográficas	139
Anexo 1	146
Anexo 2	164

Lista de Figuras

Figura 3.1.1a	Sinal sem modulação versus sinal com modulação em amplitude ($fm = 0,05$).	19
Figura 3.1.1b	Sinal sem modulação versus sinal com modulação em fase ($fm = 0,05$)	19
Figura 3.1.1c	Sinal sem modulação versus sinal com modulação em amplitude e fase ($fm = 0,05$)	20
Figura 3.1.2	Esquema da caixa de câmbio de duas marchas	21
Figura 3.1.3	Energia da diferença entre os sinais com e sem modulação ($fm_1 = 0,08$; $fm_2 = 0,04$; $feng_1 = 495\text{hz}$).	26
Figura 3.1.4	Energia da diferença entre os sinais com e sem modulação ($fm_1 = 0,04$; $fm_2 = 0,08$; $feng_1 = 945\text{hz}$).	26
Figura 3.1.5	Energia da diferença entre os sinais com e sem modulação ($fm_1 = 0,08$; $fm_2 = 0,04$; $feng_1 = 945\text{hz}$)	27
Figura 3.1.6	Energia da diferença entre os sinais com e sem modulação ($fm_1 = 0,04$; $fm_2 = 0,08$; $feng_1 = 1125\text{hz}$).	27
Figura 3.2.1	Representação gráfica para o cálculo da transformada Wavelet.	32
Figura 3.2.2	Representação gráfica para o cálculo da transformada Stockwell.	34
Figura 3.2.3.a	Sinal original versus resíduo - domínio do tempo (marcha IV, $fm = 10\%$, $fa = 2\%$).	44
Figura 3.2.3.b	Sinal original versus resíduo - domínio da frequência (marcha IV, $fm = 10\%$, $fa = 2\%$).	44
Figura 3.2.4.a	Sinal original versus resíduo - domínio do tempo (marcha 1, $fm = 10\%$, $fa = 2\%$).	46
Figura 3.2.4.b	Sinal original versus resíduo - domínio da frequência (marcha I, $fm = 10\%$, $fa = 2\%$).	47
Figura 3.2.5.a	Sinal original versus resíduo - domínio do tempo (marcha I, $fm = 6\%$, $fa = 15\%$).	48
Figura 3.2.5.b	Sinal original versus resíduo - domínio da frequência (marcha 1, $fm = 6\%$, $fa = 15\%$)	48
Figura 3.2.6.a	Sinal original versus resíduo - domínio do tempo (marcha II, $fm = 4\%$, $fa = 10\%$).	49
Figura 3.2.6.b	Sinal original versus resíduo - domínio da frequência (marcha II, $fm = 4\%$, $fa = 10\%$).	50
Figura 3.3.1	Relação entre a distribuição de Wigner-Ville e a função de ambigüidade simétrica.	55

Figura 3.3.2.a	Mapa da transformada Choi-Williams (marcha 1, fm =2%, fa = 2%).	58
Figura 3.3.2.b	Mapa da transformada Choi-Williams (marcha 1, fm = 10%, fa = 2%)	58
Figura 3.3.2.c	Mapa da transformada Choi-Williams (marcha 1, fm = 6%, fa = 15%).	59
Figura 3.3.3.a	Fator de crista em função do fator de modulação para a primeira marcha.	60
Figura 3.3.3.b	Kurtosis em função do fator de modulação para a primeira marcha.	61
Figura 3.3.3.c	Energia em função do fator de modulação para a primeira marcha.	61
Figura 3.3.4.a	Mapa da transformada Choi-Williams (marcha II, fm =2%, fa = 2%).	62
Figura 3.3.4.b	Mapa da transformada Choi-Williams (marcha II, fm =4%, fa = 10%).	62
Figura 3.3.4.c	Mapa da transformada Choi-Williams (marcha II, fm = 10%, fa =8%).	63
Figura 3.3.5.a	Fator de crista em função do fator de modulação para a segunda marcha.	64
Figura 3.3.5.b	Kurtosis em função do fator de modulação para a segunda marcha.	65
Figura 3.3.5.c	Energia em função do fator de modulação para a segunda marcha.	65
Figura 3.3.6.a	Mapa da transformada Choi-Williams (marcha III, fm = 2%, fa = 2%).	66
Figura 3.3.6.b	Mapa da transformada Choi-Williams (marcha III, fm = 10%, fa =2%).	66
Figura 3.3.7.a	Fator de crista em função do fator de modulação para a terceira marcha.	67
Figura 3.3.7.b	Kurtosis em função do fator de modulação para a terceira marcha.	68
Figura 3.3.7.c	Energia em função do fator de modulação para a terceira marcha.	69
Figura 3.4.1	Soma das magnitudes dos biespectros para a primeira marcha.	73
Figura 3.4.2	Soma das magnitudes dos biespectros para a segunda marcha.	74
Figura 3.4.3	Soma das magnitudes dos biespectros para a terceira marcha.	75
Figura 3.4.4	Soma das magnitudes dos biespectros para a quarta marcha	76
Figura 3.4.5	Magnitudes dos biespectros em função das frequências de engrenamento da primeira marcha.	76
Figura 3.4.6	Magnitudes dos biespectros em função das frequências de engrenamento da segunda marcha.	78
Figura 3.4.7	Magnitudes dos biespectros em função das frequências de engrenamento da terceira marcha.	79
Figura 3.4.8	Magnitudes dos biespectros em função das frequências de engrenamento da quarta marcha.	80
Figura 4.1.1	Gráfico-caixa e seus elementos básicos.	85
Figura 4.1.2	Distribuições hipotéticas examinadas através de seus gráficos-caixas	86
Figura 4.2	Gráficos-caixas da kurtosis em função do fator de amplitude - fator de ruído fixo (segunda marcha).	89

Figura 4.3.1	Gráficos-caixas da energia versus fator de amplitude, fator de ruído fixo (sinais bons, segunda marcha).	90
Figura 4.3.2	Gráficos-caixas da energia versus fator de amplitude, fator de ruído fixo (sinais defeituosos, segunda marcha).	91
Figura 4.4	Gráficos-caixas da kurtosis em função do fator de amplitude - fator de modulação fixo (segunda marcha).	93
Figura 4.5.1	Gráficos-caixas da energia versus fator de amplitude, fator de modulação fixo (sinais bons, segunda marcha).	94
Figura 4.5.2	Gráficos-caixas da energia versus fator de amplitude, fator de modulação fixo (sinais defeituosos, segunda marcha).	95
Figura 4.6	Kurtosis em função das frequências de engrenamento e bandas laterais da segunda marcha.	97
Figura 4.7	Energia em função das frequências de engrenamento e bandas laterais da segunda marcha.	98
Figura 5.1	Gráficos-caixas das amplitudes versus fator de amplitude, mesmo fator de ruído (segunda marcha).	104
Figura 5.2	Gráficos-caixas das fases versus fator de amplitude, mesmo fator de ruído (segunda marcha).	106
Figura 5.3	Gráficos-caixas das amplitudes versus fator de amplitude, mesmo fator de modulação (segunda marcha).	108
Figura 5.4	Gráficos-caixas das fases versus fator de amplitude, mesmo fator de modulação (segunda marcha)	110
Figura 5.5	Amplitudes versus frequências de engrenamento e bandas laterais para a segunda e terceira marchas.	112
Figura 5.6	Fases versus frequências de engrenamento e bandas laterais para a segunda e terceira marchas.	114
Figura 6.1	Foto da caixa de transmissão modelo 14-58	116
Figura 6.2	Localização do ponto de fixação do sensor sobre a caixa de transmissão	118
Figura 6.3	Sistema automatizado de aquisição de sinais na Sala Prova Câmbio	119
Figura 6.4	Índices de Rumorosidade para o diferencial em função da marcha.	132
Figura 6.5	Índices de Rumorosidade em para a segunda, terceira, quarta e quinta marchas.	134

Lista de Tabelas

Tabela 3.1.1	Valores de dA e dF para os dados com modulação em amplitude	20
Tabela 3.1.2	Valores de CIA e dF para os dados com modulação em fase	21
Tabela 3.1.3	Valores de dA e dF para os dados com modulação em amplitude e fase.	21
Tabela 3.1.4	Energia da diferença entre os sinais ($fm_1 = 0,08$; $fm_2 = 0,04$; $fe_2 = 495$ hz).	22
Tabela 3.1.5	Energia da diferença entre os sinais ($fm_1 = 0,08$; $fm_2 = 0,04$; $fe_2 = 945$ hz).	23
Tabela 3.1.6	Energia da diferença entre os sinais ($fm_1 = 0,04$; $fm_2 = 0,08$; $fe_2 = 495$ hz).	23
Tabela 3.1.7	Energia da diferença entre os sinais ($fm_1 = 0,04$; $fm_2 = 0,08$; $fe_2 = 945$ hz).	23
Tabela 3.1.8	Energia da diferença entre os sinais ($fm_1 = 0,08$; $fm_2 = 0,04$; $fe_1 = 945$ hz).	24
Tabela 3.1.9	Energia da diferença entre os sinais ($fm_1 = 0,08$; $fm_2 = 0,04$; $fe_2 = 1125$ hz).	24
Tabela 3.1.10	Energia da diferença entre os sinais ($fm_1 = 0,04$; $fm_2 = 0,08$; $fe_1 = 945$ hz).	25
Tabela 3.1.11	Energia da diferença entre os sinais ($fm_1 = 0,04$; $fm_2 = 0,08$; $fe_2 = 1125$ hz).	25
Tabela 3.2.1	Valores obtidos após ajuste para o sinal da quarta marcha (sem tratamento).	43
Tabela 3.2.2	Valores obtidos após ajuste para o sinal da primeira marcha (sem tratamento).	45
Tabela 3.2.3	Valores obtidos após ajuste do sinal da primeira marcha, fator de modulação de 10% (com tratamento).	46
Tabela 3.2.4	Valores obtidos após ajuste do sinal da primeira marcha, fator de modulação de 6% (com tratamento).	47
Tabela 3.2.5	Valores obtidos após ajuste do sinal da segunda marcha, fator de modulação de 4% (com tratamento).	49
Tabela 3.3.1	Valores do fator de crista, kurtosis e energia para a primeira marcha.	59
Tabela 3.3.2	Valores do fator de crista, kurtosis e energia para a segunda marcha.	64
Tabela 3.3.3	Valores do fator de crista, kurtosis e energia para a terceira marcha.	67
Tabela 4.1	Média e desvio padrão dos indicadores para a segunda marcha.	84

Tabela 4.2	Média e desvio padrão dos indicadores para a terceira marcha.	84
Tabela 4.3	Média e desvio padrão dos indicadores para a quarta marcha.	84
Tabela 5.1	Fator de modulação e porcentagem da amplitude da frequência de engrenamento.	100
Tabela 5.2	Média e desvio padrão para a amplitude e fase (sinais bons, segunda marcha).	101
Tabela 5.3	Média e desvio padrão para a amplitude e fase (sinais bons, terceira marcha).	102
Tabela 6.1	Número de dentes para as engrenagens do câmbio 14-58.	117
Tabela 6.2	Porcentagem de amplitude e fase acima do estimado para o câmbio padrão.	121
Tabela 6.3	Porcentagem de energia acima do estimado para o câmbio padrão.	126

Lista de Quadros

Quadro 6.1	Ocorrências de amplitude e fase acima do estimado para o câmbio padrão - câmbio rumoroso.	138
Quadro 6.2	Ocorrências de amplitude e fase acima do estimado para o câmbio padrão - câmbio rumoroso I.	139
Quadro 6.3	Ocorrências de amplitude e fase acima do estimado para o câmbio padrão - câmbio rumoroso II.	139
Quadro 6.4	Ocorrências de amplitude e fase acima do estimado para o câmbio padrão - golpe no diferencial.	140
Quadro 6.5	Ocorrências de amplitude e fase acima do estimado para o câmbio padrão - golpe no diferencial I.	140
Quadro 6.6	Ocorrências de amplitude e fase acima do estimado para o câmbio padrão - golpe no diferencial II.	141
Quadro 6.7	Ocorrências de amplitude e fase acima do estimado para o câmbio padrão - golpe no diferencial III.	141
Quadro 6.8	Ocorrências de energia acima do estimado para o câmbio padrão - câmbio rumoroso.	143
Quadro 6.9	Ocorrências de energia acima do estimado para o câmbio padrão - câmbio rumoroso I.	144
Quadro 6.10	Ocorrências de energia acima do estimado para o câmbio padrão - câmbio rumoroso II.	144
Quadro 6.11	Ocorrências de energia acima do estimado para o câmbio padrão - golpe no diferencial.	145
Quadro 6.12	Ocorrências de amplitude e fase acima do estimado para o câmbio padrão - golpe no diferencial I.	146
Quadro 6.13	Ocorrências de amplitude e fase acima do estimado para o câmbio padrão - golpe no diferencial II.	146
Quadro 6.14	Ocorrências de amplitude e fase acima do estimado para o câmbio padrão - golpe no diferencial III.	147
Quadro 6.15	Ocorrências de <i>IR</i> acima do valor estimado para o câmbio padrão (diferencial).	150
Quadro 6.16	Ocorrências de <i>IR</i> acima do valor estimado para o câmbio padrão (marchas).	152

Lista de Símbolos

Letras Latinas

a_m	Função de modulação para a amplitude.
$A_{m,n}$	Lei de modulação em amplitude para o m-ésimo harmônico de engrenamento para o tempo n.
A_{mm}	Amplitudes para a função de modulação em amplitude.
$B(f_1, f_2)$	Bispectro para de um sinal.
$B^2(f_1, f_2)$	Bi-coerência de um sinal.
b_m	Função de modulação para a fase.
B_{mm}	Amplitudes para a função de modulação em fase.
e_m $e(t)$	Ruído branco aditivo.
E_x	Energia total de um sinal $x(t)$.
f_a	Fator de amplitude.
f_e	Frequência de engrenamento.
f_m	Fator de modulação ou fator de banda lateral.
f_r	Frequência de rotação do eixo
$q(t)$	Núcleo da transformada wavelet.
$S(f, t)$	Transformada Stockwell de um sinal, para a frequência f e o tempo t .
$W(a, b)$	Transformada wavelet de um sinal, com parâmetros de dilatação e translação, a e b .
$x(t)$	Sinal de engrenamento.
X_a	Amplitude associada à frequência de rotação
Xa_p	Amplitude associada a p-ésima banda lateral de engrenamento.
X_b	Amplitude associada somente às frequências de engrenamento.
$Xb2_k$	Amplitude associada ao k-ésimo harmônico da frequência de engrenamento.
X_{bn}	Amplitude associada somente aos harmônicos das frequências de engrenamento.
$x_d(t)$	Sinal de engrenamento característico de desalinhamento.
$x_e(t)$	Parcela do sinal relativa à frequência de engrenamento.
$x_f(t)$	Sinal de engrenamento característico de excentricidade.
$x_g(t)$	Parcela do sinal relativa à rotação do eixo.
Xg_n	Amplitude associada ao n-ésimo harmônico da frequência de rotação.
$x_h(t)$	Parcela do sinal relativa aos harmônicos de engrenamento.
X_m	Amplitude associada a m-ésima frequência de engrenamento

Letras Gregas

α_{nm}	Fase para a função de modulação em amplitude.
β_{nm}	Fase para a função de modulação em fase.
χ_m	Fase associada a m-ésima freqüência de engrenamento.
ε_n	Erro ou resíduo existente em um ajuste
ϕ_n	Fase associada aos harmônicos de engrenamento.
$\Phi_{m,n}$	Lei de modulação em fase para o m-ésimo harmônico de engrenamento para o tempo n .
μ_n	Freqüência de ressonância do sistema.
μ	Parâmetro de janela.
θ_r	Média
σ	Desvio padrão.

Pena, J. L. O., 2003, "Um Estudo Sobre o Uso de Técnicas Não -Tradicionais Aplicadas à Detecção de Defeitos de Fabricação em Câmbios Automotivos", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

Resumo

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o uso de quatro ferramentas computacionais não-tradicionais com a finalidade de detecção e classificação automática de defeitos de montagem e fabricação em câmbios automotivos a partir de sinais de vibração. Devido ao estado do engrenamento poder ser caracterizado por modulações em amplitude e fase, duas técnicas de demodulação são consideradas: a demodulação da amplitude e da fase dos sinais de engrenamento utilizando mínimos quadrados e a decomposição via Transformada Stockwell, na qual são empregadas janelas que se ajustam às características de modulação do sinal. As outras duas abordagens levam em conta a amplitude das frequências de engrenamento e suas bandas laterais. Em uma, são adotadas ferramentas estatísticas, como kurtosis, fator de crista e nível médio quadrático, aplicadas às parcelas temporais associadas às frequências de interesse obtidas após aplicação da Transformada Choi-Williams aos sinais e na outra são calculadas a soma das magnitudes dos bispectros e a soma dos bispectros relacionados à frequência de engrenamento dos sinais de vibração. As metodologias propostas foram aplicadas aos dados simulados de vibrações de uma caixa de transmissão, onde em um estudo preliminar foi avaliada a viabilidade do emprego de cada uma. As metodologias escolhidas - demodulação da amplitude e fase e a que utiliza a transformada de Choi-Williams, foram submetidas a uma análise de sensibilidade com sinais simulados de engrenamento para avaliar a capacidade de cada uma quanto ao grau de modulação presente nos sinais, sob diversas condições de contaminação por ruído. Finalmente, estas duas abordagens foram aplicadas aos sinais de vibração obtidos de caixas de transmissão automotivas preparadas para esta finalidade.

Palavras-Chave: Câmbios Automotivos, Defeitos de Fabricação, Engrenagens, Otimização, Distribuições Tempo - Frequência, Análise de Sinais, Vibrações.

Pena, J. L. O., 2003, "A Study about use of nontraditional techniques applied to detection of automotive gearboxes manufacturing defects", PhD. Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG.

Abstract

In this work a study about the use of four mathematical-computational nontraditional tools with detection purpose and automatic classification of assembly and manufacturing defects in automotive gearboxes from vibration signals is presented. Due to the state of the gear meshing to be characterized by amplitude and phase modulations, two demodulation techniques are considered. The demodulation of the amplitude and phase of the gear meshing signals using least squares and decomposition by Generalized S Transform, in the which are used windows that are adjusted to the characteristics of signal's modulation. The other two approaches, take into account the amplitude of the gear meshing frequencies and their lateral bands. In one, statistical tools, as kurtosis, crest factor and root mean square level are adopted, applied to the time parcels associated to the frequencies of interest of Choi-Williams Transforms of the signals, and in another one is calculated the sum of the global Bispectrum magnitudes and also the sum of bispectrum related to the gear meshing frequency only. The proposed methodologies were applied to the simulated gear meshing vibration data, where a preliminary study is made for to evaluate the viability of each one. The chosen methodologies – Amplitude and phase demodulation and the one that uses Choi-Williams Transform were submitted to sensitivity analysis with simulated gear meshing signals in order to evaluate their capabilities how much to the modulation degree present in the signals, under several conditions of noise. Finally, these two approaches were applied to the real vibration signals obtained of an automotive transmission.

Keywords: Automotive gearboxes, Manufacturing defects, Gears, Optmization, Time-Frequency Distributions, Signal analysis, Vibrations.

Capítulo I

Introdução e motivações para o trabalho

Dos mecanismos atualmente utilizados para transmissão de potência, os sistemas de engrenamento são os mais simples e eficientes. Sua vantagem reside na possibilidade de permitir a variação da rotação e do torque fornecidos por um motor, ampliando a faixa de operação dos sistemas mecânicos.

Certamente, a característica que mais contribui para o sucesso e a onipresença dos sistemas de transmissão com engrenagens nos diversos setores industriais seja a sua capacidade de variação de rotação e do torque através de um sistema compacto e confiável, permitindo que os acionadores apresentem dimensões mais reduzidas e menor complexidade, sejam eles motores elétricos ou a combustão. Este aspecto é extremamente importante em qualquer área da engenharia, principalmente na indústria automotiva.

Devido à importância vital das caixas de transmissão, uma grande quantidade de pesquisa tem sido empreendida visando aumentar sua vida útil. Dentre as diversas vertentes, o estudo dos fatores pertinentes ao projeto, como os efeitos decorrentes da geometria inadequada, é uma das mais importantes (Howard et alli, 2001; Vexlex and Maatar, 1996; Amabili and Fregolent, 1998). Outro campo de pesquisa exaustivamente focado, onde talvez se encontre o maior número de pesquisa científica, é o da análise dos sinais ou também conhecido como análise de assinaturas (Braun, 1986) com o objetivo de prever o estado das caixas de engrenagens, de preferência o mais prematuramente possível (Wang and McFadden, 1995a; Wang and McFadden, 1995b; El Badaoui et alli, 2001; Wang et alli, 2001; Choi et alli, 1996; Barkov and Barkova, 1996).

Entretanto, neste trabalho tem-se um enfoque diferenciado das duas linhas de pesquisas descritas no parágrafo anterior, que consiste na utilização de técnicas não tradicionais de análise de sinais, não para detectar falhas, mas sim para o controle de qualidade de câmbios automotivos em linhas de montagem.

O Laboratório de Sistemas Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, em parceria com a Engenharia de Processo da FIAT Automóveis S/A, desenvolveu uma série de procedimentos computacionais e experimentais para serem utilizados como ferramenta de apoio na quantificação e identificação das possíveis fontes de rumorosidade nas caixas de transmissão ensaiadas nas bancadas de teste de câmbios da unidade FIASA em Betim, Minas Gerais (Menegatti and Duarte, 1999; Santana et alli, 1998). Atualmente encontra-se em funcionamento um aplicativo que executa um

procedimento passa não passa, utilizando curvas de mérito constituídas a partir de um banco de dados compostos por câmbios que foram considerados bons em ensaios na máquina de manobrabilidade e em testes de pista.

É interessante observar que a rejeição dos câmbios ensaiados ao se utilizar o procedimento adotado está associada a algum problema ocorrido na linha de fabricação ou montagem. Atualmente, constatada a rumorosidade, a definição das causas que resultaram em tal problema é efetuada por meio de testes dimensionais de todas as engrenagens, eixos e carcaças que compõem os câmbios. Considerando que a caracterização completa de uma engrenagem implica em dezenas de procedimentos metrológicos, conclui-se que a identificação da causa da rumorosidade tem custo elevado além de ser demorada.

A utilização das ferramentas clássicas de manutenção preditiva via monitoramento de vibrações não são eficazes devido ao grande número de engrenagens envolvidas, relações de transmissão próximas da unidade e devido ao fato do câmbio ser testado em vazio (Guimarães, 2000), o que implica em grandes flutuações na fase do sinal de vibração.

Além disso, a determinação das causas que geram um defeito em uma caixa de engrenagens é uma tarefa árdua devido à proximidade das freqüências de engrenamento de cada par de engrenagens que compõe as cinco marchas, tomando difícil a definição de qual par apresenta um possível defeito de fabricação ou montagem. Outro fator complicador relacionado a este sistema mecânico é que embora apenas um par de engrenagens esteja efetivamente acoplado ao eixo secundário, todos os demais permanecem engrenados, fazendo com que um defeito presente em uma marcha se manifeste mesmo que esta não esteja transmitindo potência. O problema torna-se ainda maior quando o defeito é no diferencial, pois o efeito induzido pelo defeito se faz sentir em todas as marchas, sendo necessário uma metodologia específica para determinação de defeitos associados a este par específico.

A presença de ruído também dificulta a análise dos sinais, tornando mais difícil sua interpretação. A realização de um procedimento de média no domínio do tempo, visando minimizar os efeitos destas entradas espúrias é uma ferramenta bastante eficaz. (Staszewski and Tomlinson, 1994). Este procedimento, além de reduzir a presença de ruído, também permite minimizar o inconveniente dos efeitos resultantes dos outros pares engrenados (Brie et al., 1997, McFadden, 1987a, McFadden, 1989, Lin et al., 1997).

Procedimentos estatísticos também podem ser adotados na obtenção das características importantes dos sinais, fazendo com que componentes não desejáveis como ruídos possam ser descartados (Dyer and Stewart, 1978; Masters, 1995).

Teoricamente, sinais de vibração de engrenagens apresentam um período constante, contudo, devido a não-linearidades inerentes ao processo de engrenamento, o espectro do sinal contém harmônicos da freqüência de malha, além da freqüência fundamental (Randall,

1982). Um espaçamento entre dentes não constante resulta em um ponto de contato fora do círculo do diâmetro primitivo e causa modulações em frequência em torno da frequência de malha e seus múltiplos, enquanto irregularidades das superfícies de contato dos dentes ou excentricidade de uma engrenagem podem causar modulação em amplitude, com uma frequência correspondente à velocidade de rotação do eixo (Randall, 1982; Brie et al., 1997, Ma e Li, 1996). A aplicação de uma abordagem de decomposição das modulações em amplitude e fase é uma ferramenta útil na determinação qualitativa das causas de rumorosidades.

Parte da razão pela qual as técnicas existentes têm tido aplicações limitadas reside na necessidade de especialistas para interpretar seus resultados. Para contornar este inconveniente, um grande esforço tem sido empreendido na aplicação de técnicas de inteligência artificial visando reduzir a necessidade de especialistas (Randal, 2001). Redes Neurais Artificiais determinísticas ou estocásticas adaptam-se perfeitamente aos problemas de classificação de dados (Lee and Kramer, 1994), em campos de investigação científica dos mais variados, como por exemplo na área médica, onde são utilizados sinais bio-elétricos de eletrocardiograma, eletroencefalograma ou sinais que da voz humana dentre outros (Freeman and Skapura, 1992) ou ainda na manutenção preditiva via sinais de vibração, (Alquindigue et alli, 1993; Berniere et alli, 1994; Peck and Burrows, 1994). A determinação da qualidade de montagem e fabricação de câmbios automotivos, via análise de sua assinatura mecânica enquadra-se perfeitamente nos casos acima. Uma rede neural pode ser treinada para associar a cada vetor uma categoria representativa. A dificuldade encontrada para se empreender tal tarefa, reside no fato da ordem dos vetores de dados ser grande. Isto é contornado mediante a compressão de dados, reduzindo os sinais a uma coleção de parâmetros de menor ordem, mas que ainda mantenham as informações relevantes contidas no sinal primitivo.

Existem vários meios para se levar a cabo tal tarefa, empregando-se para isto algumas técnicas matemáticas ou estatísticas. Desde a retirada de valores representativos dos dados, como: valores de pico, nível médio quadrático e potência até o uso de operadores matemáticos, como por exemplo as transformadas wavelet ou processos de decomposição, denominados perseguição de padrão – *Matching Pursuits* (Mallat and Zhang, 1993; Léopore Neto et alli, 2001; Léopore Neto et alli, 1999; Ruzzene et alli, 1997; Jaggi et alli, 1998) ou pelo uso da transformada Generalizada de Stockwell (Stockwell et alli, 1996; McFadden et alli, 1999).

A passagem do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência utilizando a função de densidade auto-espectral unilateral (Newland, 1993; Bendat e Piersol, 1986) reduz pela metade o número de pontos do sinal original, sem contar que no domínio da frequência torna-se possível escolher a banda onde se encontram os fenômenos de maior interesse a serem analisados.

Transformadas bidimensionais como por exemplo a Transformada Curta de Fourier e as Transformadas Wavelets, também podem ser utilizadas na redução de dados. Staszewsk e Tomlinson (1997) aplicaram a Transformada Curta de Fourier para detectar falhas em dentes de engrenagens de caixas de transmissão. Para facilitar a análise dos sinais assim obtidos, foi proposto um parâmetro indicativo da condição de falha para cada espectro de banda estreita de frequência.

O aumento da capacidade de processamento e armazenamento de dados dos computadores a partir da década de 90, tornou possível a implementação de ferramentas tempo-frequência para o processamento de sinais, as quais apresentam vantagens em relação às técnicas no domínio do tempo e da frequência. De modo geral, defeitos em sistemas de engrenagens geram componentes transientes de vibração que podem ser identificados através da extração do conteúdo das frequências excitadas pela falha em cada instante de tempo (Wang and McFadden, 1993). Guimarães (2000) empregou técnicas bidimensionais como ferramenta de análise em sinais de vibração provenientes dos ensaios de câmbios automotivos realizados em regime de rotação variável e, portanto altamente não estacionários.

Dentre as técnicas de análise de sinais não estacionários a Transformada Wavelet é a mais utilizada atualmente, devido ao seu baixo custo computacional e eficiência na compactação de dados (Gregoris and Yu, 1994). A filosofia do método consiste em correlacionar o sinal, com uma determinada função (wavelet mãe) que apresenta similaridades com as características que desejam ser extraídas. A variação da largura de banda desta função, especialmente projetada para a aplicação de interesse, permite visualizar todos os detalhes de curta e longa duração presentes no sinal. Portanto, todas as componentes de vibração, provocados por falhas em câmbios, podem ser caracterizadas por meio desta técnica, desde que seja empregada uma função que consiga modelar as vibrações de engrenagens (Wang and McFadden, 1996). Transformadas Wavelets (Newland, 1994a, Newland, 1994b) já foram usadas como um pré-processador por Paya e Badi (Paya e Badi, 1997) para a obtenção das características relevantes dos sinais de vibrações de engrenagens e rolamentos de uma caixa de transmissão.

Em outra classe de ferramentas tempo-frequência, se calcula a densidade de energia por unidade de frequência para cada instante de tempo do sinal (Cohen, 1995). A implementação deste conceito resulta na Distribuição de Wigner-Ville (Kadambe and Bartels, 1992) que, tem como inconveniente exibir valores de energia para o sinal em regiões onde intuitivamente não deveria existir (termos cruzados de interferência). Isto é um grande inconveniente sob o ponto de vista de detecção de falhas em câmbios, pois, para sinais multicomponentes com diversos harmônicos da frequência básica, as componentes efetivamente provocadas pelo defeito acabam sendo mascaradas (Guimarães, 2000). A Distribuição de Choi-Williams, na qual são

utilizados filtros visando atenuar a interferência dos termos cruzados (Choi and Williams, 1989), resulta numa ferramenta viável de análise com a vantagem de possuir uma resolução superior à obtida via Transformada Wavelet (Jones and Parks, 1992). Estas ferramentas tempo-freqüência são técnicas extremamente poderosas, mas exigem um conhecimento profundo para sua interpretação (Guimarães, 2000).

O emprego da análise tempo - freqüência usando distribuição Wigner-Ville para monitorar as condições de caixas de engrenagens em conjunto com procedimentos de reconhecimento baseados em técnicas estatísticas e reconhecimento de padrões via Redes Neurais foi estudado por Staszewski, Worden e Tomlinson (1997).

Neste trabalho são utilizados sinais simulados de engrenamento objetivando avaliar a eficácia de algumas metodologias não tradicionais para detecção de defeitos ocasionados por erros de fabricação ou montagem de caixas de transmissão.

No Capítulo II é apresentado o modelo de sinal de engrenamento que será utilizado nas diversas simulações numéricas.

No Capítulo III será feita uma avaliação preliminar das metodologias propostas, sendo que aquelas mais apropriadas serão submetidas a uma análise de sensibilidade onde se buscará determinar com maior detalhamento a capacidade de detecção de defeitos de variados graus sob diversos níveis de contaminação por ruído. Este capítulo será dividido em quatro itens.

No item 3.1 apresenta-se o procedimento de Mínimos Quadrados (Aguirre, 2000) adaptado ao problema da demodulação de sinais de engrenamento e sua aplicação aos dados simulados, onde se procurou avaliar a capacidade desta metodologia em detectar as variações no grau das modulações.

A introdução da Transformada de Stockwell (Stockwell et alli, 1996) é feita no item 3.2, juntamente com um procedimento para a decomposição dos componentes presentes no sinal, visando extrair as características de modulação dos sinais de engrenamento, no qual a qualidade da decomposição é garantida pela manutenção da energia dos resíduos.

No item 3.3 são feitas algumas considerações gerais a respeito das transformadas bidimensionais. De modo específico serão avaliados alguns indicadores clássicos de falhas aplicados às parcelas temporais associadas às freqüências de interesse para auxiliar na interpretação dos dados resultantes da Transformada de Choi-Williams como, por exemplo: kurtosis, fator de crista e nível médio quadrático.

No item 3.4 é apresentado um estudo sobre a utilização do bi-espectro (Randall et alli, 2001; Fackrell et alli, 1995a; Fackrell et alli, 1995b; Collis et alli, 1998), pertencente à análise estatística de alta ordem, como ferramenta para determinar o estado dos sinais simulados de engrenamento.

Nos capítulos IV e V, são apresentados a análise de sensibilidade para a metodologia baseada na demodulação da amplitude e da fase e o procedimento que utiliza estimadores estatísticos aplicados à transformada Choi-Williams dos sinais de engrenamento.

A aplicação das metodologias consideradas nos capítulos IV e V, bem como suas conclusões são aplicadas aos dados reais no capítulo VI.

Finalmente, no capítulo VII são apresentadas as conclusões globais e sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo II

Modelo teórico utilizado para simulação dos sinais de vibração de engrenamento

Os ensaios das caixas de transmissão na sala de prova de câmbios são realizados de maneira automatizada visando garantir a repetibilidade dos testes.

Na análise de falhas localizadas como por exemplo, trinca ou quebra de dente, as variações das funções de transferência sobre a vibração de engrenamento podem ser assumidas como relativamente insignificantes (Wang, 2001) devido ao alto fator de peso das assinaturas periódicas de engrenamento. O que não ocorre, por exemplo, com mancais de rolamentos (McFadden, 1986; Braun and Datner, 1979).

Contudo, na análise de defeitos distribuídos e incipientes, que possuem um baixo fator de peso nas assinaturas periódicas de engrenamento, como os decorrentes de erros de montagem ou usinagem, o caminho a ser percorrido pelo sinal, acaba por causar uma variação na localização das frequências naturais do sistema, influenciando as amplitudes das frequências de engrenamento e de seus respectivos harmônicos que por ventura se localizem próximas à região de ressonância. Para as caixas de câmbio avaliadas, conforme pôde ser observado nos ensaios realizados na linha de testes, a variação das amplitudes das frequências de engrenamento é da ordem de vinte por cento.

Uma das maneiras de contabilizar os efeitos das variações das funções de transferência sobre a amplitude das frequências de engrenamento em um modelo teórico consistiria em realizar uma análise modal da caixa de câmbio e determinar analiticamente uma força de excitação, que aplicada a esta função de transferência resultaria no sinal de saída do sistema. Entretanto a formulação analítica desta excitação é bastante complexa, dificultando assim o emprego desta metodologia.

O desenvolvimento de novas técnicas de diagnóstico de defeitos em engrenamentos pressupõe a necessidade do uso de modelos cada vez mais avançados para que sejam levados em conta os efeitos dos diferentes tipos de danos. Isto se faz necessário devido à impossibilidade de se construir protótipos reais, nos quais seja possível variar com precisão e repetibilidade necessárias os defeitos a serem analisados.

Uma das linhas que têm apresentado grande desenvolvimento é a da obtenção de modelos dinâmicos utilizando a técnica de elementos finitos, na exploração de vários aspectos, como por exemplo à análise do efeito do atrito causado pelas alterações da geometria e do material, sobre a vibração resultante (Howard et alli, 2001) e o efeito e determinação da rigidez de engrenamento às deformações de flexão e de contato de Hertz, como ferramenta auxiliar

para a otimização da geometria da evolvente (Brito, 1994; Brito e Lépre Neto, 1996). A grande desvantagem do uso destas abordagens advém do tempo necessário para se obter as respostas dos modelos, o que associado ao grande número de variáveis envolvidas, e de casos gerados, tornaria proibitivo o seu emprego dentro do escopo deste trabalho.

Outra metodologia consiste no modelamento matemático-analítico como ferramenta auxiliar nas inferências de diagnóstico. Bartelmus (2001) investigou os efeitos dos fatores de projeto, de tecnologia de produção, de operação e de mudanças nas condições de uso para avaliar a condição do sistema de engrenamento. A influência dos desvios de forma e erros de montagem sobre a dinâmica de engrenamento foi modelada por Velez e Maatar (1996), assumindo que o estado deformado seja representado por um sistema não linear de massas concentradas com seis graus de liberdade para o conjunto pinhão / coroa. Arakere e Nataraj (1998) estudaram os fenômenos que ocorrem devido à fadiga ocasionada pela excitação resultante de carregamentos centrífugos a cargas dinâmicas que agem sobre os dentes, que acabam por gerar quebras radiais por fadiga em engrenagens de dentes retos que operam em elevadas rotações.

Em algumas situações, uma abordagem interessante consiste em modelar apenas o sinal de engrenamento resultante, não se levando em conta os fatores de projeto. Aos sinais simulados são aplicadas técnicas de análise de sinais e se verifica a capacidade de detecção de alterações, considerando-se variados graus de defeitos e níveis de contaminação por ruído (Dalpiaz e Rivola, 1997; McFadden, 1986; Wang et alli, 2001; Arato Jr. e Silva, D. G., 2001).

Neste trabalho será adotada esta abordagem para obtenção dos sinais de engrenamento a serem utilizados para a análise de cada uma das técnicas propostas.

2.1 Modelo para o sinal de engrenamento.

Considerando um par engrenado com velocidade e carga constantes, números de dentes diferentes e assumindo a hipótese de que as duas engrenagens sejam ideais e não apresentem desvios de forma e espaçamento entre os dentes e ainda que não exista excentricidade, podemos representar a vibração devido ao engrenamento através de uma série de Fourier com uma frequência fundamental igual à frequência de engrenamento (McFadden, 1987a). Neste caso, a resposta deste sistema de engrenagens pode ser modelada no domínio do tempo conforme a equação 2.1.

$$x(t) = \sum_{m=1}^M X_m \cos(2\pi m f_e t + \chi_m) \quad (2.1)$$

Onde X_m é a amplitude, f_c a frequência de engrenamento, χ_m é a fase e m é o número de harmônicos de engrenamento.

No caso em que uma das engrenagens apresente um perfil não uniforme ou um erro no espaçamento entre os dentes, o que resulta em um sinal de vibração de engrenamento com modulação em amplitude ou fase, e considerando que a outra engrenagem do par não apresente defeitos, as modulações serão periódicas com a rotação da engrenagem defeituosa para a frequência de rotação $-f_r$. As funções de modulação para amplitude (a_m) e fase (b_m), podem ser representadas por séries finitas de Fourier para a frequência de rotação. Estas funções podem variar de um harmônico de engrenamento para outro, devendo portanto ser incorporado o subscrito m às equações (2.2.a) e (2.2.b).

$$a_m(t) = \sum_{n=1}^N A_{mn} \cos(2\pi n f_r t + \alpha_{mn}) \quad (2.2.a)$$

e

$$b_m(t) = \sum_{n=1}^N B_{mn} \cos(2\pi n f_r t + \beta_{mn}) \quad (2.2.b)$$

Onde A_{mn} e B_{mn} são as amplitudes e α_{mn} e β_{mn} são as fases para as funções de modulação e n é o número de bandas laterais de modulação consideradas.

A combinação das equações (2.1) com (2.2.a) e (2.2.b) resulta na equação (2.3), a qual descreve a vibração de engrenamento modulada $y(t)$

$$y(t) = \sum_{m=1}^M X_m (1 + a_m(t)) \cos(2\pi m f_c t + \chi_m + b_m(t)) \quad (2.3)$$

A influência de um impacto durante o engrenamento pode ser modelada pela introdução de um componente $z(t)$, associado à ressonância estrutural do modelo conforme mostrado na equação (2.4).

$$z(t) = d(t) \cos(2\pi \omega_r t + \theta_r) \quad (2.4)$$

Na equação (2.4) $d(t)$ é o envelope da função de modulação, o qual depende da resposta do sistema à excitação impulsiva, ω_r é a frequência de ressonância, que é a portadora da

energia impulsiva e θ_r , a fase inicial. O impacto decorrente de uma falha pode introduzir modulações adicionais de amplitude e fase à vibração do engrenamento.

Modelo de Engrenamento Expandido

Para melhor compreensão e controle dos defeitos que se deseja observar, o modelo apresentado na equação (2.3) pode ser dividido segundo as equações (2.5) (Randall, 1982)

a) Parcela relativa aos harmônicos de rotação do eixo - $x_g(t)$:

$$x_g(t) = X_a \text{sen}(2\pi f_r t) \quad (2.5.a)$$

Onde X_a é a amplitude e f_r a frequência de rotação do eixo.

b) Parcela devido à frequência fundamental de engrenamento - $x_e(t)$:

$$x_e(t) = X_b \text{sen}(2\pi f_e t) \quad (2.5.b)$$

Onde f_e é a frequência de engrenamento, X_b é a amplitude para a frequência de engrenamento considerada.

c) Parcela dos múltiplos da frequência de engrenamento - $x_h(t)$:

$$x_h(t) = \sum_{n=1}^N Xb_n \text{sen}(2\pi n f_e t + \phi_n) \quad (2.5.c)$$

Onde Xb_n é a amplitude do n-ésimo harmônico de engrenamento e ϕ_n é o ângulo de fase.

Os defeitos considerados para compor o conjunto de sinais de engrenamento defeituosos foram desalinhamento do eixo e excentricidade.

Nos espectros de frequência de sistemas de engrenamento com eixo desalinhado são observados harmônicos da frequência de rotação do eixo e principalmente harmônicos da frequência de engrenamento das engrenagens nele fixadas. Outra característica marcante é que os segundo e terceiro harmônicos apresentam amplitudes maiores que a da frequência

fundamental. Para este tipo de defeito, o limite crítico ocorre quando as amplitudes do segundo ou terceiro harmônicos da frequência de rotação ou da frequência de engrenamento atingem 50% da amplitude da frequência fundamental. (Arato Jr. e Silva, 2001). A equação (2.5.d) mostra o modelo matemático que representa este tipo de defeito.

$$x_d(t) = \sum_{k=1}^K Xa_k \text{sen}(2\pi k f_r t + \phi_k) + \sum_{n=1}^N Xb_n \text{sen}(2\pi n f_e t + \phi_n) \quad (2.5.d)$$

Onde: Xa_k é a amplitude do n -ésimo harmônico da frequência de rotação; K é o número de harmônicos da frequência de rotação; ϕ é o ângulo de fase; Xb_n é a amplitude do n -ésimo harmônico da frequência de engrenamento e N é o número de harmônicos da frequência de engrenamento.

Uma elevação nas amplitudes das frequências de engrenamento e o surgimento de bandas laterais de modulação são sintomas característicos de sistemas de engrenamento com excentricidade, cujas causas podem ser: montagem inadequada, erros de usinagem ou eixo fletido. Este defeito atinge seu limite máximo quando a amplitude da frequência de engrenamento for superior ao triplo da amplitude normal de funcionamento ou quando a amplitude de alguma banda lateral for de aproximadamente 70% da amplitude da frequência fundamental de engrenamento. A equação (2.5.e) representa o modelo para este tipo de defeito,

$$x_f(t) = \sum_{n=1}^N Xb_n \left[1 + \sum_{p=1}^P XI_p \text{sen}(2\pi f_r t) \right] \text{sen}(2\pi n f_e t + \phi_n) \quad (2.5.e)$$

Onde: P é o número de bandas laterais e XI_p é a amplitude da p -ésima banda lateral.

Logo o sinal de um par engrenado, de forma geral, pode ser modelado pela somatória de todas estas contribuições,

$$x(t) = x_s(t) + x_e(t) + x_h(t) + x_d(t) + x_f(t) \quad (2.6)$$

Sendo que o modelo de um sinal sem defeito possui apenas as três primeiras parcelas do lado direito da igualdade.

Os efeitos da variação dos autovetores e autovalores das funções resposta em frequência das caixas de transmissão foram levados em conta pela introdução de um fator de amplitude, f_a , aplicado às amplitudes das frequências de engrenamento indo de 2% até o limite de 20%.

Considerou-se ainda que, como no caso real, todas as engrenagens estejam gerando simultaneamente com àquela que está transmitindo potência.

Em todos os casos simulados, na composição do conjunto de sinais de engrenamento com defeitos foram considerados desalinhamento do eixo e excentricidade, o que implica, respectivamente, em modulação em amplitude e modulação em fase.

Para permitir alterar o grau do defeito foi introduzido um fator de modulação, f_m , que assume valores de 10% a 80%. Deste modo, as amplitudes das bandas laterais de modulação são determinadas pela aplicação deste fator sobre a amplitude da frequência de engrenamento ou de seu harmônico. Para os sinais bons, considerando a inexistência de engrenamento perfeito, foi adotado um fator de modulação de 10%.

Capítulo III

Análises preliminares sobre o uso de novas metodologias aplicadas à detecção de rumorosidades em sinais de engrenamento.

Neste capítulo é apresentada uma análise preliminar de quatro técnicas não convencionais aplicadas a sinais de vibração simulados para caixas de transmissão automotivas, com o objetivo de determinar qual das abordagens é a mais promissora quanto à viabilidade de aplicação e capacidade de detecção e classificação dos defeitos.

A viabilidade de aplicação está diretamente relacionada ao custo computacional, principalmente no que diz respeito ao tempo de processamento.

No item 3.1 apresenta-se uma metodologia para demodulação da amplitude e da fase de sinais de engrenamento via mínimos quadrados (Brie et alli, 1997).

Um procedimento baseado na Transformada Stockwell (Stockwell et alli, 1996) aplicado à decomposição dos componentes de um sinal e sua adaptação ao caso específico de sinais de engrenamento será desenvolvido no item 3.2.

No item 3.3, é avaliado o uso de estimadores estatísticos tradicionais, como: kurtosis, fator de crista e energia do sinal (Braun, 1986), aplicados às parcelas temporais associadas às frequências de engrenamento e bandas laterais resultantes da transformada de Choi-Williams (Choi e Williams, 1989).

Finalmente, no item 3.4 faz-se uma introdução do conceito de biespectro (Collis et al., 1998) e a avaliação de sua provável aplicação na determinação de falhas em sinais de engrenamento, tendo por base a magnitude dos biespectros relativos às frequências de engrenamento consideradas.

Em todos os casos, as metodologias propostas serão aplicadas a sinais simulados de engrenamento. Ao cabo destas análises preliminares serão adotadas as metodologias mais promissoras, para que seja feita uma avaliação aprofundada através de uma análise de sensibilidade, onde se verificará a capacidade de reconhecimento de defeitos de variados graus sob diversos níveis de contaminação por ruído.

3.1 - Demodulação em amplitude e fase via mínimos quadrados.

Teoricamente os sinais de vibrações de pares engrenados são periódicos, sendo este período igual ao inverso da frequência de engrenamento f_e . Contudo, para que isto ocorra, a geração de dentes idênticos e com espaçamento constante entre os mesmos só seria possível por intermédio de um processo usinagem perfeito, o que elevaria os custos de produção, implicando em uma operação economicamente inviável.

Devido a não linearidades existentes no processo de engrenamento, o espectro do sinal apresenta harmônicos da frequência fundamental. As imperfeições geradas no processo de fabricação e montagem fazem com que o contato dos dentes não ocorra exatamente no diâmetro primitivo da engrenagem, originando modulações em frequência em torno da frequência de engrenamento e seus harmônicos. As diferenças nos dentes da engrenagem provocam variações da carga mecânica, as quais podem se manifestar no sinal vibratório como modulações em amplitude.

Sabendo que as modulações manifestam os desvios da condição ideal do par engrenado quanto ao aspecto geométrico, técnicas de demodulação podem ser utilizadas não apenas para a detecção de defeitos motivados por falhas localizadas (McFadden, 1987b), mas também como uma ferramenta auxiliar na avaliação da qualidade das caixas de transmissão produzidas.

3.1.1 - Modelo simplificado para o engrenamento.

Considerando um par de engrenagens cujos dentes sejam perfeitamente rígidos, e que na apresentem desvios geométricos decorrentes do processo de fabricação e montagem, pode-se representar o sinal de vibração deste par, no domínio do tempo, como uma série trigonométrica que é função da frequência de engrenamento e de seus harmônicos.

$$x(t) = \sum_{m=1}^M X_m \cos(2\pi m f_e t + \phi_m) \quad (3.1.1)$$

Sendo M o número de harmônicos considerados.

Levando-se em conta o erro de perfil do dente, o erro de espaçamento entre os dentes ou outros defeitos que possam introduzir alteração na amplitude ou na fase associadas à frequência de engrenamento e aos seus harmônicos, a equação (3.1.2) que é resultante da incorporação a equação (3.1.1) das funções de modulação em amplitude - $a_m(t)$ e fase - $b_m(t)$, permite representar tais efeitos no sinal de vibração.

$$x(t) = [1 + a_m(t)] \sum_{m=1}^M X_m \cos[2\pi m f_c t + \phi_m + b_m(t)] + e(t) \quad (3.1.2)$$

Onde $e(t)$ representa um ruído branco aditivo.

O acompanhamento do comportamento das modulações em amplitude e fase tem se mostrado como uma abordagem promissora para a detecção de problemas em engrenagens, tanto para as não-estacionariedades lentas, introduzidas por falhas distribuídas como as resultantes de desgaste, desalinhamento do eixo; ou nos caso de não-estacionariedades abruptas, representadas por falhas localizadas, tais como quebras (Ma e Li, 1996; McFadden, 1986; Boulahbal et alli., 1999). Para tanto pode ser empregado um algoritmo baseado no procedimento recursivo de mínimos quadrados para estimar as variações temporais de amplitude e fase, permitindo avaliar o estado do par engrenado.

3.1.2 Algoritmo adaptativo para demodulação de amplitude e fase.

O procedimento seqüencial para estimação de parâmetros é o método recursivo via mínimos quadrados e apresenta duas vantagens importantes: uma é a não necessidade de inversão da matriz, outra é a possibilidade de se estimar parâmetros de processos dinâmicos em tempo real (Beck e Arnold, 1976).

Considerando a versão discreta do modelo representado pela equação (3.1.2), onde $A_{m,n}$ e $\Phi_{m,n}$ são respectivamente as leis de modulação em amplitude e fase:

$$x_n = \sum_{m=1}^M A_{m,n} \cos(2\pi m f_c n + \Phi_{m,n}) + e_n \quad (3.1.3)$$

A linearização do modelo dado pela equação (3.1.3) pode ser obtida, conforme pode ser visto nas equações (3.1.4), (3.1.4.a) e (3.1.4.b)

$$x_n = H_n^T \cdot \Theta_n + e_n \quad (3.1.4)$$

$$H_n^T = [\cos(2\pi f_c n) \quad \sin(2\pi f_c n) \quad \cdots \quad \cos(2\pi m f_c n) \quad \sin(2\pi m f_c n)]^T \quad (3.1.4.a)$$

$$\Theta_n^T = [A_{1,n} \cos \Phi_{1,n} \quad A_{1,n} \sin \Phi_{1,n} \quad \cdots \quad A_{m,n} \cos \Phi_{m,n} \quad A_{m,n} \sin \Phi_{m,n}]^T \quad (3.1.4.b)$$

sendo Θ_n o vetor de parâmetros a ser estimado. Estas equações representam um modelo linear em relação aos parâmetros (Aguirre, 2000), que podem ser estimados recursivamente utilizando-se as equações (3.1.5.a) a (3.1.5.d)

$$K_n = (H_n^T P_{n-1} H_n) P_{n-1} H_n \quad (3.1.5.a)$$

$$\varepsilon_n = x_n - H_n^T \hat{\Theta}_n \quad (3.1.5.b)$$

$$\hat{\Theta}_n = \hat{\Theta}_{n-1} + K_n \varepsilon_n \quad (3.1.5.c)$$

$$P_n = (I - K_n H_n^T) P_{n-1} \quad (3.1.5.d)$$

A escolha dos valores dos elementos da matriz P é de fundamental importância para o êxito do procedimento. Uma matriz P com valores nulos dos elementos indica que a variância dos parâmetros é nula, ou seja, a adição de mais pontos não altera os parâmetros estimados. O uso de uma matriz P que contenha elementos com valores pequenos em relação aos parâmetros a serem estimados implica em dizer que se conhece com certeza informações anteriores a respeito dos mesmos, conduzindo a estimativas incorretas. Valores acima do ideal também acarretam estimativas incorretas. Segundo Beck e Arnold (1976) dois procedimentos podem ser adotados para avaliar os valores ideais dos elementos da matriz P :

- a) A ordem de grandeza dos elementos da diagonal principal da matriz obtida na iteração anterior - P_{n-1} , deve ser aproximadamente mil vezes superior ao quadrado dos parâmetros a serem estimados;
- b) A ordem de grandeza do maior elemento estimado deve superar em mil vezes o maior termo da diagonal principal da matriz P , obtida após um número de iterações igual à quantidade de elementos a serem estimados.

A adoção de um modelo alternativo, como dado pela Equação (3.1.4) tem como inconveniente a impossibilidade da obtenção direta da fase, sendo necessário para isto a utilização de uma técnica de desempacotamento.

Ao se estimar Θ_n , utilizando-se a equação (3.1.4.b), as amplitudes e fases para cada frequência de engrenamento m e tempo n podem ser obtidas fazendo-se:

$$u_{m,n} = A_{m,n} \cos \Phi_{m,n} \quad (3.1.6.a)$$

e

$$v_{m,n} = A_{m,n} \operatorname{sen} \Phi_{m,n} \quad (3.1.6.b)$$

sendo a fase dada pela equação (3.1.7)

$$\Phi_{m,n} = \operatorname{arctg}(v,u) \quad (3.1.7)$$

e a amplitude obtida utilizando-se a relação fundamental da trigonometria aplicada às equações (3.1.6)

$$A_{m,n} = \sqrt{u_{m,n}^2 + v_{m,n}^2} \quad (3.1.8)$$

Embora seja possível o uso de um procedimento recursivo, este só se faz necessário e interessante quando o monitoramento das condições do sistema de engrenamento acontece em tempo real ou não se pode contar com toda a história temporal. Nos casos em que a história que caracterize o sistema for curta, permitindo seu armazenamento prévio, faz-se mais adequado o uso de um procedimento não recursivo para a estimação dos parâmetros, que apresenta como vantagens a não necessidade de um grande número de amostras para que se tenha a estabilidade dos parâmetros estimados e a ausência de escolha de estimativas iniciais, que afetam sobremaneira o sucesso do processo não linear.

3.1.3 Simulações numéricas.

Para verificar a validade da técnica de demodulação de amplitude e fase utilizando mínimos quadrados recursivos serão considerados sinais computacionalmente gerados a partir do modelo dado pela equação (3.1.2), onde as funções de modulação em amplitude e fase são descritas respectivamente, pelas equações (3.1.9.a) e (3.1.9.b).

$$a_m(t) = \sum_{k=0}^K A_{m,k} \cos(2\pi k f_R t + \alpha_{m,k}) \quad (3.1.9.a)$$

$$b_m(t) = \sum_{k=0}^K B_{m,k} \cos(2\pi k f_R t + \beta_{m,k}) \quad (3.1.9.b)$$

Onde: $A_{m,k}$ e $B_{m,k}$ são as amplitudes e $\alpha_{m,k}$ e $\beta_{m,k}$ são as fases para as funções de modulação, sendo f_R a frequência de rotação do eixo e K o número de pares de bandas laterais de modulação consideradas.

Avaliação da capacidade de quantificar o grau de modulação.

Na avaliação da capacidade de mensurar o grau de modulação foram consideradas quatro situações: sinais sem defeito, sinais com modulação em amplitude, sinais com modulação em fase e sinais com modulação em amplitude e fase. Adotou-se como número de dentes da engrenagem, $z = 11$ para uma frequência de rotação do eixo, $f_R = 45$ Hz. Foram ainda considerados quatro harmônicos de engrenamento e dois pares de bandas laterais de modulação.

Para as matrizes de amplitudes das funções de modulação A e B , e para o vetor de amplitudes da função de engrenamento X , foram adotados os seguintes valores:

$$A = fm \begin{bmatrix} 1.4 & 1.2 & 1.1 & 0.8 & 0.6 & 0.4 \\ 1.4 & 1.2 & 1.1 & 0.8 & 0.6 & 0.4 \end{bmatrix}^T,$$

$$B = fm \begin{bmatrix} 1.5 & 1.2 & 0.9 & 0.6 & 0.3 & 0.15 \\ 1.5 & 1.2 & 0.9 & 0.6 & 0.3 & 0.15 \end{bmatrix}^T$$

e

$$X = [3.4 \quad 2.3 \quad 1.96 \quad 1.72 \quad 1.48 \quad 1.24]$$

O fator de modulação fm serve para controlar a porcentagem da amplitude da frequência de engrenamento a ser adotada na definição das amplitudes das bandas laterais de modulação.

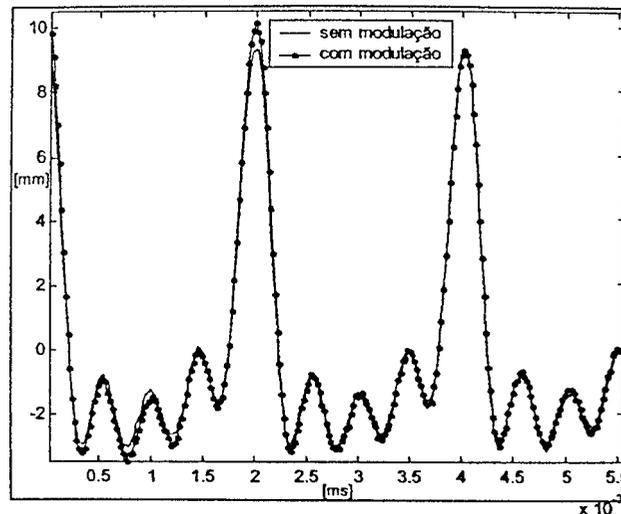
Para cada caso foi criada uma matriz formada por oitenta vetores de dados com 4096 pontos amostrados com frequência de 23.040 Hz. Aos vetores foram somados ruídos aleatórios de média zero, variância unitária e nível médio quadrático da ordem de 8,0% do nível médio quadrático do sinal original. Nos casos considerados o fator de modulação variou dentro da faixa de 0,05 até 0,2. O sinal representativo de cada caso foi obtido após a realização de duzentos e oitenta médias no domínio do tempo tendo como base o período de engrenamento.

As figuras 3.1.1.a, 3.1.1.b e 3.1.1.c mostram a primeira quarta parte do período dos sinais com modulação em amplitude, modulação em fase e modulação em amplitude e fase, gerados com um fator de modulação de 0,05, juntamente com o sinal sem modulação.

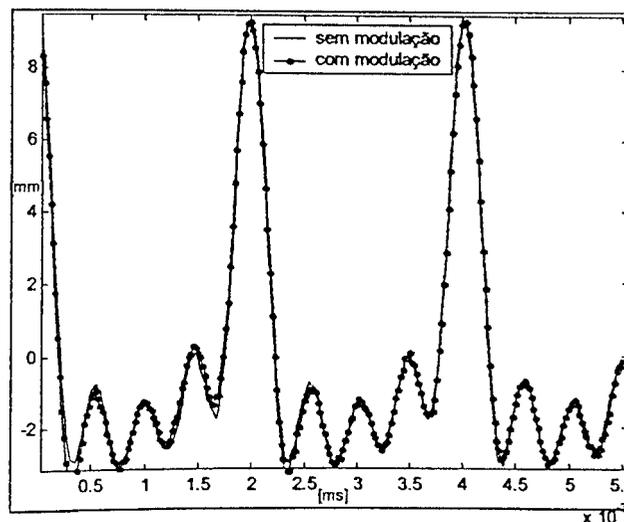
Da figura 3.1.1.a observa-se que não há dificuldade em se visualizar as diferenças entre o sinal sem modulação e o sinal modulado em amplitude.

A comparação entre o sinal com modulação em fase e o sinal sem modulação pode ser feita na figura 3.1.1.b, neste caso observa-se que a diferenciação entre os sinais se torna um pouco mais difícil.

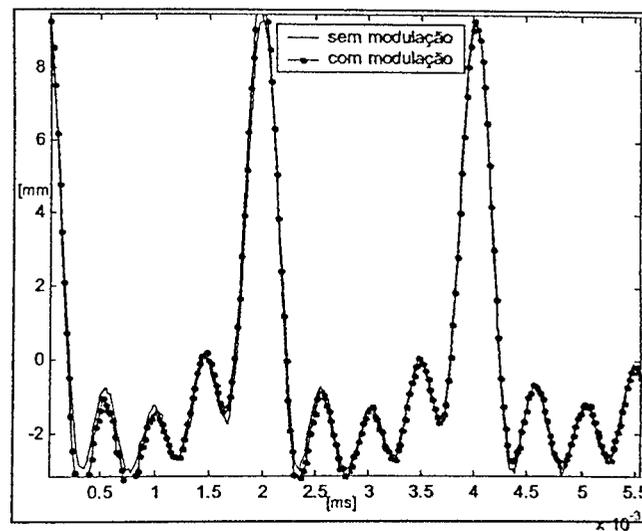
Na figura 3.1.1.c são mostrados o sinal sem modulação e o sinal com modulação em amplitude e fase. Neste caso nota-se que é bastante difícil definir qual o tipo de modulação existe no sinal e principalmente se os dois tipos ocorrem concomitantemente.



3.1.1.a – sinal sem modulação *versus* sinal com modulação em amplitude ($f_m = 0,05$)



3.1.1.b – Sinal sem modulação *versus* sinal com modulação em fase ($f_m = 0,05$)



3.1.1.c – Sinal sem modulação versus sinal com modulação em amplitude e fase ($f_m = 0,05$)

Análise quantitativa das demodulações

Para quantificar as diferenças entre os tipos de modulação, foi calculada a média quadrática da diferença entre o vetor resultante da demodulação para o sinal com modulação e para o sinal sem modulação. Nas tabelas 3.1.1 a 3.1.3 são mostrados os valores em decibéis dos níveis médios quadráticos das diferenças para as demodulações em amplitude (dA) e fase (dF) dos quatro primeiros harmônicos, em função do harmônico e do grau de modulação f_m , para cada um dos três tipos de sinal. O valor de referência adotado nestas tabelas foi de 1×10^{-9} . Foram considerados valores de f_m iguais a 0,05, 0,1 e 0,2.

Na situação em que ocorre apenas modulação em amplitude, pode-se observar na tabela 3.1.1 um acréscimo nos valores de dF e dA com o aumento do grau de modulação f_m .

Tabela 3.1.1 – Valores de dA e dF para dados com modulação em amplitude.

f_m	Harmônico 1		Harmônico 2		Harmônico 3		Harmônico 4	
	dA (dB)	dF (dB)						
0,05	51,69	2,33	47,11	6,00	44,91	7,20	42,19	-19,03
0,1	57,70	8,34	53,23	12,28	51,02	13,11	46,79	14,57
0,2	63,78	14,41	59,15	18,53	57,01	18,97	52,88	20,86

Para os dados nos quais foi considerada somente a presença de modulação em fase cujos valores são apresentados na tabela 3.1.2, pode-se verificar a evolução dos valores de dA e dF com o aumento do grau de modulação.

Tabela 3.1.2 – Valores de dA e dF para os sinais com modulação em fase.

f_m	Harmônico 1		Harmônico 2		Harmônico 3		Harmônico 4	
	dA (dB)	dF (dB)						
0,05	32,79	27,31	27,72	25,85	27,44	25,24	29,49	22,40
0,1	39,85	33,28	34,85	32,09	32,54	31,58	33,30	28,83
0,2	48,95	39,37	42,72	38,29	39,98	37,64	39,30	34,94

Finalmente, na tabela 3.1.3 são apresentados os valores de dA e de dF para os sinais nos quais se tem a presença dos dois tipos de modulação. Nesta tabela pode-se observar um acréscimo nos valores em função do aumento do grau de modulação.

Tabela 3.1.3 – Valores de dA e dF para os sinais com modulação em amplitude e fase.

f_m	Harmônico 1		Harmônico 2		Harmônico 3		Harmônico 4	
	dA (dB)	dF (dB)						
0,05	51,29	27,84	47,06	26,63	45,09	25,93	41,11	21,99
0,1	56,96	35,13	52,62	33,52	50,82	32,40	47,07	28,93
0,2	62,43	43,79	58,27	41,58	56,44	40,19	53,04	36,13

Avaliação da presença de harmônicos adjacentes sobre o comportamento das demodulações.

Para avaliar a influência dos harmônicos adjacentes foi adotada uma caixa câmbio com duas marchas, conforme pode ser observado na figura 3.1.2. Foram consideradas duas situações: Primeiramente foram adotados como números de dentes das engrenagens $z_1 = 11$ e $z_2 = 21$.

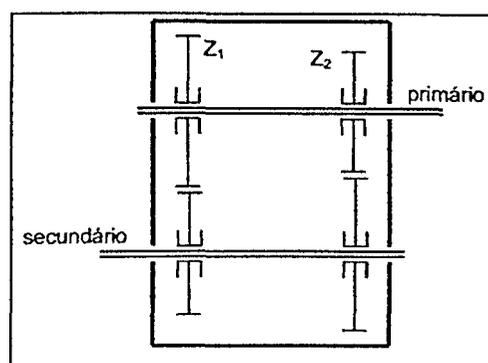


Figura 3.1.2 – Esquema da caixa de câmbio de duas marchas

Novamente foram consideradas quatro situações: sinais sem modulação, sinais com modulação em amplitude, sinais com modulação em fase e sinais com modulação em amplitude e fase. A frequência de rotação escolhida foi $f_R = 45$ Hz, o número de harmônicos, $M = 4$ e o número de pares de bandas laterais de modulação, $K = 2$.

Para as amplitudes das matrizes das funções de modulação A e B e dos harmônicos de engrenamento X , foram adotados os seguintes valores:

$$A = B = fm \begin{bmatrix} 2 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } X = [3,4 \quad 2,3 \quad 2,0 \quad 1,7 \quad 1,5 \quad 1,2]$$

Para cada caso gerou-se uma matriz com quarenta colunas, sendo que cada coluna representa um vetor formado por 8.192 pontos, amostrados com uma frequência de 23.040 Hz. A cada vetor foi adicionado um ruído aleatório de média zero, variância unitária e nível médio quadrático na faixa de 5% a 9,5% do nível do sinal original, sendo o sinal representativo do caso considerado obtido pela média dos quarenta sinais gerados.

Novamente, para analisar quantitativamente o efeito das modulações calculou-se a energia da diferença entre os vetores resultantes da demodulação aplicada ao sinal com modulação e sem modulação.

Nas tabelas 3.1.4 e 3.1.5 são apresentados os valores das energias das diferenças entre os vetores resultantes da demodulação para o sinal sem modulação e com modulação, para as duas frequências de engrenamento consideradas, com as seguintes características de modulação: modulação em amplitude, modulação em fase e modulação em amplitude e fase, sendo adotados os valores de $fm_1 = 0,08$ e $fm_2 = 0,04$, respectivamente, para os harmônicos da primeira e segunda frequência de engrenamento. Nestas tabelas cujos valores são expressos em decibéis, o valor de referência é de $1 \times 10^{-9} \text{ mm}^2$.

Em todas as tabelas a seguir, dA indica o nível médio quadrático da diferença entre os resultados da demodulação em amplitude para o sinal sem modulação e com modulação e dF indica o nível médio quadrático da diferença entre os resultados da demodulação em fase para o sinal sem modulação e com modulação. Os subíndices se referem ao tipo de modulação existente no sinal, sendo 'a' para modulação em amplitude, 'f' para modulação em fase e 'af' para modulação em amplitude e fase.

Tabela 3.1.4 – Energia da diferença entre os sinais ($fm_1 = 0,08$; $fm_2 = 0,04$; $f_{e1} = 495 \text{ Hz}$)

Energia (dB)	Harmônico I (495 Hz)	Harmônico II (990 Hz)	Harmônico III (1485 Hz)	Harmônico IV (1980 Hz)
dA_a	82,98	63,77	75,41	72,53
dF_a	14,53	22,88	17,63	26,86
dA_f	73,38	67,09	66,72	65,62
dF_f	34,69	43,60	29,37	35,27
dA_{af}	82,52	69,79	75,97	72,95
dF_{af}	36,96	44,40	29,52	34,77

Tabela 3.1.5 – Energia da diferença entre os sinais ($fm_1 = 0,08$; $fm_2 = 0,04$; $fe_2 = 945$ Hz)

Energia (dB)	Harmônico I (945 Hz)	Harmônico II (1890 Hz)	Harmônico III (2835 Hz)	Harmônico IV (3780 Hz)
dA _a	65,67	73,08	72,61	74,43
dF _a	30,78	21,45	11,49	0,00
dA _f	68,97	64,76	63,01	63,12
dF _f	36,54	33,72	22,11	24,07
dA _{af}	69,05	73,43	73,51	75,22
dF _{af}	35,16	33,90	21,96	22,70

Nas tabelas 3.1.6 a 3.1.7 são mostrados os valores de energia para a diferença entre os vetores obtidos para a demodulação aplicada ao sinal sem modulação e com modulação para as duas frequências de engrenamento consideradas, sendo as características de modulação definidas como: modulação em amplitude, modulação em fase e modulação em amplitude e fase. Neste caso os valores adotados são $fm_1 = 0,04$ e $fm_2 = 0,08$, respectivamente, para os harmônicos da primeira e segunda frequência de engrenamento. Nestas tabelas os valores são expressos em decibéis, sendo o valor de referência de $1 \times 10^{-9} \text{ mm}^2$.

Tabela 3.1.6 – Energia da diferença entre os sinais ($fm_1 = 0,04$; $fm_2 = 0,08$; $fe_1 = 495$ Hz)

Energia (dB)	Harmônico I (495 Hz)	Harmônico II (990 Hz)	Harmônico III (1485 Hz)	Harmônico IV (1980 Hz)
dA _a	79,96	64,23	73,39	73,72
dF _a	15,56	26,98	17,97	30,51
dA _f	72,33	72,86	66,21	71,67
dF _f	28,46	48,28	24,99	40,63
dA _{af}	79,51	72,76	74,16	74,85
dF _{af}	29,90	46,48	25,58	39,25

Tabela 3.1.7 – Energia da diferença entre os sinais para ($fm_1 = 0,04$; $fm_2 = 0,08$; $fe_2 = 945$ Hz).

Energia (dB)	Harmônico I (495 Hz)	Harmônico II (990 Hz)	Harmônico III (1485 Hz)	Harmônico IV (1980 Hz)
dA _a	67,20	75,61	76,74	78,36
dF _a	24,23	16,53	11,70	11,27
dA _f	63,54	60,71	61,87	64,71
dF _f	37,49	36,62	28,30	28,21
dA _{af}	67,71	75,50	77,14	78,46
dF _{af}	38,28	38,24	28,25	28,84

Continuando a avaliar a influência do efeito das frequências de engrenamento, em uma segunda etapa foram adotados números de dentes iguais a 21 e 25, resultando em frequências de engrenamento de 945 Hz e 1125 Hz, as quais não são próximas e nem resultam numa superposição de um de seus harmônicos com as bandas laterais de modulação do harmônico da outra frequência de engrenamento. Nas tabelas 3.1.8 e 3.1.9 são apresentados os valores

de energia para a diferença entre os vetores obtidos para a demodulação aplicada ao sinal sem modulação e com modulação para as frequências de engrenamento consideradas e com as características de modulação definidas como: modulação em amplitude, modulação em fase e modulação em amplitude e fase, sendo adotados os valores de $fm_1 = 0,08$ e $fm_2 = 0,04$, respectivamente, para os harmônicos da primeira e segunda frequência de engrenamento. Nestas tabelas os valores são expressos em decibéis, sendo o valor de referência de 1×10^{-9} mm².

Tabela 3.1.8 – Energia da diferença entre os sinais para ($fm_1 = 0,08$; $fm_2 = 0,04$; $fe_1 = 945$ Hz).

Energia (dB)	Harmônico I (945 Hz)	Harmônico II (1890 Hz)	Harmônico III (2835 Hz)	Harmônico IV (3780 Hz)
dA _a	80,41	81,41	77,85	78,38
dF _a	18,59	14,26	13,13	12,45
dA _f	68,73	66,96	66,56	64,69
dF _f	35,93	34,49	28,63	27,78
dA _{af}	79,82	81,18	77,74	78,18
dF _{af}	38,79	36,63	28,91	28,12

Tabela 3.1.9 – Energia da diferença entre os sinais para ($fm_1 = 0,08$; $fm_2 = 0,04$; $fe_2 = 1125$ Hz).

Energia (dB)	Harmônico I (1125 Hz)	Harmônico II (2250 Hz)	Harmônico III (3375 Hz)	Harmônico IV (4500 Hz)
dA _a	77,99	78,41	73,99	71,88
dF _a	23,63	16,74	13,28	11,30
dA _f	71,69	68,63	63,28	63,11
dF _f	30,17	28,41	22,15	22,42
dA _{af}	78,42	78,79	74,73	73,23
dF _{af}	31,45	28,68	21,56	22,27

Nas tabelas 3.1.10 e 3.1.11 são apresentados os valores das energias das diferenças entre os vetores resultantes da demodulação aplicada aos sinais com e sem modulação para as mesmas frequências anteriores, entretanto alternando-se os fatores de modulação, o que resulta em novos sinais com as seguintes características de modulação: modulação em amplitude, modulação em fase e modulação em amplitude e fase, sendo adotados os valores de $fm_1 = 0,08$ e $fm_2 = 0,04$, respectivamente, para os harmônicos da primeira e segunda frequência de engrenamento. Nestas tabelas os valores são expressos em decibéis, sendo o valor de referência de 1×10^{-9} mm².

Tabela 3.1.10 – Energia da diferença entre os sinais para ($fm_1 = 0,04$; $fm_2 = 0,08$; $fe_1 = 945$ Hz).

Energia (dB)	Harmônico I (945 Hz)	Harmônico II (1890 Hz)	Harmônico III (2835 Hz)	Harmônico IV (3780 Hz)
dA_a	77,83	77,34	73,22	74,20
dF_a	24,64	18,15	14,51	13,85
dA_f	72,34	68,18	65,75	65,25
dF_f	31,69	28,93	23,46	22,66
dA_{af}	77,98	77,32	74,41	75,43
dF_{af}	35,37	30,25	22,90	22,48

Tabela 3.1.11 – Energia da diferença entre os sinais para ($fm_1 = 0,04$; $fm_2 = 0,08$; $fe_2 = 1125$ Hz).

Energia (dB)	Harmônico I (1125 Hz)	Harmônico II (2250 Hz)	Harmônico III (3375 Hz)	Harmônico IV (4500 Hz)
dA_a	80,27	82,08	78,46	76,68
dF_a	17,52	12,60	10,53	9,54
dA_f	68,02	66,12	61,10	62,25
dF_f	34,15	34,05	28,44	28,01
dA_{af}	80,07	81,75	78,87	76,69
dF_{af}	35,97	35,83	28,61	28,20

Em todas as tabelas pode-se observar que a técnica de demodulação permite determinar o tipo de modulação existente em cada sinal, e até mesmo quando existe a presença simultânea dos dois tipos de modulação.

Visando facilitar a análise, os valores de dA_a e dF_f das tabelas 3.1.3 a 3.1.11 são representados nas figuras 3.1.3 a 3.1.6, onde nos gráficos superiores e inferiores são mostradas respectivamente a energia da diferença entre os vetores demodulados dos sinais com modulação em amplitude e com modulação em fase, em relação ao sinal sem modulação.

Nas figuras 3.1.3 e 3.1.4 as demodulações foram realizadas respectivamente, com as freqüências de engrenamento de 495 Hz e 945 Hz.

Observa-se nestas figuras que nem sempre o maior valor de energia corresponde ao maior valor do fator de modulação fm . Os números de dentes, apesar de não serem próximos, acabam por resultar em harmônicos com freqüências coincidentes com a da banda lateral de modulação associada ao outro par engrenado, como ocorre com o primeiro e segundo harmônicos da freqüência de engrenamento de 945 Hz em relação ao segundo e terceiro harmônicos da freqüência de 495 Hz. Talvez isto justifique uma maior energia para o menor fator de modulação em relação àquela obtida para o maior fator de modulação. Como pode ser visto para o segundo harmônico da freqüência de 495 Hz, no gráfico inferior da figura 3.1.3.

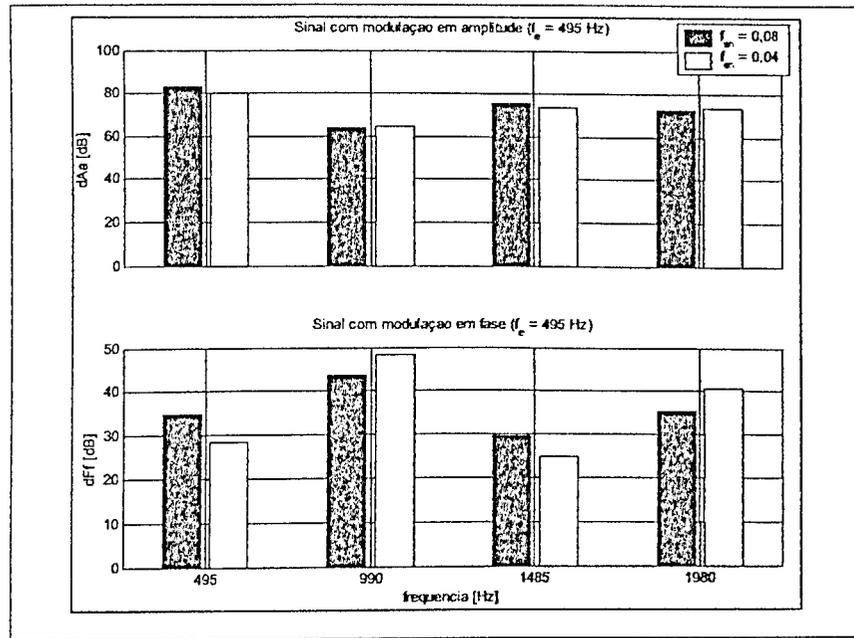


Figura 3.1.3 – Energia da diferença entre os sinais com e sem modulação ($f_{m1} = 0,08$; $f_{m2} = 0,04$; $f_{e1} = 495$ Hz)

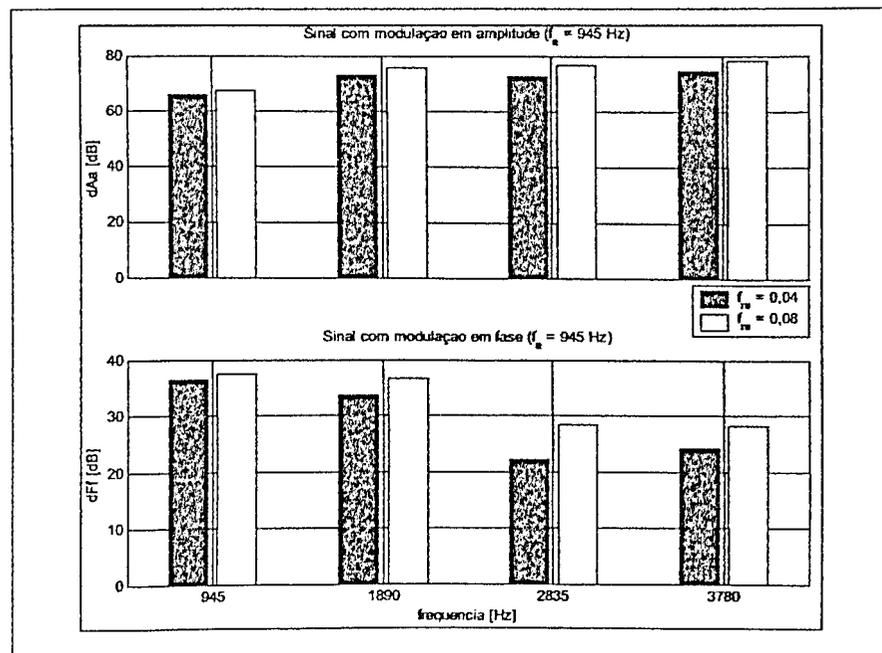


Figura 3.1.4 – Energia da diferença entre os sinais com e sem modulação ($f_{m1} = 0,04$; $f_{m2} = 0,08$; $f_{e1} = 945$ Hz)

Nas figuras 3.1.5 e 3.1.6 pode-se observar a energia da diferença entre os sinais que possuem somente modulação em amplitude ou modulação em fase, em relação ao sinal sem modulação, para as frequências de engrenamento de 945 Hz e 1125 Hz.

Nestas figuras os gráficos mostram que o comportamento da energia para a modulação em amplitude e a modulação em fase é perfeitamente compatível com o esperado, apesar da

proximidade do número de dentes ($z_1 = 21$ e $z_2 = 25$). Todavia, neste caso, as frequências de engrenamento geradas não apresentam harmônicos sobrepostos às bandas laterais de modulação.

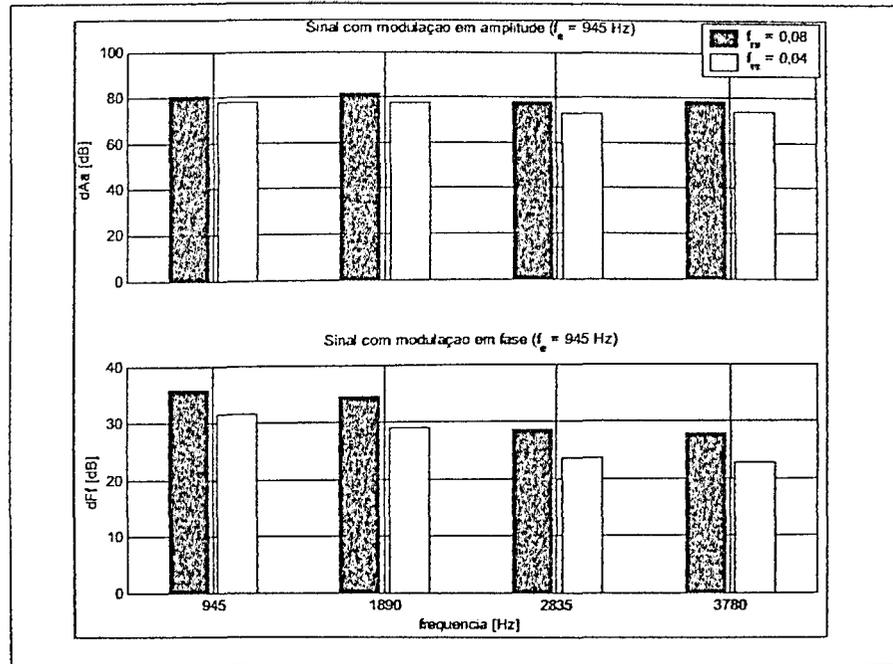


Figura 3.1.5 – Energia da diferença entre os sinais com e sem modulação ($f_{m1} = 0,08$; $f_{m2} = 0,04$; $f_{e1} = 945$ Hz)

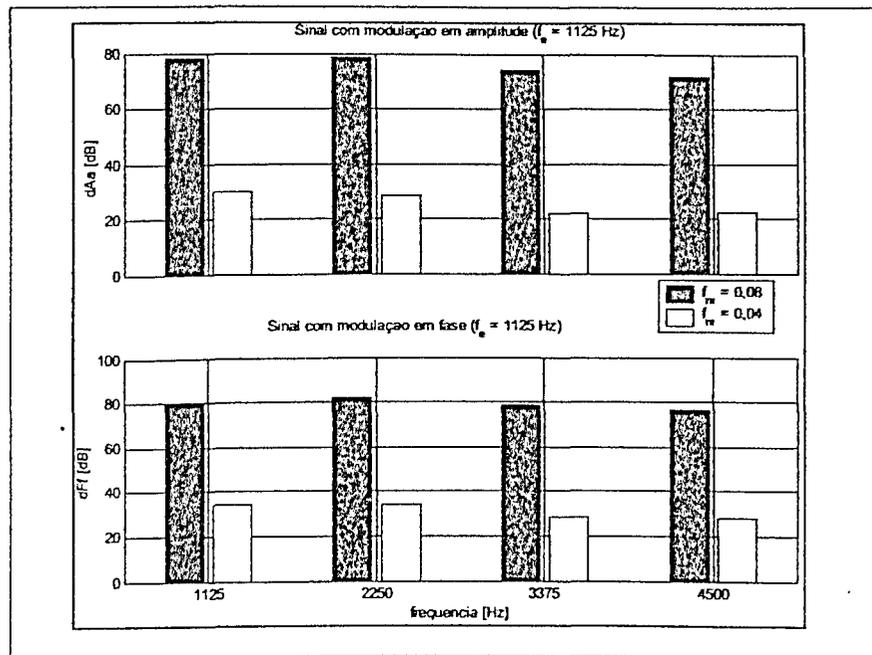


Figura 3.1.6 – Energia da diferença entre os sinais com e sem modulação ($f_{m1} = 0,04$; $f_{m2} = 0,08$; $f_{e1} = 1125$ Hz)

3.1.4 - Conclusões

Desta análise preliminar, conclui-se que a técnica de demodulação em amplitude e fase aplicada aos sinais de engrenamento pode ser uma ferramenta útil para a avaliação do comportamento de caixas de transmissão. Contudo deve ser tomado cuidado no emprego desta metodologia devido à influência das bandas laterais de modulação sobrepostas às frequências de engrenamento, o que faz com que a magnitude da energia da diferença entre as demodulações não seja proporcional à modulação existente no sinal.

3.2 Decomposição de sinais de engrenamento via Transformada Stockwell Generalizada

As modulações existentes nos sinais de vibração dos engrenamentos manifestam-se no espectro de frequência como bandas laterais distanciadas das frequências de engrenamento e seus múltiplos pela frequência de rotação do eixo, indicam desvios da condição ideal do par engrenado quanto ao aspecto geométrico. No caso de engrenagens recém fabricadas os problemas que por ventura possam surgir apresentam característica distribuída, como por exemplo os defeitos devido à geração e tratamento térmico das engrenagens e ainda de desvios de forma dos eixos ou furos da caixa de transmissão, já que os defeitos de natureza localizada e de caráter impulsivo, como os decorrentes de trincas devido à fadiga ou aqueles resultantes de uma quebra de parte do dente só ocorrerão com o uso (Staszewki e Tomlinson, 1994).

Componentes impulsivos podem ser detectados usando análise cepstral (Menegatti e Duarte, 1999; Braun, 1986; El Badaoui et alli., 2001), procedimentos de demodulação (Boulahebal et alli., 1999; Ma e Li, 1996; McFadden, 1986; Brie et alli. 1997), análise de forma de onda (Amabili e Fregolent, 1998; Randall, 1982) ou medição dos erros de transmissão (Wang e McFadden, 1995b). A maioria destes métodos prescinde da realização de um procedimento de média no domínio do tempo (Braun, 1986; McFadden, 1987), a fim de melhorar a relação sinal-ruído e remover componentes não desejados do sinal. Esta operação requer a definição exata da frequência de rotação ou um sinal de referência. No caso deste trabalho, isto é impossível de ser obtido, devido à forma como é realizado o ensaio, sem carga na saída da caixa de transmissão, o que gera flutuações tanto na amplitude quanto na frequência do ensaio.

Procedimentos de decomposição que permitem extrair informações desejáveis a respeito de um sinal têm sido utilizados em vários campos tais como: análise de fala, de imagem e de vibrações mecânicas (Jaggi et alli., 1998; Léopore Neto et alli., 1999).

Em 1993, Mallat e Zhang introduziram um algoritmo, denominado *Matching Pursuits*, que decompõe qualquer sinal em uma expansão linear de formas de ondas selecionadas a partir de um dicionário redundante. As formas de onda são escolhidas a fim de que se igualem da melhor maneira possível às estruturas do sinal. *Matching Pursuits* são procedimentos gerais para calcular representações adaptativas de um sinal com um dicionário de funções de Gabor (Mallat e Zhang, 1993) que em associação com um procedimento de busca da função que melhor se ajusta à uma determinada estrutura do sinal, acaba por definir uma transformada tempo-frequência adaptativa. Uma vantagem desta metodologia consiste em se determinar uma distribuição de energia no plano tempo-frequência, que não inclui termos de interferência

também chamados termos cruzados (Guimarães, 2000), como ocorre nas distribuições das classes de Cohen e Wigner (Cohen, 1995; Qian e Chen, 1996).

Liu e Ling (1999) desenvolveram um procedimento de decomposição, onde ao invés de se buscar o melhor ajuste, utiliza-se uma medida de informação mútua para determinar um dicionário redundante de *wavelets* pertencentes a um pequeno conjunto que carrega informações significativas a respeito das falhas de um sistema mecânico. Deste modo, estas *wavelets* se transformam em extratores de características, facilitando o diagnóstico de falhas.

3.2.1 – Transformadas bidimensionais

Em muitos casos, a caracterização de um sinal simultaneamente no domínio bidimensional tempo-freqüência ou tempo-escala, permite diagnosticar com melhor clareza defeitos em seu estágio inicial (Wang e McFadden, 1995, Liu e Ling, 1999). Para isto existe uma grande variedade de técnicas tempo-freqüência tais como: espectrograma de Gabor (Newland, 1994a), Distribuição de Wigner-Ville (Cohen, 1995; Choi et alli., 1996), e transformadas Wavelets, que permitem a localização no tempo e na freqüência das variações da amplitude da vibração que acompanha o desenvolvimento de uma falha (Liu e Ling et alli., 1997; Dalpiaz e Rivola, 1997), contudo em alguns casos, para uma perfeita caracterização das mudanças no sinal de vibração é desejável a obtenção da fase local. Esta informação não pode ser obtida diretamente por meio das transformadas anteriormente citadas, contudo pode ser determinada empregando-se a Transformada Stockwell ou Transformada S (Stockwell e Mansinha, 1996), que é uma variante da Transformada *wavelet*

Para melhor compreensão é interessante neste ponto comentar rapidamente aspectos da transformada *wavelet* que juntamente com a transformada de Gabor, serviu como ponto de partida para a definição da transformada S.

3.2.2 – Transformada *wavelet*

A transformada *wavelet* de um sinal $x(t)$ pode ser definida no domínio tempo-freqüência (Newland, 1993) como,

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) q^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3.2.1)$$

Onde a e b são os parâmetros de dilatação e a translação, respectivamente, do núcleo $q(t)$ e $*$ indica seu complexo conjugado. A translação b determina a posição no tempo e a dilatação a

determina a largura ou escala do núcleo. O núcleo ou *wavelet*-mãe pode assumir diversas funções desde que sejam obedecias algumas condições (Teolis, 1998), dentre as quais podemos citar a necessidade de ser uma função finita. Será considerada neste caso neste caso uma função harmônica de frequência angular unitária multiplicada por uma função janela Gaussiana

$$q(t) = \frac{\mu}{\sqrt{\pi}} \exp(-\mu^2 t^2) \exp(j2\pi ft) \quad (3.2.2)$$

onde o parâmetro μ é uma constante, conhecida como parâmetro da janela ou fator de ponderação. Escrevendo a equação (3.2.1) no domínio da frequência,

$$W(a,b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{\infty} X(f) Q^*(af) \exp(j2\pi fb) df = \sqrt{a} \mathcal{F}^{-1}(X(f) Q^*(af)) \quad (3.2.3)$$

Onde $X(f)$ e $Q(f)$ são respectivamente as transformadas de Fourier de $x(t)$ e $q(t)$.

A figura 3.2.1 ilustra o cálculo da transformada wavelet, a linha superior mostra, à esquerda, o sinal de entrada $x(t)$ e à direita a amplitude de sua transformada de Fourier $X(f)$. A Segunda linha à direita mostra $Q^*(af)$, que pode ser gerado para qualquer escala a e qualquer fator de ponderação μ . Nota-se que o valor máximo de $Q^*(af)$ ocorre para a frequência $f = 1/a$. A largura da função varia com $f = 1/a$. A terceira linha do lado direito mostra o produto $X(f)Q^*(f)$, representando a filtragem em banda do sinal de entrada. Finalmente, a terceira linha do lado esquerdo é obtida tomando-se a amplitude da transformada inversa de Fourier do sinal filtrado.

A fase do sinal filtrado pode ser calculada, mas devido à frequência de centro do filtro ocorrer em $1/a$, a transformada inversa de Fourier deste sinal se constitui em um vetor harmônico com frequência $1/a$, o que faz com que sua fase varie rapidamente (McFadden et alli, 1999)

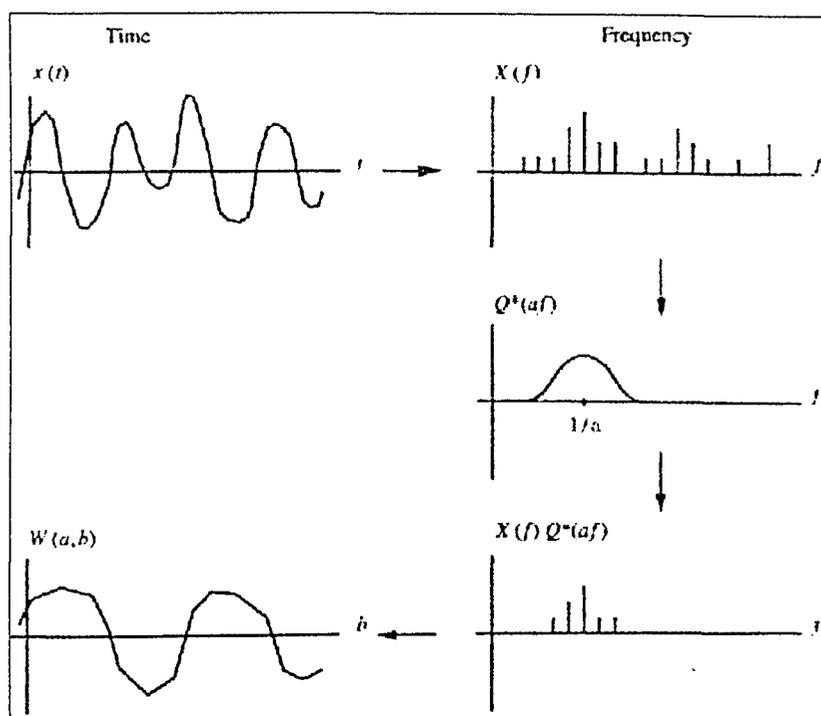


Figura 3.2.1 – Representação gráfica para o cálculo da transformada *wavelet*

3.2.3 A transformada S

A transformada S de um sinal $x(t)$, proposta por Stockwell (Stockwell et alli., 1996) é definida como

$$S(f,t) = \int x(\tau)q(\tau - t)\exp(-j2\pi ft)d\tau \quad (3.2.4)$$

onde

$$q(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.2.5)$$

e

$$\sigma(f) = \frac{1}{|f|} \quad (3.2.6)$$

A combinação das equações (3.2.4), (3.2.5) e (3.2.6) resulta em:

$$S(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}\right) \exp(-j2\pi f t) d\tau \quad (3.2.7)$$

Da equação (3.2.7) pode-se ver que a transformada S é semelhante a transformada *wavelet* definida pela equação (3.2.1) e (3.2.2), exceto pela substituição de f por $1/a$, um fator de escala de $|f|$ ao invés de $1/\sqrt{a}$ e a ausência de qualquer parâmetro para ajustar a função núcleo e portanto a resolução. Escrevendo a equação (3.2.7) como uma convolução e re-arranjando

$$S(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(v+f) Q(v) \exp(j2\pi v t) dv = \mathcal{F}^{-1}(X(v+f) Q(v)) \quad (3.2.8)$$

onde $Q(v)$ é a transformada de $q(t)$ dada por

$$Q(v) = \exp\left(-\left(\frac{\sqrt{2\pi}}{f} v\right)^2\right) \quad (3.2.9)$$

Da equação (3.2.8) vê-se que é necessário calcular a transformada de Fourier do sinal de entrada, $x(t)$, apenas uma vez. Para cada valor de frequência f o espectro $X(v)$ pode ser deslocado na direção negativa do eixo de frequências do valor de f . A função $Q(v)$ pode ser calculada e a distribuição S calculada usando a transformada inversa de Fourier, resultando na avaliação de $S(f, t)$ para o tempo t e a frequência f .

A figura 3.2.2 ilustra as etapas existentes para o cálculo da transformada S . O quadro superior mostra o sinal a ser transformado, $x(t)$, à esquerda e sua transformada de Fourier, $X(v)$ à direita. A segunda linha do lado direito mostra o sinal $X(v)$ deslocado de f para a esquerda resultando $X(v+f)$. A terceira linha do lado direito mostra $Q(v)$, que pode ser gerado para qualquer frequência dada segundo a equação (3.2.9). Neste caso, a largura da função varia com f . Observa-se que o valor máximo de $Q(v)$ ocorre para a frequência $v = 0$. Na quarta linha, à direita, é mostrado o produto $X(v+f)Q(v)$, que representa a filtragem em banda do sinal de entrada defasado. Finalmente, nesta mesma linha à esquerda temos a representação da amplitude da transformada inversa de Fourier do sinal filtrado.

A fase calculada não sofre variação em relação ao sinal original devido a freqüência de centro da função $Q(\nu)$ ocorrer para $\nu = 0$, fazendo com que a transformada inversa de Fourier do sinal filtrado não seja rotativa.

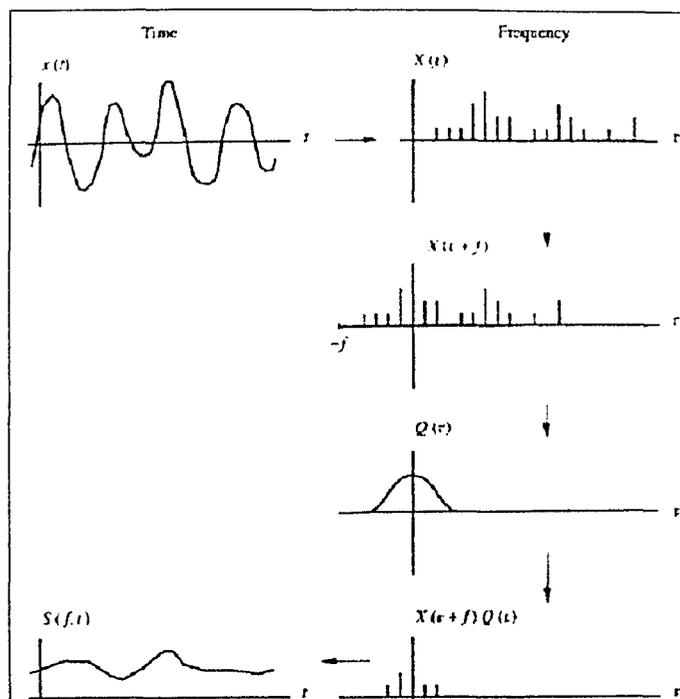


Figura 3.2.2 - Representação gráfica para o cálculo da transformada Stockwell

3.2.4 A transformada S generalizada

Na definição original da transformada Stockwell existem três considerações a respeito da função janela utilizada. Primeiramente, considera-se somente uma janela do tipo Gaussiana. Em segundo lugar, na definição desta janela não há um parâmetro que possibilite o ajuste de sua largura no domínio do tempo ou da freqüência. Finalmente, a função janela é utilizada diretamente nas equações (3.2.4) e (3.2.8) ao invés da forma complexa conjugada da função janela, como na transformada *wavelet* dada pelas equações (3.2.1) e (3.2.3).

Existem situações, em determinados casos práticos, que é desejável a utilização de outras formas de função janela que permitam ainda variações em sua largura. Para a função Gaussiana simples que é simétrica em relação à origem do eixo de tempo $Q(f)$ é real, logo $Q(f) = Q^*(f)$. Caso isto não ocorra, a fase de $Q(f)$ será o oposto da fase de $Q^*(f)$ e com uma janela deste tipo, a transformada S original conduziria a estimativas incorretas da fase do sinal.

Para contornar estas restrições, McFadden et alli. (1999) introduziram a transformada S generalizada com janelas de largura variável como encontrado na transformada *wavelet*, que aplicada a um sinal $x(t)$ é definida no domínio do tempo segundo a equação (3.2.10).

$$S(f, t) = |f| \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) q^*(f(\tau - t)) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (3.2.10)$$

e no domínio da frequência como

$$S(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\nu + f) Q^*\left(\frac{\nu}{f}\right) \exp(j2\pi\nu t) d\nu = \mathcal{F}^{-1}\left(X(\nu + f) Q^*\left(\frac{\nu}{f}\right)\right) \quad (3.2.11)$$

Para janelas de largura fixa, como ocorre com a transformada Gabor, as equações (3.2.10) e (3.2.11) podem ser simplificadas resultando na equação (3.2.12), no domínio do tempo

$$S(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) q^*(\tau - t) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (3.2.12)$$

e (3.2.13), no domínio da frequência

$$S(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\nu + f) Q^*(\nu) \exp(j2\pi\nu t) d\nu = \mathcal{F}^{-1}(X(\nu + f) Q^*(\nu)) \quad (3.2.13)$$

A característica principal da transformada S generalizada que torna possível calcular a fase instantânea encontra-se nas operações de deslocamento do sinal no domínio da frequência, indo de $X(\nu)$ para $X(\nu + f)$, antes da realização da filtragem em banda por $Q^*(\nu/f)$ ou, $Q^*(\nu)$ como definido nas equações (3.2.11) e (3.2.13).

A transformada S foi originalmente definida para janelas do mesmo tipo das utilizadas na transformada *wavelet* (Stockwell et alli., 1996). Contudo, para a decomposição de sinais de engrenamento, a largura da janela da transformada S varia automaticamente buscando encontrar o melhor ajuste para cada componente do sinal. Logo, é necessário considerar apenas a formulação da transformada para janelas de largura fixa. Para funções menos complexas, o cálculo de $Q(f)$ pode ser obtido analiticamente, ou em casos mais difíceis pode-se calcular a transformada de Fourier a partir de $q(t)$. Na forma discreta, se $q(n)$ é uma função janela que possui amplitude unitária, então a função $Q^*(n)$ pode ser determinada por:

$$Q^*(n) = \frac{\mathcal{F}^*(q(n))}{\sum_n |q(n)|^2} \quad (3.2.14)$$

A soma no denominador determina a energia da função janela, e serve para normalizar a função $Q^*(n)$. Esta abordagem pode ser utilizada mesmo quando a janela não for descrita por uma função, mas sim por uma série de amostras obtidas experimentalmente ou por simulação numérica.

3.2.5 - Considerações sobre as funções janelas.

Para efeito de decomposição, as janelas devem ser escolhidas de acordo com o tipo de estrutura característica que se deseja capturar de um sinal, nisto reside a grande vantagem da transformada Stockwell em relação à transformada *wavelet* e de Gabor. Quando se deseja determinar ocorrências impulsivas é interessante o emprego de uma função finita (Teolis, 1998), como as funções: Gaussiana, exponencial ou uma combinação das duas.

A função Gaussiana (Staszewki e Tomlinson, 1994) é uma função janela simples e bastante utilizada sendo definida pela equação (3.2.15)

$$q(t) = \exp(-(\mu_1 t)^2) \quad (3.2.15)$$

onde μ_1 é o parâmetro da janela ou fator de ponderação. Um aumento deste fator acarreta em um estreitamento da janela, $q(t)$, no domínio do tempo, mas implica em uma janela, $Q(f)$, de banda mais larga no domínio da frequência. Outra função que pode ser utilizada como janela para retirada de fenômenos impulsivos é a função exponencial definida pela equação (3.2.16)

$$q(t) = \begin{cases} \exp(-\mu_1 t), & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (3.2.16)$$

onde μ_1 é o parâmetro da função janela.

Para demodular sinais de engrenamento com modulações tanto em fase quanto em amplitude, pode ser utilizada uma janela que representa uma modulação em fase ou amplitude. Uma janela com modulação em amplitude representada por uma onda cosenoidal, pode ser definida pela equação (3.2.17)

$$q(t) = 1 + \mu_1 \cos(2\pi\mu_2 t) \quad (3.2.17)$$

onde μ_1 é o grau de modulação tal que $0 \leq \mu_1 \leq 1$ e μ_2 é a frequência de modulação, devendo ser um valor inteiro. Para o caso de engrenamento podemos escrever

$$q(t) = 1 + \mu_1 \sum_{i=1}^{nb} \cos(2\pi\mu_i f_r t) \quad (3.2.18)$$

Sendo nb o número de bandas laterais consideradas e f_r a frequência de rotação do eixo.

Uma janela com modulação em fase obtida por uma onda cosenoidal pode ser definida pela equação (3.2.19).

$$q(t) = \exp(j\mu_1 \cos(2\pi\mu_2 t)) \quad (3.2.19)$$

onde μ_1 é o grau de modulação e μ_2 é a frequência de modulação, devendo este ser um valor inteiro. Novamente, para o caso de engrenamento podemos escrever:

$$q(t) = \exp(j\mu_1 \sum_{i=1}^{nb} \cos(2\pi\mu_i f_r t)) \quad (3.2.20)$$

Neste caso a função janela é complexa, embora a amplitude permaneça constante e unitária.

3.2.6 - Implementação para o Cálculo da Transformada S

O procedimento para obtenção da transformada S de um sinal é bastante simples sendo os passos descritos a seguir.

- a) Calcular a transformada de Fourier do sinal usando FFT;
- b) Obter o espectro do sinal analítico, igualando as amplitudes das frequências negativas a zero e duplicando a amplitude das frequências positivas;
- c) Calcular a transformada de Fourier da função janela com os parâmetros μ_1 e μ_2 selecionados, para a frequência desejada f ;
- d) Deslocar o espectro do sinal analítico na direção negativa da frequência de um valor igual a f .

- e) Multiplicar o espectro deslocado pelo complexo conjugado da transformada de Fourier da função janela;
- f) Calcular a transformada inversa de Fourier (IFFT) do produto anterior;
- g) Calcular a amplitude e fase do sinal complexo resultante;
- h) Repetir os passos (c) a (g) para os diferentes valores de frequência até obter a distribuição completa.

3.2.7 - O procedimento de Decomposição

Antes de apresentar a implementação do procedimento de decomposição é oportuno sejam feitas algumas considerações a respeito das situações que podem ocorrer com a energia do sinal ao se retirar um componente. Isto é importante, pois esta metodologia fundamenta-se no controle da energia para avaliar o ajuste realizado e a qualidade da decomposição.

Seja um sinal $x(t)$ composto por um conjunto finito de componentes não correlacionados e com média zero $x_i(t)$

$$x(t) = x_1(t) + \dots + x_n(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t) \quad (3.2.21)$$

A energia total, E_x , deste sinal é dada por

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\sum_{i=1}^n x_i(t) \right)^2 dt \quad (3.2.22)$$

Sendo os componentes não correlacionados e com média nula, todos os produtos cruzados serão nulos. Logo, a energia total do sinal pode ser obtida pela soma da energia de cada componente presente. Se um componente $x_i(t)$ é removido a partir de um ajuste perfeito, então a energia removida será E_i e a quantidade de energia presente no sinal passará a ser:

$$E_{2\dots n} = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\sum_{i=2}^n x_i(t) \right)^2 dt \quad (3.2.23)$$

A soma das energias do componente removido e do sinal restante será igual à energia total do sinal original, logo:

$$E_{tot} = E_1 + E_{2\dots n} = E_x \quad (3.2.24)$$

Em alguns casos, o sinal removido $y(t)$ não é obtido segundo um ajuste perfeito de um dos componentes presentes no sinal original. Para avaliar os efeitos deste tipo de erro serão consideradas três situações diferentes.

A energia total, após a retirada do componente $y(t)$, removido por meio de um ajuste imperfeito pode ser representada pela equação (3.2.25)

$$E_{tot} = \int_{-\infty}^{\infty} y^2(t) dt + \int_{-\infty}^{\infty} (x(t) - y(t))^2 dt \quad (3.2.25)$$

que depois do desenvolvimento do termo entre parêntesis da segunda integral resulta na equação (3.2.26)

$$E_{tot} = 2E_y + E_x - 2 \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t) dt \quad (3.2.26)$$

Admitindo que $y(t)$ tenha média nula e que não seja correlacionado com qualquer componente $x_i(t)$, todos os produtos cruzados na equação (3.2.26) serão nulos, resultando na equação (3.2.27).

$$E_{tot} = 2E_y + E_x \quad (3.2.27)$$

Mostrando que haverá um aumento da energia total igual ao dobro da energia do componente retirado incorretamente.

Se $y(t)$ for relacionado com alguma estrutura de $x(t)$, a imperfeição no ajuste poderá ser considerada como componente de erro aditivo não correlacionado com qualquer componente $x_i(t)$

$$y(t) = x_i(t) + \varepsilon(t) \quad (3.2.28)$$

Conduzindo a uma energia total dada pela equação (3.2.29)

$$E_{tot} = 2E_\varepsilon + E_x \quad (3.2.29)$$

Resultando em um aumento da energia total igual ao dobro da magnitude da energia contida no componente de erro.

Outro erro possível ocorre quando o ajuste é parcialmente adequado apresentando um erro de amplitude. Neste caso, o sinal $y(t)$ é inteiramente correlacionado e proporcional a alguma parcela presente no sinal total, ou seja: $y(t) = Ax_i(t)$, onde A é um fator de proporcionalidade entre a amplitude real e a determinada incorretamente. Logo a equação (3.2.25) pode ser escrita como:

$$E_{tot} = \int_{-\infty}^{\infty} (Ax_i(t))^2 dt + \int_{-\infty}^{\infty} (x(t) - Ax_i(t))^2 dt \quad (3.2.30)$$

que resulta na equação (3.2.31) depois de solucionadas as integrais,

$$E_{tot} = 2(A^2 - A)E_i + E_x \quad (3.2.31)$$

Neste caso o comportamento da energia total depende do valor da amplitude do sinal removido. Se a amplitude do sinal removido for maior do que o valor real, $A > 1$, ocorrerá um aumento na energia total. Nos casos em que $A < 1$, ou seja, a amplitude do sinal removido for menor que a amplitude do componente do sinal original, ocorrerá uma redução na energia total.

Entretanto, o que mais acontece em procedimentos de decomposição é um erro associado aos componentes não-lineares do modelo, como a frequência ou a fase, ou ainda erros devido à forma, resultante da escolha imprópria do modelo a ser ajustado. Outro fator que contribui para este tipo de erro é a interferência ou sobreposição entre componentes do sinal, implicando em dificuldade para se estimar adequadamente os parâmetros. Isto pode ser descrito como a combinação das equações (3.2.31) e (3.2.29)

$$y(t) = Ax_i(t) + \varepsilon(t) \quad (3.2.32)$$

que após a retirada do termo ajustado, implica em uma energia total dada pela equação (3.2.33)

$$E_{tot} = E_x + 2(A^2 - A)E_i + 2E_\varepsilon \quad (3.2.33)$$

Onde, novamente o aumento ou redução da energia total dependerá do valor de A .

Do exposto acima, conclui-se que o monitoramento da energia do sinal total é uma boa opção para avaliar o desempenho do procedimento de decomposição. Devido à inexistência de

uma não-correlação perfeita entre os componentes do sinal $x(t)$ com o sinal $y(t)$, ocorrerão pequenas flutuações no valor da energia total. Segundo Stockwell et alli. (1999), para sinais com número de pontos superior a 1024, estas diferenças são de magnitude bem inferior à energia retirada de um ajuste correto.

Implementação do procedimento de decomposição

O procedimento para decomposição de um sinal usando a transformada S generalizada pode ser implementado da seguinte forma:

- a) Calcular a energia total do sinal.
- b) Selecionar uma função janela a partir de um conjunto de janelas disponíveis.
- c) Selecionar o(s) parâmetro(s) da função janela.
- d) Calcular a distribuição tempo-freqüência para esta condição.
- e) Localizar a amplitude máxima da distribuição tempo-freqüência, encontrar a freqüência e o tempo no qual esta ocorre e então calcular a fase instantânea.
- f) Com o(s) parâmetro(s) utilizado na etapa anterior e com a amplitude, freqüência e fase determinados no item anterior, sintetizar um componente.
- g) Subtrair o componente sintetizado do sinal original.
- h) Adicionar a energia de todos os componentes sintetizados à energia do sinal residual. Neste ponto, para avaliar a qualidade da decomposição, deve-se verificar a variação da energia total em relação à energia do sinal original calculada na etapa (a).
- i) Repetir os passos (c) a (h) para uma faixa de parâmetros da janela considerada até encontrar o conjunto de parâmetros ou parâmetro que minimizem a energia do sinal residual.
- j) Repetir os passos (b) a (i) para cada função janela diferente, escolhendo a função que minimiza a energia do sinal residual.
- k) Repetir os passos (b) a (j) até que o sinal remanescente contenha uma energia inferior a um limite previamente estabelecido ou por um número de decomposições definido.

Para a estimativa dos parâmetros da janela aconselha-se a adoção de um algoritmo de otimização não determinístico. Neste trabalho foi utilizado um Algoritmo Genético (Michalewics, 1996; Saramago et alli., 1996).

Para os sinais de engrenamento cada decomposição foi efetuada em torno das freqüências de engrenamento visando uma redução do tempo computacional, ao invés de se considerar toda a banda de freqüência. Para o caso em estudo, onde se busca analisar o

comportamento das bandas laterais, serão considerados apenas componentes devido à modulação, não havendo necessidade da utilização de janelas que filtrariam características impulsivas, implicando numa redução do número de ajustes.

3.2.8 - Simulações numéricas para avaliação da metodologia.

Novamente, adota-se o modelo de engrenamento proposto no item anterior descrito pela equação (3.1.2), que para maior facilidade é novamente apresentado.

$$x(t) = [1 + a_m(t)] \sum_{m=1}^M X_m \cos[2\pi m f_e t + \phi_m + b_m(t)] + e(t) \quad (3.2.34)$$

Para avaliar a capacidade de mensurar o grau de modulação e determinar qual par engrenado apresenta a maior modulação foram consideradas quatro marchas diferentes, sendo o número de dentes de cada uma os seguintes: $z_1 = 11$, $z_2 = 21$, $z_3 = 25$ e $z_4 = 32$. Como numa caixa de transmissão automotiva, considerou-se também que todas as marchas permanecem engrenadas, mesmo que somente uma esteja transmitindo esforço, o que implica dizer que as frequências de engrenamento e harmônicos dos pares não engrenados também estarão presentes no espectro de frequência do sinal.

Nestas simulações foram consideradas variações de amplitude da ordem de 20%. Para contornar este inconveniente foi realizado um pré-processamento dos dados através de um escalonamento linear das variáveis, onde cada ponto do sinal foi tratado como uma variável independente, e para cada variável x_i foi calculada sua média \bar{x}_i e sua variância σ_i^2 em relação ao conjunto de sinais utilizados, como mostram as equações (3.2.35) e (3.2.36),

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_i^n \quad (3.2.35)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_i^n - \bar{x}_i)^2 \quad (3.2.36)$$

Onde $n = 1, \dots, N$ é o número de vetores que representam os sinais de engrenamento.

O novo conjunto de sinais escalonados que apresenta média zero e desvio padrão unitário é definido segundo a equação (3.2.37)

$$\tilde{x}_i^n = \frac{x_i^n - \bar{x}_i}{\sigma_i} \quad (3.2.37)$$

Para cada marcha foram criados três sinais diferentes, nos quais se variou a amplitude das frequências de engrenamento com um fator de amplitude $-fa$, dentro da faixa de 0% a 20% e um fator de modulação $-fm$, variando de 2% a 10%. Nestes casos, foi considerada apenas modulação em amplitude. Foram adotados dois harmônicos para cada frequência de engrenamento e três bandas laterais por harmônico. A frequência de rotação do eixo é $fr = 20$ Hz, sendo o sinal amostrado com uma frequência de 5120 Hz.

As tabelas (3.2.1) a (3.2.6) mostram: os valores estimados da amplitude, do ângulo de fase e da frequência para cada componente decomposto, os parâmetros otimizados das janelas com modulação em amplitude utilizadas em cada etapa e ainda as porcentagens de energia de cada componente sintetizado e do resíduo, bem como da energia total depois de efetuado cada ajuste.

Na tabela (3.2.1) são apresentados os resultados obtidos para um sinal com frequência de engrenamento de 640 Hz, que equivale à quarta marcha para o modelo adotado, com amplitude de modulação de 10% e fator de proporcionalidade para variação da amplitude de 2%. Primeiramente, o sinal decomposto foi pré-processado visando apenas uma redução na variação de amplitude em relação aos outros sinais pertencentes ao grupo da quarta marcha.

Tabela 3.2.1 – Valores obtidos após ajuste para o sinal da quarta marcha (sem tratamento)

Parâmetros das parcelas decompostas			Parâmetros das janelas		Energia (%)		
Amplitude (mm)	Fase (rad)	Frequência (Hz)	μ_1 (%)	μ_2	residual	sintetizada	total
0,6	0,276	220,0	1,05	20	82	18	100
0,477	0,580	440,0	63,24	20	64	18	100
0,450	0,504	420,0	0	20	54	10	100
0,366	1,035	840,0	0,93	20	47	7	100
0,451	0,636	500,0	0	20	37	10	100
0,367	1,231	1000,0	1,22	20	30	7	100
0,601	0,794	640,0	10,65	20	12	18	100
0,366	1,584	1280,0	10,94	20	5	7	100

Nas figuras 3.2.3.a e 3.2.3.b são mostrados o sinal original e o resíduo após o ajuste obtido, respectivamente no domínio do tempo e da frequência.

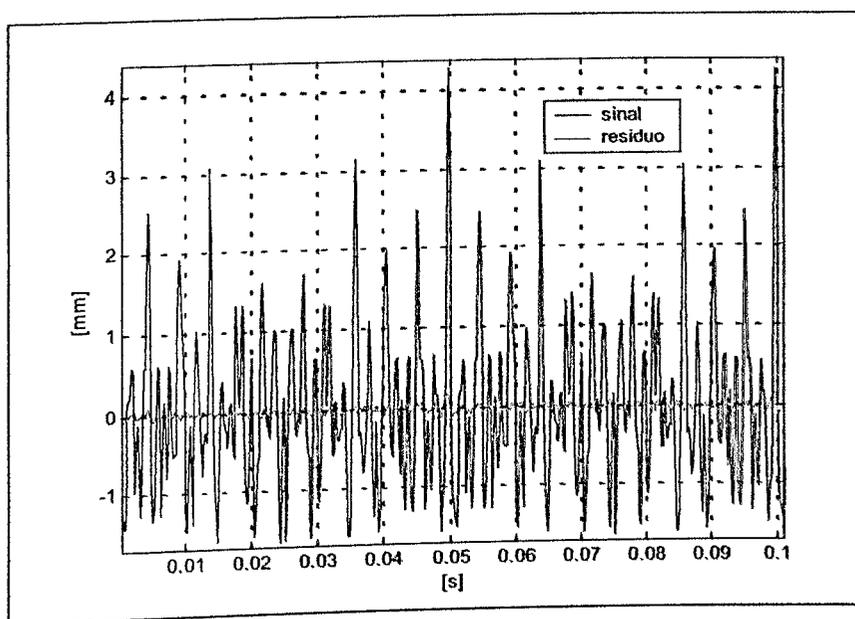


Figura 3.2.3.a – Sinal original *versus* resíduo – domínio do tempo (marcha IV, $f_m = 10\%$; $f_a = 2\%$)

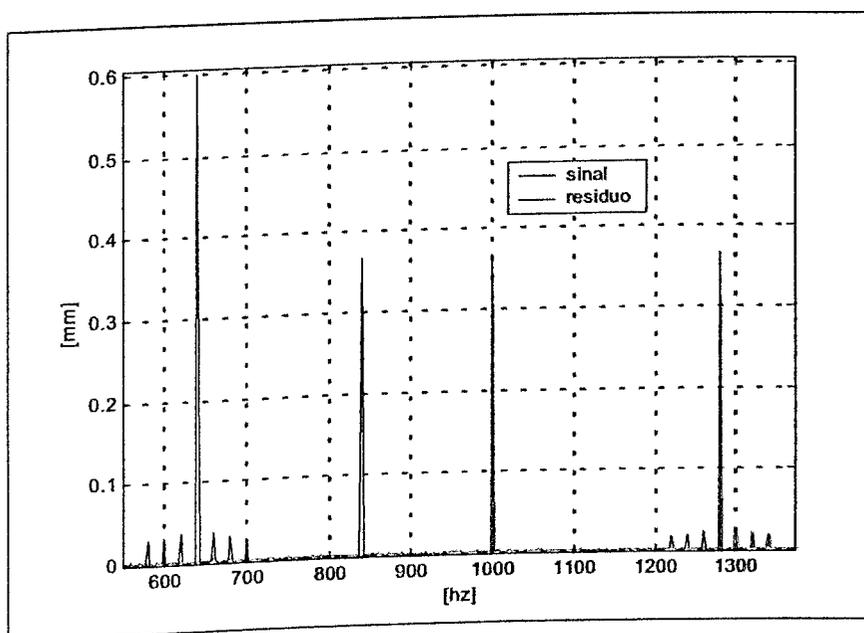


Figura 3.2.3.b – Sinal original *versus* resíduo – domínio da frequência (marcha IV, $f_m = 10\%$; $f_a = 2\%$)

Conforme pode ser observado na tabela 3.2.1 a porcentagem da energia total após cada decomposição manteve-se constante, indicando que o ajuste foi satisfatório. O parâmetro μ_1 , que indica o grau de modulação é coerente com o fator de modulação adotado para o primeiro

e segundo harmônicos da quarta frequência de engrenamento. Contudo nota-se para o segundo harmônico da primeira marcha (440 Hz) um valor anômalo de μ_1 , devido a superposição entre as bandas laterais de modulação à esquerda do primeiro harmônico da segunda marcha (420 Hz) e o segundo harmônico da frequência de engrenamento da primeira marcha (440 Hz). Para estas frequências, a superposição entre as bandas laterais de modulação e o harmônico de engrenamento da segunda marcha afetam a estimativa de μ_1 . Logo, esta superposição de amplitudes conduzirá a estimativas incorretas ao se avaliar a modulação para a segunda frequência de engrenamento da primeira marcha.

Na tabela 3.2.2 são apresentados os valores dos parâmetros ajustados, bem como a energia total, sintetizada e residual de cada decomposição para o sinal de engrenamento da primeira marcha com fator de modulação igual a 10% e fator de multiplicação 2%. Apesar da porcentagem de energia total se manter constante, os fatores de modulação estimados relativos às frequências de 440 Hz e 420 Hz apresentam valores diferentes dos adotados na simulação.

Tabela 3.2.2 – Valores obtidos após ajuste para o sinal da primeira marcha (sem tratamento)

Parâmetros das parcelas decompostas			Parâmetros das janelas		Energia (%)		
Amplitude (mm)	Fase (rad)	Frequência (Hz)	μ_1 (%)	μ_2	resíduo	sintetizada	total
0,594	0,279	220,0	10,87	20	82	18	100
0,4874	0,579	440,0	66,11	20	62	20	100
0,456	0,504	420,0	0	20	52	10	100
0,363	1,038	840,0	1,15	20	45	7	100
0,451	0,635	500,0	0	20	35	10	100
0,363	1,233	1000,0	1,27	20	29	6	100
0,593	0,790	640,0	1,07	20	11	18	100
0,362	1,574	1280,0	1,22	20	4	7	100

Uma das formas de se contornar este problema consiste em calcular a média no domínio do tempo do sinal tendo como referência a frequência de rotação e depois subtrair todas as médias temporais calculadas em função das frequências de engrenamento das demais marchas, exceto para a frequência de engrenamento da primeira marcha. Este procedimento, conhecido como ampliação ou técnica de Stewart (McFadden, 1987a), possui o inconveniente de eliminar a banda lateral de modulação que coincide com a frequência de engrenamento.

Neste estudo o componente associado ao harmônico da primeira frequência de engrenamento da segunda marcha foi retirado através de um procedimento de otimização via mínimos quadrados antes de se aplicar a decomposição via transformada Stockwell. A tabela 3.2.3 traz os valores estimados dos parâmetros das parcelas decompostas e das janelas, bem

como das porcentagens de energia para as frequências de engrenamento da primeira marcha após este tratamento.

Tabela 3.2.3 – Valores obtidos após o ajuste do sinal da primeira marcha (com tratamento)

Parâmetros das parcelas decompostas			Parâmetros das janelas		Energia (%)		
Amplitude (mm)	Fase (rad)	Frequência (Hz)	μ_1 (%)	μ_2	resíduo	sintetizada	total
0,594	0,279	220,0	10,86	20	28	72	100
0,369	0,567	440,0	8,92	20	0,4	27,6	100

Respectivamente nas figuras (3.2.4.a) e (3.2.4.b) podem ser vistos o sinal da primeira marcha, sem tratamento juntamente com o sinal residual após a decomposição, no domínio do tempo e no domínio da frequência.

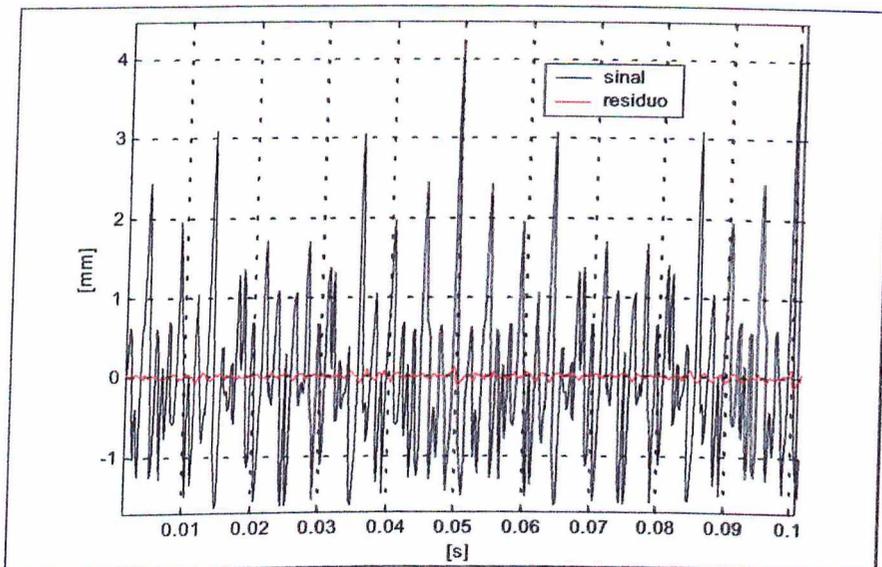


Figura 3.2.4.a – Sinal original *versus* resíduo – domínio do tempo (marcha I, $f_m = 10\%$, $f_a = 2\%$).

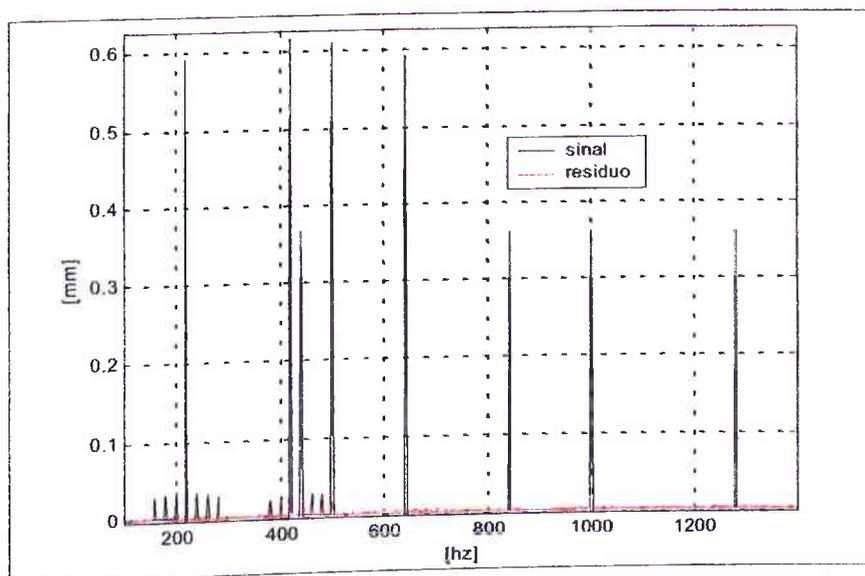


Figura 3.2.4.b – Sinal original *versus* resíduo – domínio da frequência (marcha I, $f_m = 10\%$, $f_a = 2\%$)

Os parâmetros da janela e das parcelas decompostas estimados para o sinal simulado da primeira marcha com fator de modulação de modulação 6% e fator de multiplicação de 15%, bem como as porcentagens de energia do sinal sintetizado, do resíduo e do sinal total são mostrados na tabela 3.2.4.

Tabela 3.2.4 – Valores obtidos pelo ajuste do sinal da primeira marcha, $f_m = 6\%$ (com tratamento).

Parâmetros das parcelas decompostas			Parâmetros das janelas		Energia (%)		
Amplitude (mm)	Fase (rad)	Frequência (Hz)	μ_1 (%)	μ_2	resíduo	sintetizada	total
0,597	0,276	220,0	6,47	20	28	72	100
0,371	0,565	440,0	5,96	20	0,3	27,7	100

Nas figuras 3.2.5.a e 3.2.5.b é apresentado o sinal original em comparação com o resíduo, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

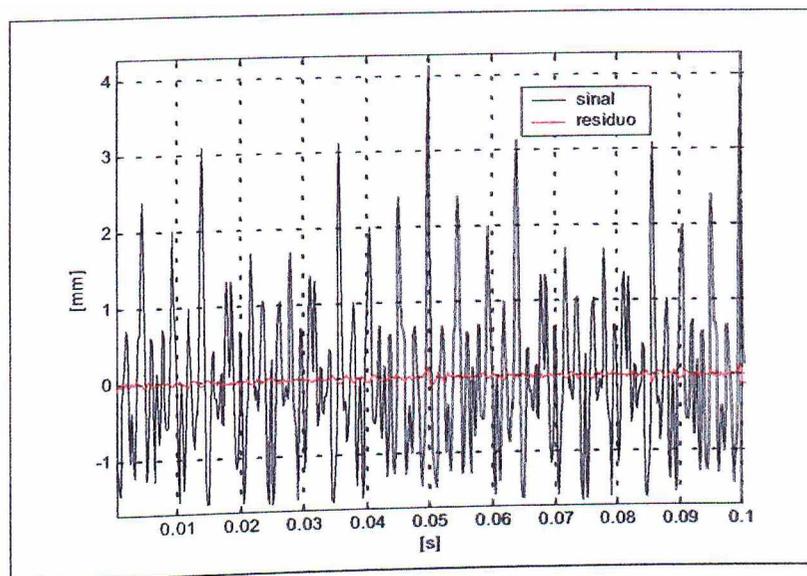


Figura 3.2.5.a – Sinal original *versus* resíduo – domínio do tempo (marcha I, $f_m = 6\%$, $f_a = 15\%$)

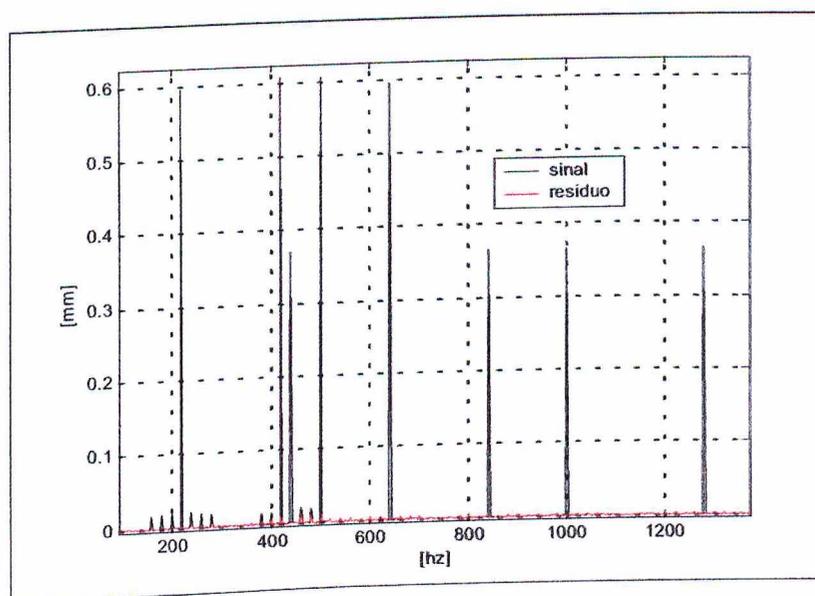


Figura 3.2.5.b – Sinal original *versus* resíduo – domínio da frequência (marcha I, $f_m = 6\%$, $f_a = 15\%$)

Na tabela 3.2.5 são apresentados os valores estimados para os parâmetros da janela e para os componentes decompostos, bem como os valores da porcentagem de energia do sinal sintetizado, do sinal residual e do sinal total, para a segunda marcha simulada com um fator de modulação em amplitude de 4% e um fator de multiplicação de 10.

Tabela 3.2.5 - Valores obtidos para o ajuste do sinal da segunda marcha, $f_m = 4\%$ (com tratamento)

Parâmetros das parcelas decompostas			Parâmetros das janelas		Energia (%)		
Amplitude (mm)	Fase (rad)	Frequência (Hz)	μ_1 (%)	μ_2	resíduo	synetizada	total
0,600	0,525	420,0	4,48	20	27	73	100
0,366	1,037	840,0	4,24	20	0,4	26,6	100

O ajuste obtido pode ser visualizado no domínio do tempo na figura 3.2.6.a e no domínio da frequência na figura 3.2.6.b

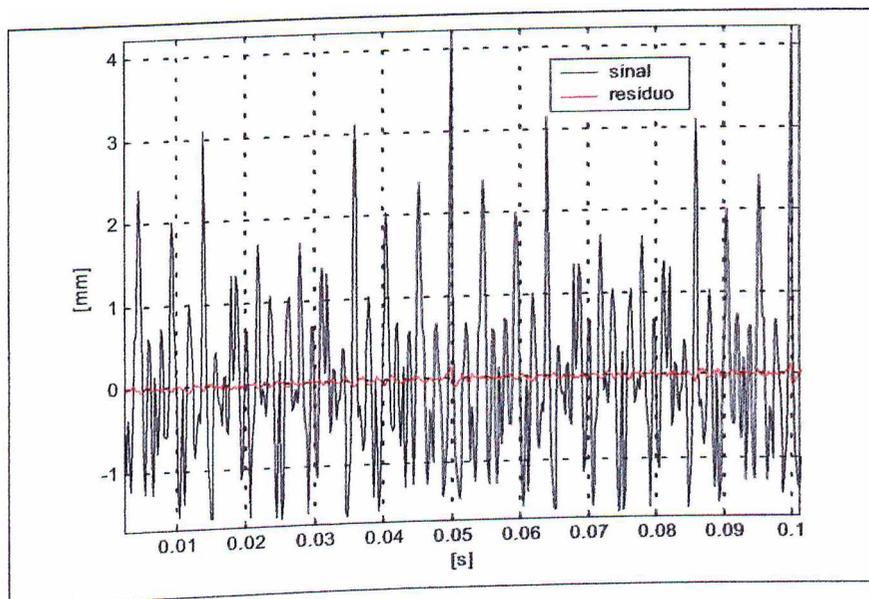


Figura 3.2.6.a – Sinal original versus resíduo – domínio do tempo (marcha II, $f_m = 4\%$, $f_a = 10\%$)

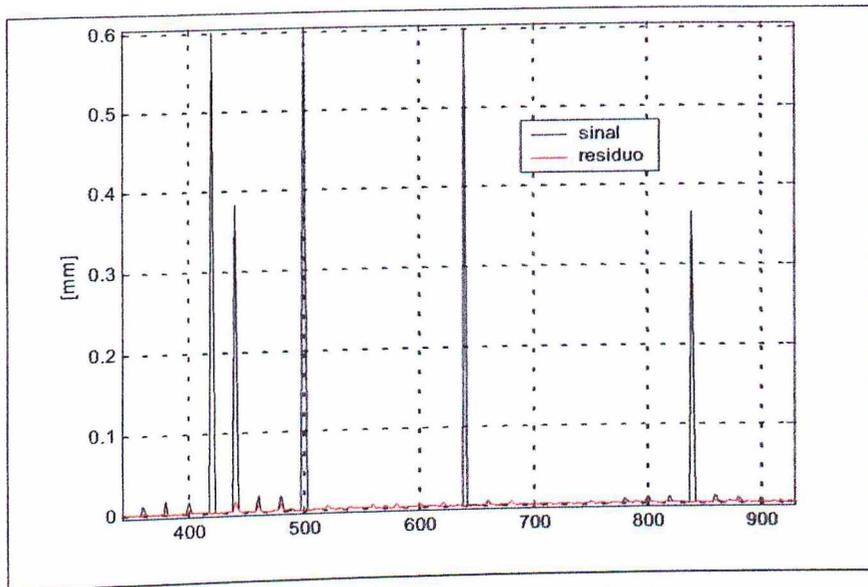


Figura 3.2.6.b – Sinal original versus resíduo – domínio da frequência (marcha II, $f_m = 4\%$, $f_a = 10\%$).

3.2.9 - Conclusões

O procedimento proposto permitiu estimar o grau de modulação existente nos sinais simulados de engrenamento conforme pôde ser observado através dos resultados obtidos. Ressalta-se a importância do conhecimento do sistema sob análise para avaliar a necessidade da retirada das freqüências que se sobrepõe as bandas laterais consideradas, pois mesmo quando este inconveniente não foi contornado a energia total se manteve, indicando que o ajuste pode ser aceitável, entretanto sem coerência física, conforme se observou nas tabelas 3.2.1 e 3.2.2, nas linhas referentes as freqüências de 420 Hz, 440 Hz e 500 Hz.

Tomados os cuidados necessários, os ajustes obtidos são satisfatórios, como pode ser verificado pela proximidade dos valores estimados e adotados para os fatores de modulação.

3.3 - Uso de transformada Choi-Williams na análise de sinais de engrenamento

A transformada de Fourier tem sido a ferramenta mais utilizada para analisar o conteúdo em frequência de um sinal. Contudo, utilizando somente o espectro de potência de um sinal não se pode fazer uma avaliação de como este conteúdo em frequência se desenvolve com o tempo, mesmo considerando que a fase da resultante da transformada de Fourier se relacione com o deslocamento do espectro no tempo.

As representações que descrevem o comportamento do conteúdo em frequência de um sinal podem ser divididas em duas grandes categorias: representações lineares tais como a transformada de Fourier e representações de forma quadrática tais como o espectro de potência.

As transformadas bidimensionais tempo-frequência, também podem ser subdivididas em lineares, como por exemplo: a transformada curta de Fourier (Kadambe e Bartels, 1992), também considerada como uma transformada inversa de Fourier da expansão de Gabor (Teolis, 1998; Qian e Chen, 1996), bem como as transformadas *wavelets* (Newland, 1993; Cohen e Kovacevic, 1996) e Stockwell (Stockwell et alli., 1996). As contrapartidas no domínio bidimensional ao espectro de potência são as representações tempo-frequência bilineares ou quadráticas como a Distribuição de Wigner-Ville (Meng e Qu, 1991; Peyrin e Prost, 1986; Staszewski et alli, 1997; Sun, et alli, 1989) e Choi-Williams (Bucher e Magluta, 1999).

3.3.1 Representações quadráticas bidimensionais - O espectro de potência dependente do tempo

O espectro de potência obtido ao se elevar ao quadrado a transformada de Fourier, caracteriza a distribuição da energia do sinal no domínio da frequência. Para avaliar o comportamento da energia do sinal em função do tempo pode ser utilizado o quadrado da transformada curta de Fourier ou da transformada *wavelet*, respectivamente, conhecidos como espectrograma e escalograma.

Entretanto estas abordagens têm seus resultados associados à escolha adequada das funções de análise. No caso da transformada *wavelet*, da função que será adotada como *wavelet*-mãe e na transformada curta de Fourier o tipo de janela utilizada. Este inconveniente pode ser contornado empregando-se uma metodologia mais geral para descrever a distribuição de energia de um sinal no domínio bidimensional tempo-frequência.

De acordo com o teorema de Wiener-Kinchin, o espectro de potência pode ser considerado como a transformada de Fourier da função de auto-correlação $R(\tau)$

$$P(t, \omega) = |S(\omega)|^2 = \int R(\tau) \exp(-j\omega \tau) d\tau \quad (3.3.1)$$

onde $R(\tau)$ é calculado por

$$R(\tau) = \int s(t) s^*(t - \tau) dt \quad (3.3.2)$$

A equação (3.3.1) não é uma função do tempo e indica a quantidade de energia associada a frequência ω em um período completo, contudo ela mostra como o espectro está distribuído ao longo do tempo. Com base nas equações (3.3.1) e (3.3.2) não há como dizer se o espectro de potência do sinal está variando no tempo, pois a função de auto-correlação $R(\tau)$, é independente do tempo. Portanto, o espectro de potência padrão é inadequado para descrever sinais cujo conteúdo em frequência apresente alguma variação temporal, como por exemplo, sinais de vibração.

Uma forma que permite representar um espectro variável no tempo é expressar a função de auto-correlação de uma maneira dependente do tempo $R(t, \tau)$. Ou seja, obter $R(\tau)$ para cada instante de tempo t , fazendo com que a transformada de Fourier resultante desta nova função de auto-correlação seja também uma função do tempo

$$P(t, \omega) = \int R(t, \tau) \exp(-j\omega \tau) d\tau \quad (3.3.3)$$

sendo $P(t, \omega)$ o espectro de potência dependente do tempo. A escolha de $R(t, \tau)$ não é arbitrária, devendo obedecer a algumas condições:

a) Condição de frequência marginal

Como $P(t, \omega)$ descreve um espectro dependente do tempo, a soma de todos os espectros instantâneos deve resultar no espectro de potência total.

$$\int P(t, \omega) dt = |S(\omega)|^2 \quad (3.3.4)$$

b) Condição de tempo marginal

A soma total ao longo do eixo de freqüências deve ser igual à energia instantânea do sinal.

$$\frac{1}{2\pi} \int P(t, \omega) d\omega = |s(t)|^2 \quad (3.3.5)$$

c) Condição de valor real

Se $P(t, \omega)$ representa a distribuição de energia no domínio tempo-freqüência, logo deve ser um valor real

$$P(t, \omega) = P^*(t, \omega) \quad (3.3.6)$$

A função de auto-correlação instantânea é determinada através dos produtos dos "pedaços" do sinal em instantes de tempo no futuro $s(t+\tau/2)$ e no passado $s(t-\tau/2)$. Esta definição feita para a distribuição de Wigner-Ville atende as três condições acima, além de realmente identificar as variações do conteúdo em freqüência do sinal.

$$R(t, \tau) = s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \quad (3.3.7)$$

A Classe de Cohen.

Na análise de alguns fenômenos a distribuição de Wigner-Ville apresenta como inconveniente principal a presença de termos cruzados de interferência, já que $R(t, \tau)$ leva em conta o produto de todos os pontos do sinal $s(t)$ em instantes de tempo no passado e no futuro ao longo de todo seu comprimento (Guimarães, 2000), fazendo com que todos os componentes do sinal distantes dos componentes de interesse acabem por interagir entre si, resultando em termos de nenhum significado físico no plano tempo-freqüência.

Nas transformadas *wavelet* contínua e curta de Fourier a superposição entre duas janelas de análise adjacentes também gera termos cruzados, entretanto suas amplitudes são consideravelmente menores do que as resultantes do produto dos próprios termos (Kadambe *et al.*, 1992).

A aplicação de uma janela durante o cálculo da função de autocorrelação instantânea $R(t, \tau)$, consiste numa alternativa para a atenuação dos termos de interferência, o que resulta na distribuição pseudo-Wigner (Sun et alli., 1989; Qian e Chen, 1996). Entretanto, esta operação, além de aumentar o custo computacional, traz dificuldades para a escolha correta do tipo de janela e de seus parâmetros, possibilitando que sejam obtidas as informações desejadas do sinal sem que haja distorção. Na maioria dos casos de detecção de falhas de engrenamento em caixas de transmissão a distribuição pseudo-Wigner se mostra inadequada, já que normalmente os sinais de vibração deste tipo de sistema possuem vários harmônicos da frequência de rotação e das diversas frequências de engrenamento (Wang e McFadden, 1993).

A transformada inversa de Fourier da função de autocorrelação instantânea utilizada na distribuição Wigner-Ville, define a função de ambigüidade simétrica.

$$FA(\nu, \tau) = \int s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \exp(-j\nu t) dt \quad (3.3.8)$$

A figura 3.3.1 ilustra as relações entre a distribuição de Wigner-Ville e a função de ambigüidade simétrica

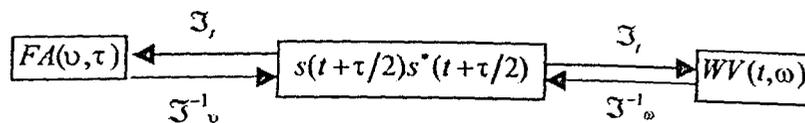


Figura 3.3.1 – Relações entre a distribuição de Wigner-Ville e a função de ambigüidade simétrica.

Cohen (1995) desenvolveu um arcabouço matemático de operadores e funções características que permitem representar qualquer distribuição tempo-frequência, fazendo com que todas as representações bilineares possam ser escritas de uma forma geral tradicionalmente conhecida como Classe de Cohen. Segundo esta formulação, a função de autocorrelação dependente do tempo pode ser definida pela equação (3.3.9)

$$R(t, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int FA(\nu, \tau) \Phi(\nu, \tau) \exp(j\nu t) d\nu \quad (3.3.9)$$

onde $\Phi(\nu, \tau)$ é a função núcleo bidimensional. A equação (3.3.9) mostra que a função geral de autocorrelação dependente do tempo proposta por Cohen é igual a função de correlação dependente do tempo dada pela equação (3.3.7) filtrada pela função núcleo exponencial. Logo,

a diferença entre a distribuição de Wigner-Ville e as distribuições pertencentes à Classe de Cohen, como por exemplo a distribuição de Choi-Williams, é completamente determinada pela natureza do filtro $\phi(t, \tau)$. Quando $\phi(t, \tau)$ permite passar todas as frequências, ou seja, $\Phi(\nu, \tau) = 1$, a equação (3.3.9) resulta exatamente na função de autocorrelação da distribuição de Wigner-Ville.

Na distribuição de Choi-Williams é utilizado um núcleo $\Phi(\nu, \tau)$ do tipo exponencial, que promove uma redução nos termos cruzados que tradicionalmente existiriam na distribuição de Wigner-Ville para sinais multicomponentes.

$$\Phi(\nu, \tau) = \exp(-\alpha(\nu\tau)^2) \quad (3.3.10)$$

Onde o parâmetro α controla a taxa de redução. Valores elevados de α implicam em uma alta taxa de redução para a função núcleo ao longo dos eixos ν e τ , ou seja, menores serão os pesos que irão ponderar a função de ambigüidade simétrica $AF(\nu, \tau)$ para valores distantes da origem, causando uma atenuação dos termos cruzados de interferência. A escolha apropriada de α esta diretamente associada a resolução dos auto-terminos e a redução desejada da interferência. Segundo Choi et alli. (1989), valores que resultam em distribuições aceitáveis devem estar entre 0.05 e 10.

Um dos inconvenientes para o cálculo da distribuição de Choi-Williams é o seu elevado custo computacional, principalmente no que se refere quantidade de memória, contudo com a capacidade de processamento das máquinas atuais isto deixa de ser um fator limitante. Outra desvantagem das distribuições quadráticas bidimensionais de energia é a necessidade de uma frequência de amostragem quatro vezes maior do que a maior frequência que se deseja observar no fenômeno (Flandrin e Martin, 1985). Além destes inconvenientes, existe uma grande dificuldade para interpretação dos gráficos resultantes.

Neste trabalho será avaliada uma metodologia que consiste em fazer "cortes" nas frequências desejadas, e em seguida verificar o comportamento destas frequências ao longo do tempo por meio da avaliação de algumas grandezas estatísticas usualmente empregadas em análise de assinaturas, como o nível médio quadrático, que dá uma noção da energia contida no sinal; o quarto momento estatístico conhecido como kurtosis e o fator de crista (Braun, 1986).

3.3.2 - Simulações numéricas para avaliação da metodologia

Novamente, será adotado o modelo de engrenamento proposto descrito pela equação (3.1.2)

$$x(t) = [1 + a_m(t)] \sum_{m=1}^M X_m \cos[2\pi m f_c t + \phi_m + b_m(t)] + e(t) \quad (3.3.11)$$

Na avaliação da capacidade de mensurar o grau de modulação e determinar em qual par engrenado está a maior modulação foram consideradas quatro marchas diferentes, sendo o número de dentes de cada uma os seguintes: $z_1 = 11$, $z_2 = 21$, $z_3 = 25$ e $z_4 = 32$. Como numa caixa de transmissão automotiva, considerou-se também que todas as marchas permanecem engrenadas, mesmo que somente uma esteja transmitindo esforço, o que implica dizer que as frequências de engrenamento e harmônicos dos pares não engrenados também estarão presentes no espectro de frequência do sinal.

Nestas simulações foram reproduzidas as variações de amplitude observadas nos testes reais, sendo aceitável uma diferença de até 20%. Para contornar este inconveniente foi utilizado o mesmo procedimento aplicado no capítulo 3.2, onde os dados foram pré – processados através de um re-escalamento linear das variáveis.

Para cada marcha foram criados três sinais com grau de modulação em amplitude dentro da faixa de 2% a 10%, tendo cada frequência de engrenamento dois harmônicos com três bandas laterais por harmônico. A frequência de rotação do eixo é $f_r = 20$ Hz, com uma frequência de amostragem de 5120 Hz, a qual permite visualizar uma frequência máxima de 1280 Hz ao se utilizar a distribuição de Choi-Williams. Nas figuras 3.3.2 são mostrados os gráficos da distribuição Choi-Williams para cada um dos três casos da primeira marcha.

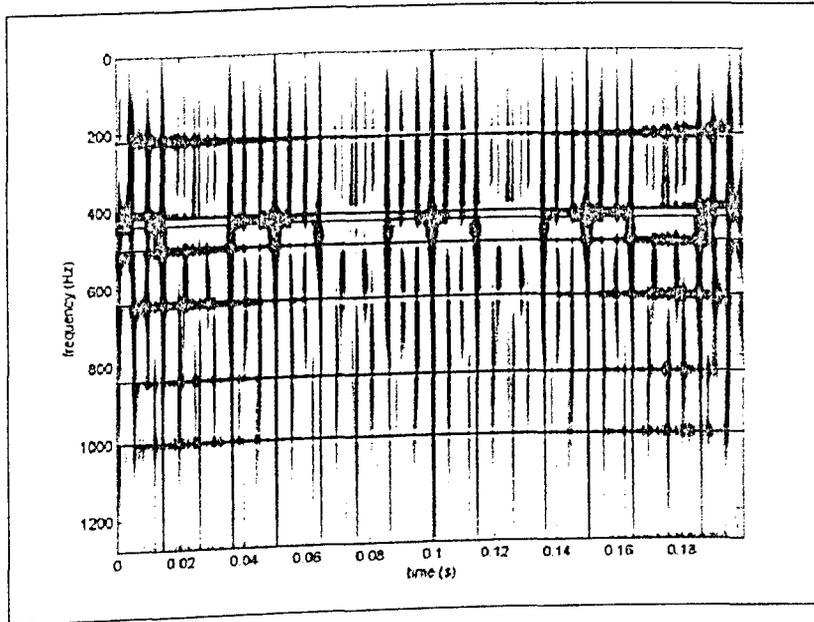


Figura 3.3.2.a – Mapa da Transformada de Choi-Williams (marcha I, $f_m = 2\%$, $f_a = 2\%$).

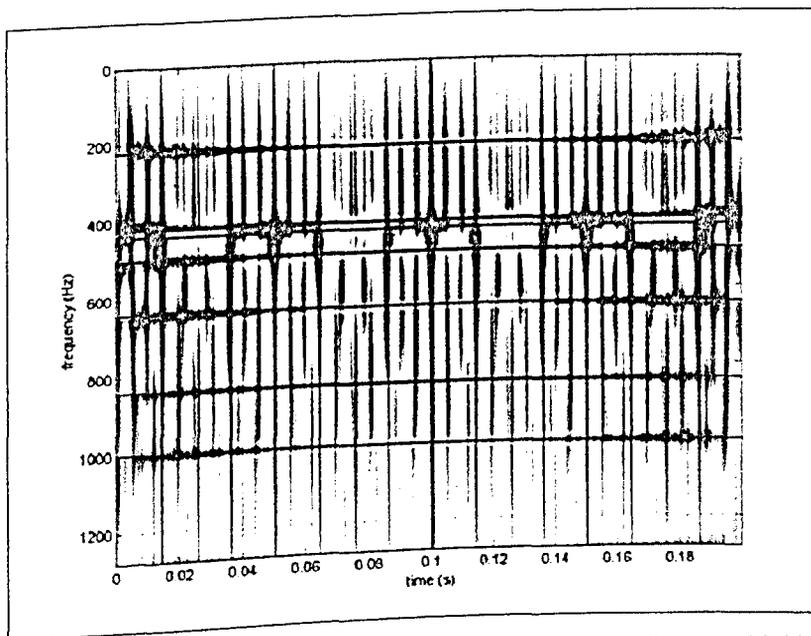


Figura 3.3.2.b – Mapa da transformada de Choi-Williams (marcha I, $f_m = 10\%$, $f_a = 2\%$).

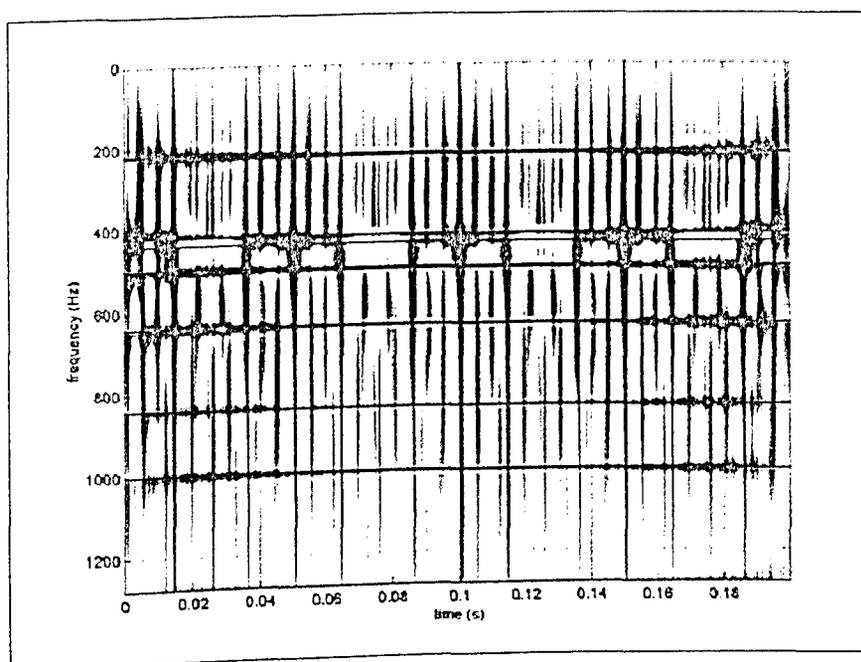


Figura 3.3.2.c – Mapa da transformada Choi-Williams (marcha I, $f_m = 6\%$, $f_a = 15\%$).

Pode-se observar destas figuras, que a análise e retirada das informações importantes destes sinais simulados é uma tarefa bastante árdua. O uso de gráficos tridimensionais facilitaria a visualização, entretanto a obtenção de descritores que caracterizassem o sinal ainda seria bastante difícil.

Na tabela 3.3.1 são apresentados os valores do fator de crista, da kurtosis e da energia para a primeira marcha.

Tabela 3.3.1 – Valores do fator de crista, da kurtosis e da energia para a primeira marcha.

sinal		ordem					
		10	11	12	21	22	23
crista	a2v2	25,27	1,89	24,45	1,75	2,97	7,23
	a10v2	21,12	2,00	20,53	1,73	3,01	7,02
	a6v15	23,71	1,93	22,76	1,74	2,96	7,07
kurtosis	a2v2	5,47	2,55	5,97	2,01	3,44	8,27
	a10v2	11,46	2,43	13,82	2,07	4,15	11,06
	a6v15	8,16	2,48	9,75	2,04	3,75	9,60
energia	a2v2	2,96	41,93	3,33	46,46	27,12	11,06
	a10v2	3,67	40,99	4,10	48,47	27,43	11,65
	a6v15	3,19	41,56	3,61	47,11	27,38	11,36

Pode-se observar o comportamento monotonicamente decrescente do fator de crista com o aumento do grau de modulação, principalmente para as ordens 10 e 12, que representam respectivamente as bandas laterais à esquerda e à direita da frequência de engrenamento da primeira marcha. O mesmo comportamento é observado de forma menos

visível para as bandas laterais do segundo harmônico da primeira marcha. Na figura 3.3.3.a pode-se ver com maior clareza o comportamento do fator de crista em função da variação da modulação em amplitude

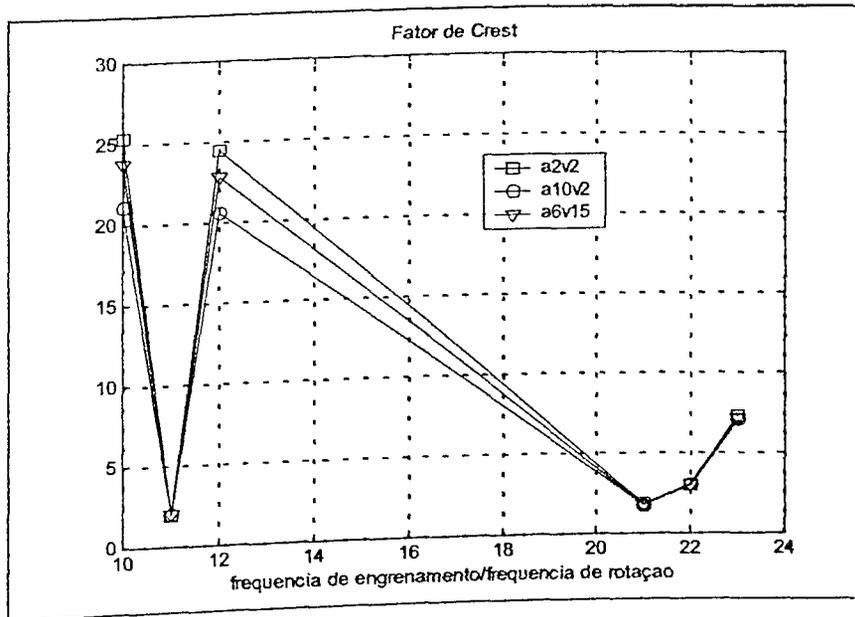


Figura 3.3.3.a – Fator de crista em função do fator de modulação para a primeira marcha

Na figura 3.3.3.b é mostrado o comportamento da kurtosis em função da variação da amplitude para os sinais sintetizados da primeira marcha. Desta feita observa-se um comportamento diretamente proporcional deste descritor em relação à variação da modulação em amplitude. Como pode ser visto, este descritor permite uma maior distinção entre os casos,, principalmente para as ordens 10 e 12, respectivamente as bandas laterais à esquerda e à direita da frequência de engrenamento da primeira marcha. Mesmo para o segundo harmônico da primeira marcha a capacidade de distinção deste descritor é maior do que a obtida com o fator de crista.

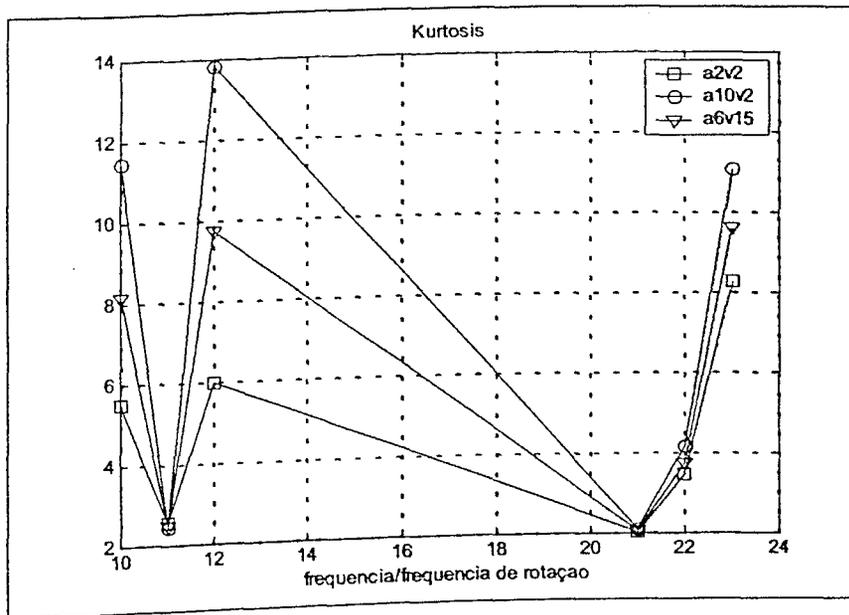


Figura 3.3.3.b – Kurtosis em função do fator de modulação para a primeira marcha

Na figura 3.3.3.c são apresentados os valores da energia para cada frequência em função da variação da modulação em amplitude para os sinais sintetizados da primeira marcha. Observa-se uma baixa sensibilidade do descritor em relação à variação do fator de modulação em amplitude. Contudo, analisando-se os valores presentes na tabela 3.3.1 verifica-se uma proporcionalidade direta deste descritor em relação ao fator de modulação.

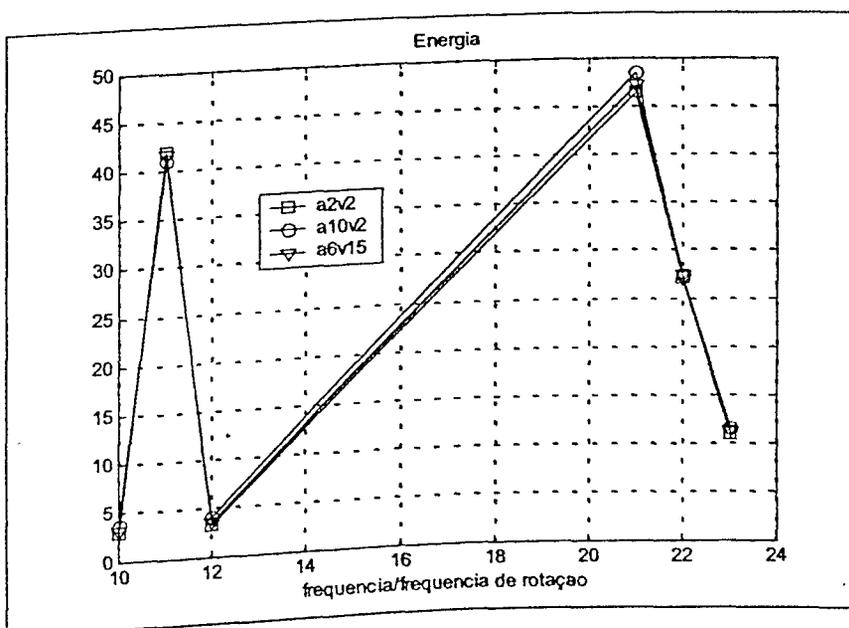


Figura 3.3.3.c - Energia em função do fator de modulação para a primeira marcha

Nas figuras 3.3.4 são mostrados os gráficos da distribuição Choi-Williams para cada um dos três casos da segunda marcha.

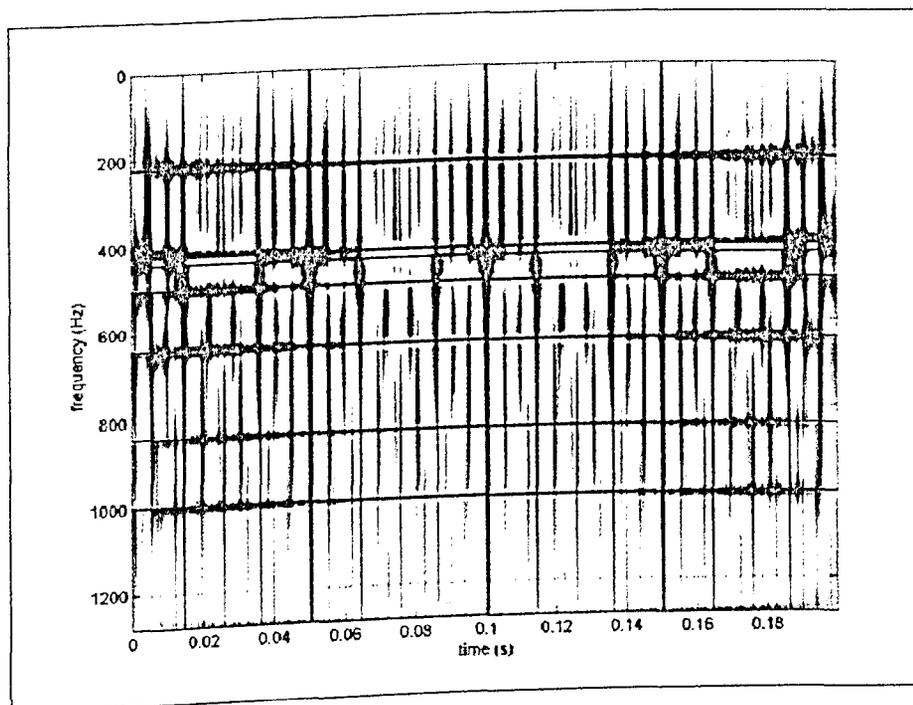


Figura 3.3.4.a – Mapa da transformada Choi-Williams (marcha II, $f_m = 2\%$, $f_a = 2\%$)

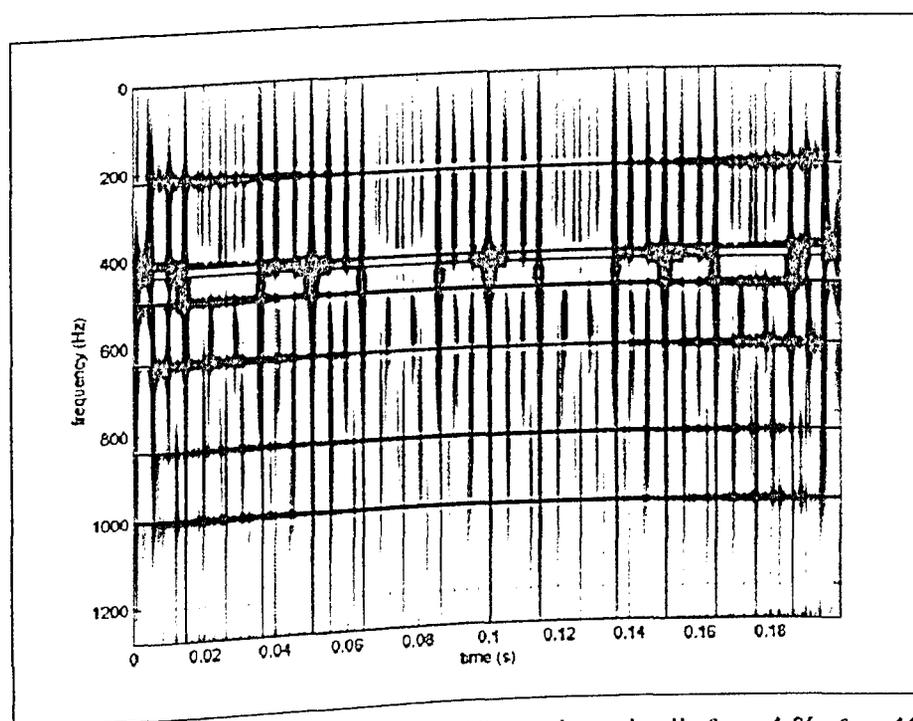


Figura 3.3.4.b – Mapa da transformada Choi-Williams (marcha II, $f_m = 4\%$, $f_a = 10\%$)

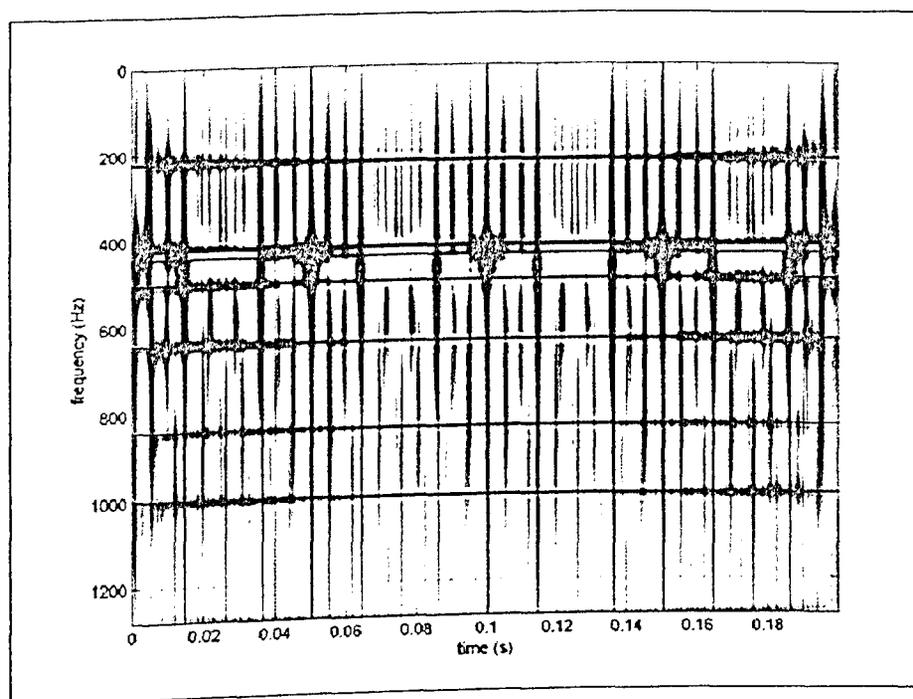


Figura 3.3.4.c – Mapa da transformada Choi-Williams (marcha II, $f_m = 10\%$, $f_a = 6\%$)

Novamente observa-se uma grande dificuldade em se retirar dos mapas das figuras 3.3.4 informações que permitam diferenciar os sinais simulados em relação ao fator de modulação em amplitude. Com bastante atenção podemos diferenciar, assim mesmo de maneira muito pouco clara o comportamento das freqüências de engrenamento da primeira e segunda marcha. Para facilitar a caracterização de cada sinal foram calculados o fator de crista, a kurtosis e a energia, para os números de ordem associados às freqüências de interesse. Na tabela 3.3.2 são apresentados estes valores.

Do mesmo modo como ocorreu com a primeira marcha, observa-se que o aumento do fator de modulação implica em uma redução no fator de crista. Desta vez, a maior sensibilidade deste descritor se dá para as ordens 41 e 43, que representam respectivamente as bandas laterais à esquerda e à direita da segunda freqüência de engrenamento da segunda marcha.

Tabela 3.3.2 – Valores do fator de crista, da kurtosis e da energia para a segunda marcha.

sinal		ordem					
		21	22	23	41	42	43
crista	a2v2	11,40	1,52	2,52	25,49	4,26	27,40
	a10v6	10,36	1,52	2,30	22,95	4,36	24,59
	a4v10	11,20	1,52	2,46	24,96	4,29	26,82
kurtosis	a2v2	8,143	2,01	3,37	13,92	2,62	13,33
	a10v6	13,30	2,13	3,78	22,43	2,56	22,14
	a4v10	9,33	2,03	3,48	16,05	2,60	15,44
energia	a2v2	6,99	45,93	27,50	2,69	15,99	2,49
	a10v6	7,90	46,68	30,62	3,05	15,93	2,82
	a4v10	7,17	46,14	28,25	2,76	15,99	2,56

O comportamento do fator de crista em função do fator de modulação em amplitude pode ser observado na figura 3.3.5.a

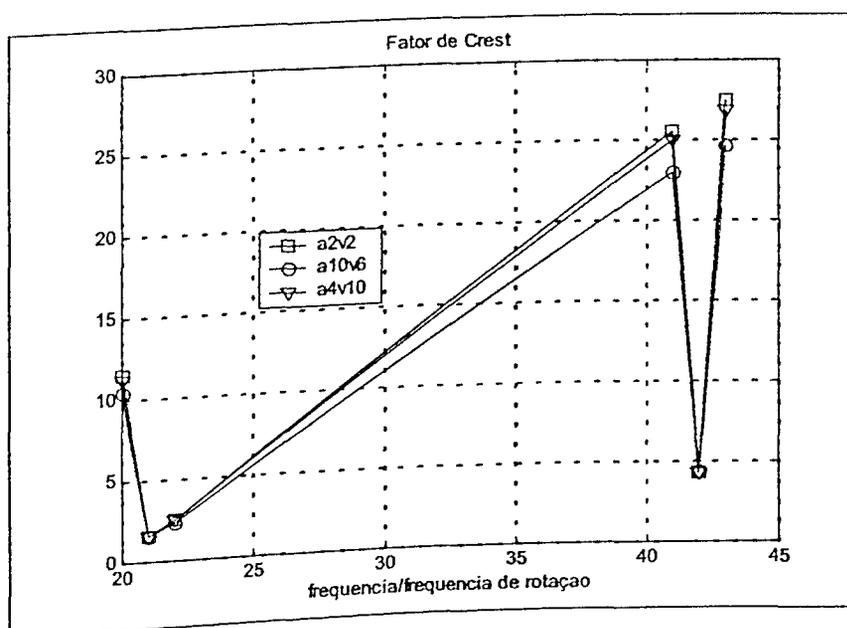


Figura 3.3.5.a – Fator de crista em função do fator de modulação para a segunda marcha

Na figura 3.3.5.b pode-se observar o comportamento da kurtosis em função da variação da amplitude para os sinais sintetizados da segunda marcha. Desta feita nota-se um comportamento diretamente proporcional do descritor em relação ao fator de modulação em amplitude. Como pode ser visto, a kurtosis possibilita uma maior distinção entre os casos do que o fator de crista, principalmente para as freqüências correspondentes as ordens 20, 41 e 43, respectivamente a banda lateral à esquerda da primeira freqüência de engrenamento e as bandas laterais à esquerda e à direita da segunda freqüência de engrenamento da segunda marcha.

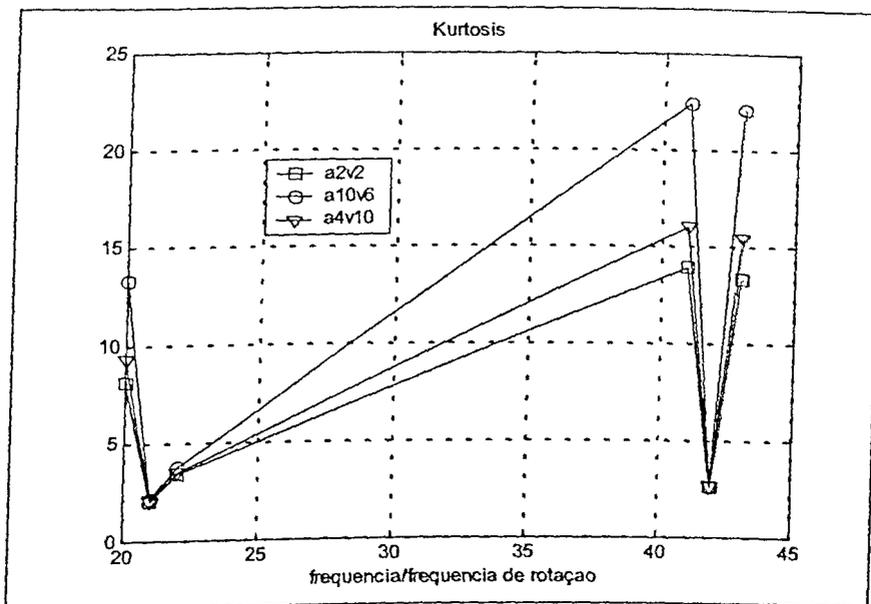


Figura 3.3.5.b – Kurtosis em função do fator de modulação para a segunda marcha

Os valores de energia relativos a cada frequência em função da modulação em amplitude para os sinais sintetizados da segunda marcha são apresentados na figura 3.3.5.c. Novamente se observa uma baixa sensibilidade deste descritor em relação à variação do fator de modulação. Os valores da tabela 3.3.2 mostram uma proporcionalidade direta deste descritor em relação ao fator de modulação.

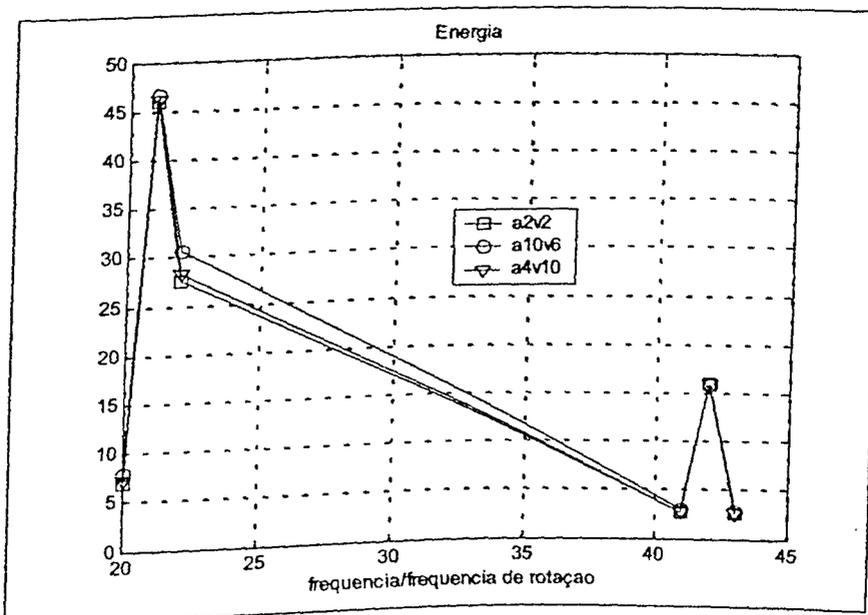


Figura 3.3.5.c – Energia em função do fator de modulação para a segunda marcha

Os gráficos da distribuição Choi-Williams para os sinais simulados da terceira marcha são mostrados nas figuras 3.3.6.a e 3.3.6.b, respectivamente para os fatores de modulação iguais a 2% e 10%.

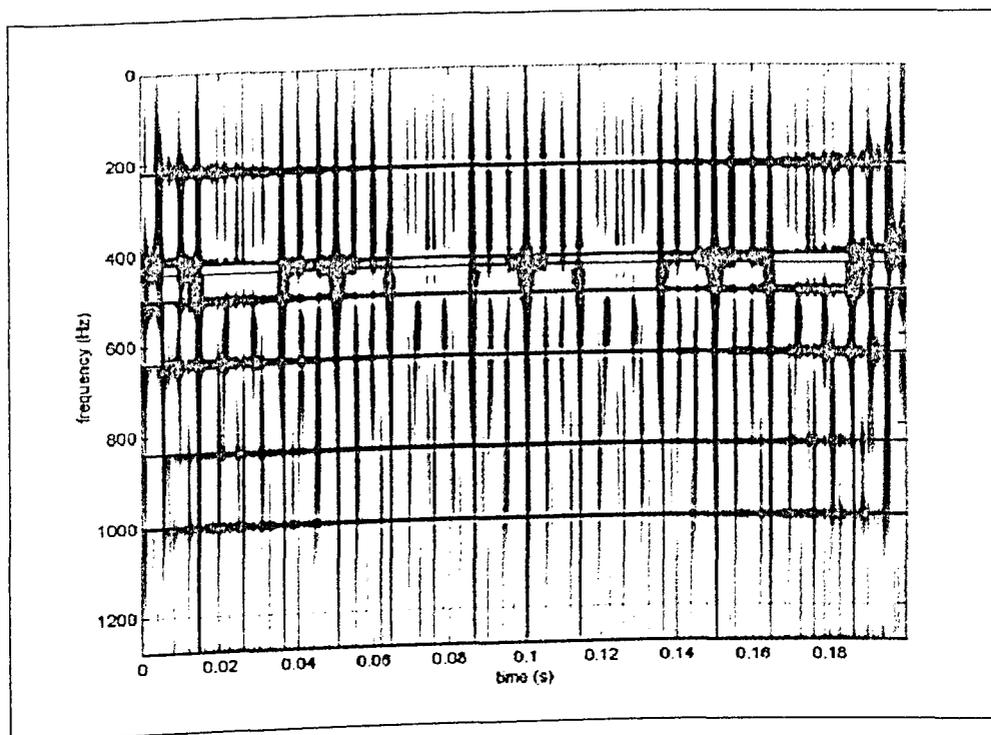


Figura 3.3.6.a – Mapa da transformada Choi-Williams (marcha III, $f_m = 2\%$, $f_a = 2\%$)

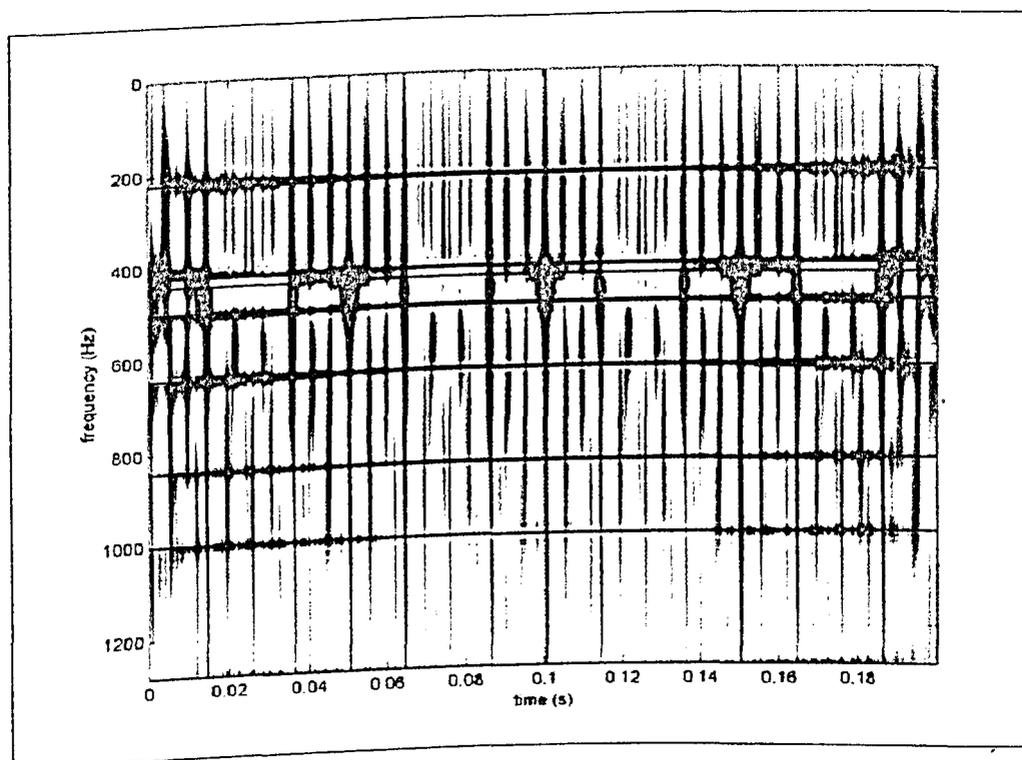


Figura 3.3.6.b – Mapa da transformada Choi-Williams (marcha III, $f_m = 10\%$, $f_a = 2\%$)

Novamente, mesmo para valores tão diferentes do fator de amplitude a distinção entre os dois sinais simulados é extremamente difícil. Na tabela 3.3.3 são apresentados os valores estimados do fator de crista, da kurtosis e da energia para a terceira marcha, para as ordens correspondentes a primeira e segunda frequência de engrenamento e suas bandas laterais. Observa-se que o fator de crista é inversamente proporcional ao fator de modulação, já a kurtosis e energia apresentam um comportamento inverso.

Tabela 3.3.3 – Valores do fator de crista, da kurtosis e da energia para a terceira marcha.

sinal		ordem					
		24	25	26	49	50	51
crista	a2v2	6,26	0,54	2,94	12,26	0,56	7,12
	a10v2	5,92	0,54	2,65	10,82	0,72	7,61
	a4v20	6,15	0,54	2,85	11,76	0,62	7,47
kurtosis	a2v2	7,62	2,56	11,15	13,08	2,61	10,40
	a10v2	11,22	2,51	17,00	27,79	2,47	23,11
	a4v20	8,36	2,54	12,27	16,09	2,49	12,16
energia	a2v2	11,07	43,60	7,92	1,85	15,60	1,69
	a10v2	12,10	43,84	8,81	2,12	15,55	1,92
	a4v20	11,31	43,53	8,11	1,92	15,95	1,77

Na figura 3.3.7.a são mostrados os valores do fator de crista da tabela 3.3.3, onde se vê que este descritor apresenta uma baixa sensibilidade em relação ao fator de modulação.

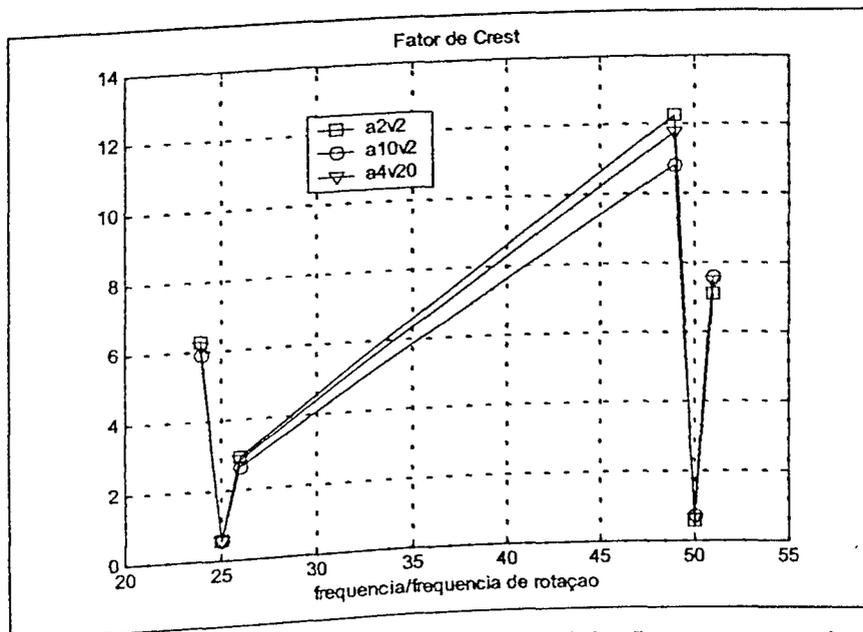


Figura 3.3.7.a - Fator de crista em função do fator de modulação para a terceira marcha

O comportamento da kurtosis em função da variação da amplitude pode ser visto na figura 3.3.7.b, na qual se observa uma proporcionalidade direta entre a kurtosis e o fator de modulação. A kurtosis permite uma maior distinção entre os sinais simulados em comparação ao fator de crista. Neste caso, tanto as bandas laterais à direita quanto à esquerda das frequências de engrenamento permitem uma boa diferenciação dos sinais. Isto se deve a inexistência de superposição entre as bandas laterais e frequências de engrenamento.

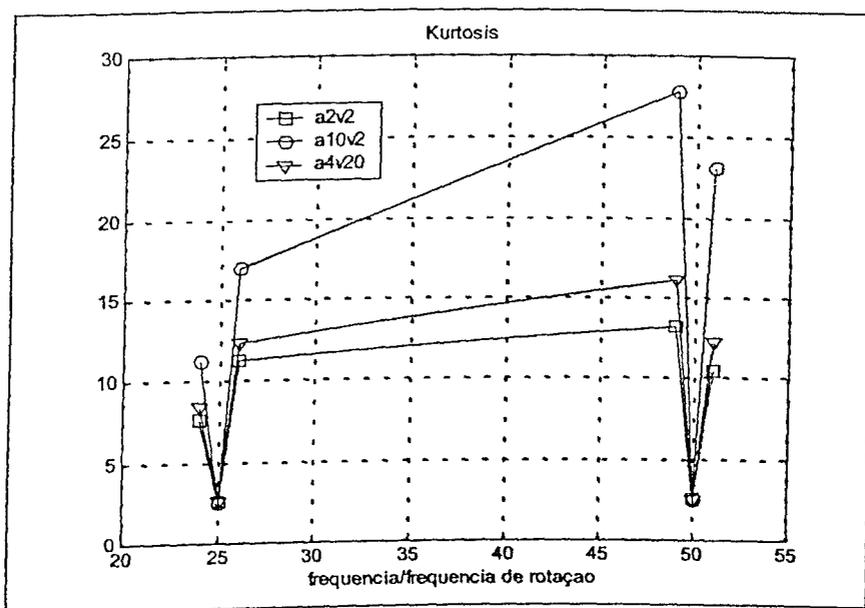


Figura 3.3.7.b - Kurtosis em função do fator de modulação para a terceira marcha

Os valores da energia relativos a cada frequência em função do fator de modulação para os sinais sintetizados da terceira marcha são mostrados na figura 3.3.7.c. Novamente se verifica uma baixa sensibilidade deste descritor em relação à variação do fator de modulação. A análise dos valores presentes na tabela 3.3.3 mostra uma proporcionalidade direta do descritor em relação ao fator de modulação.

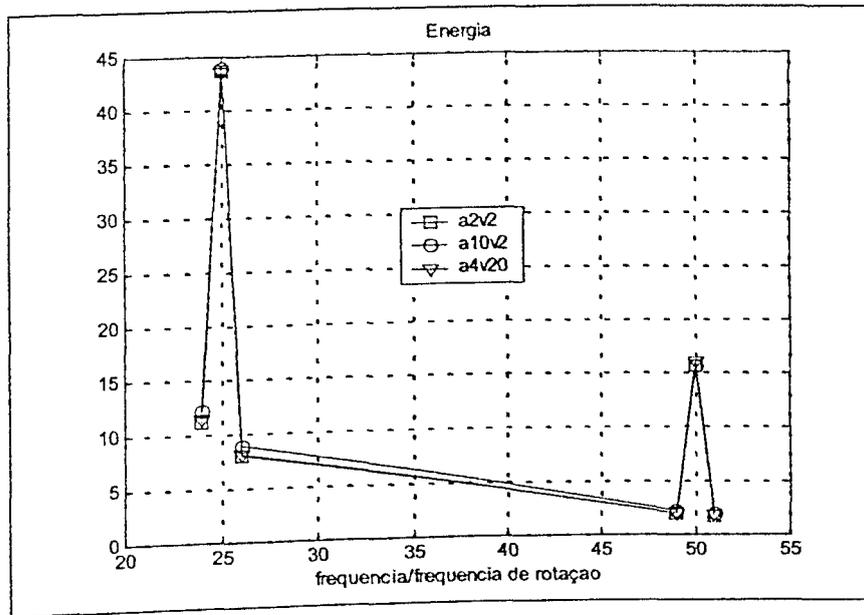


Figura 3.3.7.c - Energia em função do fator de modulação para a terceira marcha

3.3.3 – Conclusões

A abordagem de “fatiamento” da distribuição de Choi-Williams nas frequências de interesse para os sinais simulados de engrenamento permite avaliar a contribuição temporal da energia para a frequência de interesse, sem as distorções causadas pelos termos cruzados, presentes em outras distribuições tempo-frequência. Entretanto, a interpretação dos mapas resultantes é extremamente difícil devido à complexidade dos mesmos, tornando complicada a automatização do uso desta ferramenta para fins de manutenção preditiva e controle de qualidade.

O uso de procedimentos clássicos não paramétricos tais como: a energia, a kurtosis e o fator de crista, calculados para as fatias da distribuição Choi-Williams dos sinais de engrenamento simulados, apresentaram boa capacidade na diferenciação das mudanças introduzidas pelas variações do fator de modulação. Destes descritores o que apresentou maior sensibilidade às variações foi a kurtosis.

Observou-se também que superposição de uma frequência de engrenamento com qualquer uma das bandas laterais mascara os valores obtidos dos descritores. Isto pode ser contornado considerando-se somente as bandas laterais livres da superposição de outras frequências de engrenamento.

3.4 - Diagnóstico e identificação de falhas em engrenagens no domínio biespectral.

3.4.1 - Representações quadráticas bidimensionais

O bi-espectro é um momento estatístico de terceira ordem (Collis et al., 1998), como por exemplo, a skewnes, que pode auxiliar na identificação de pares de componentes espectrais que estejam relacionados ou melhor dizendo, acoplados em fase. Este cumulante pertencente à análise espectral de alta ordem tem aplicação potencial onde a análise tradicional, como por exemplo, a que adota o espectro de potência, não fornece informações suficientes.

O autoespectro e o bi-espectro de um sinal $x(t)$ é definido respectivamente como:

$$P(f) = E[X_k(f)X_k^*(f)] = E[|X_k(f)|^2] \quad (3.4.1.a)$$

$$B(f_1, f_2) = E[X_k(f_1)X_k(f_2)X_k^*(f_1 + f_2)] \quad (3.4.1.b)$$

Nas equações (3.4.1), o índice k indica a dimensão do bloco de dados obtidos no domínio do tempo utilizado para o cálculo da transformada de Fourier do sinal $x(t)$. O operador esperança matemática E representa uma média sobre todos os k blocos utilizados.

O autoespectro de um sinal contém informações sobre as propriedades de segunda ordem, tais como a variância e a energia. No autoespectro, cada componente de frequência é considerado de forma independentemente dos outros, podendo ser interpretado como uma medida da distribuição de energia do sinal através das frequências. Esta característica é válida nas análises em que se pode aplicar a hipótese de que todos os modelos e fenômenos envolvidos sejam lineares. Logo, para se obter a contribuição total basta somar a todas as contribuições individuais. Contudo nem todos os fenômenos apresentam este comportamento linear, fazendo com que algumas frequências tenham influência sobre outras que aparentemente não guardam entre si nenhuma relação. Devido à definição dada pela equação (3.4.1.a) este tipo de ocorrência não pode ser observada no autoespectro.

O Acoplamento Quadrático de Fase (AQF) entre duas frequências se manifesta pela presença de tons adicionais no autoespectro, correspondentes a soma ou diferença entre estas frequências. Entretanto, a existência deste componente é apenas uma condição necessária, mas não suficiente, para o AQF, ou seja, não basta somente a existência de amplitudes para as frequências f_1 , f_2 e $f_1 + f_2$ no espectro de potência do sinal sem que haja uma ligação

significativa entre seus valores complexos. O acoplamento quadrático de fase pode ser verificado no domínio da frequência por intermédio do bi-espectro.

Uma das aplicações da análise espectral tradicional consiste na detecção de não-linearidades de um sistema através da análise da função de coerência, contudo para este procedimento é imprescindível o uso de dois sensores de medição.

A bicoerência de um sinal, definida segundo a equação (3.4.2), mede o acoplamento quadrático de fase em uma escala absoluta entre zero e um e permite a detecção de não-linearidades sem a necessidade de dois sensores de medição.

$$b^2(f_1, f_2) = \frac{|B(f_1, f_2)|^2}{E[|X(f_1)X(f_2)|^2]E[|X(f_1 + f_2)|^2]} \quad (3.4.2)$$

A bicoerência para qualquer par de frequências f_1 e f_2 pode ser interpretada como a fração de potência para a frequência $f_1 + f_2$ que está acoplada pela fase ao componente $f_1 + f_2$.

Um dos atributos mais importantes da detecção de variações estatísticas no domínio bi-espectral reside na possibilidade de seu emprego, independente das condições de operação do equipamento ou seu regime de trabalho e níveis de torque. A padronização que propicia comparar os dados medidos em diferentes situações é alcançada utilizando-se a estimativa da bicoerência.

Duas grandes vantagens do uso da bicoerência visando monitoramento da condição são:

- A não necessidade de se fazer alguma hipótese a respeito do modelo estatístico da seqüência bi-espectral gerada (Kocur e Radoslav, 2000);

- A sua invariância em relação a transformações lineares, o que permite que a medição dos sinais seja quase que independente da posição, desde que os sensores estejam colocados próximos à fonte e que o caminho de transmissão seja linear e não provoque limitação em banda na resposta de interesse (Fackrell et al., 1995).

Na maioria dos procedimentos tradicionais de classificação e detecção de falhas em componentes mecânicos, faz-se necessário um tratamento prévio dos dados visando evitar erros associados aos procedimentos de treinamento, como ocorre, por exemplo, ao se utilizar rede neural. Parker et al. (2000), utilizou análise estatística no domínio bi-espectral para detecção e classificação de falhas sem que houvesse a etapa de pré-processamento.

3.4.2 - Simulações numéricas para avaliação da metodologia

Novamente foi considerada uma caixa de transmissão de quatro marchas, sendo que para cada marcha foram gerados três sinais de vibração com variação dos fatores de modulação e de multiplicação das amplitudes visando obter uma condição mais aproximada com a dos sinais medidos em câmbios reais.

Para avaliar a eficácia da detecção e quantificação de defeitos em sinais de engrenamento no domínio biespectral serão consideradas duas abordagens:

Uma em que se considera a soma de todas as magnitudes dos biespectros de uma determinada marcha em relação às frequências de engrenamento de cada marcha. Neste caso os biespectros serão calculados para cada marcha, fixando-se a primeira frequência de engrenamento ($f_1 = f_{eng}$) em relação às demais frequências de engrenamento das outras marchas.

Na segunda abordagem são consideradas as maiores amplitudes dos biespectros obtidos para a primeira e segunda frequência de engrenamento de cada marcha. Para isto foram considerados os biespectros cuja soma das amplitudes corresponda a noventa por cento do total.

3.4.3 - Soma da magnitude dos biespectros

Inicialmente considerou-se a soma da magnitude dos biespectros em função das frequências de engrenamento e seus harmônicos para cada um dos sinais sintetizados. Na figura 3.4.1 são apresentadas as somas das magnitudes dos biespectros para a primeira marcha. Ou seja, f_1 igual a 220 Hz e f_2 assumindo os valores de 440 Hz, 420 Hz, 840 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 640 Hz e 1280 Hz.

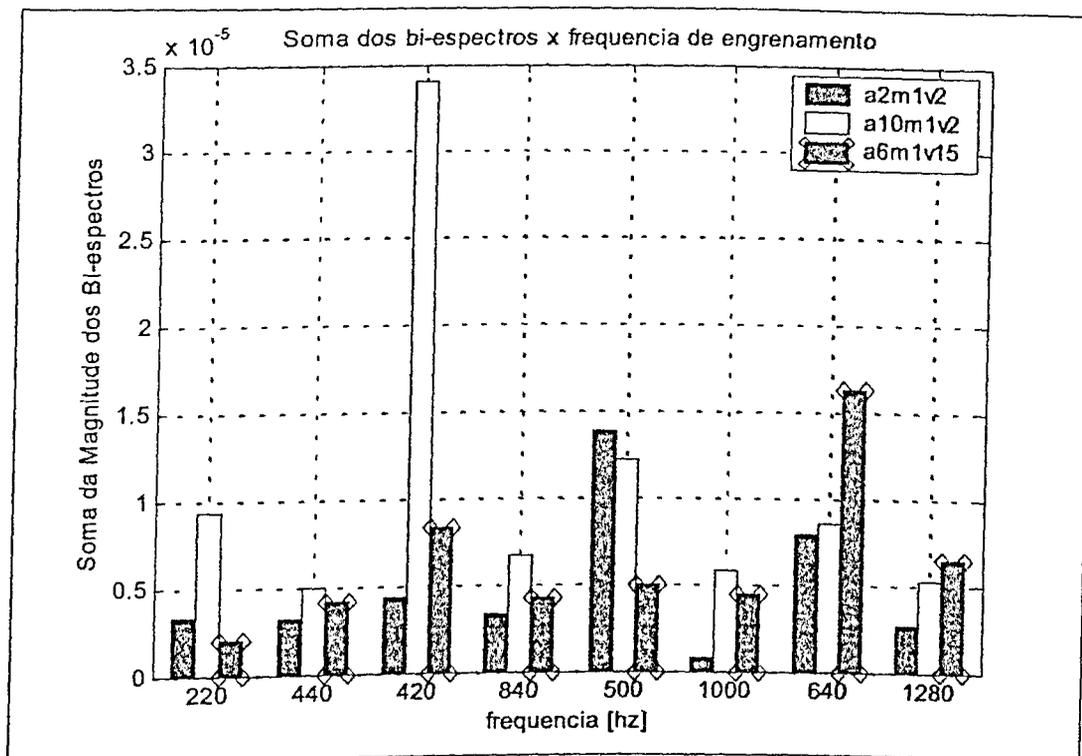


Figura 3.4.1 – Soma das magnitudes dos biespectros para a primeira marcha

Em todas as frequências consideradas, exceto para a de 500 Hz observa-se para o sinal de vibração com mesmo fator de multiplicação das amplitudes, que um aumento no fator de modulação de 2% para 10% implicou em um acréscimo da soma das magnitudes dos biespectros. Contudo, para o sinal com fator de modulação em amplitude igual a 6% e fator de multiplicação de 15%, a soma das magnitudes dos biespectros foi menor do que para o sinal cujo fator de modulação é de 2%, exceto para as frequências relativas à quarta marcha. A soma das magnitudes dos biespectros para o sinal com fator de modulação de 6% e fator de multiplicação das amplitudes de 15% foi inferior à soma para o sinal com fator de modulação e multiplicação de 2%, sendo que o mesmo apenas não ocorreu para as frequências de 640 Hz e 1280 Hz.

Na figura 3.4.2 são apresentados os valores da soma das magnitudes dos biespectros para a segunda marcha. Ou seja, f_1 igual a 420 Hz e f_2 assumindo os valores de 220 Hz, 240 Hz, 420 Hz, 840 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 640 Hz e 1280 Hz.

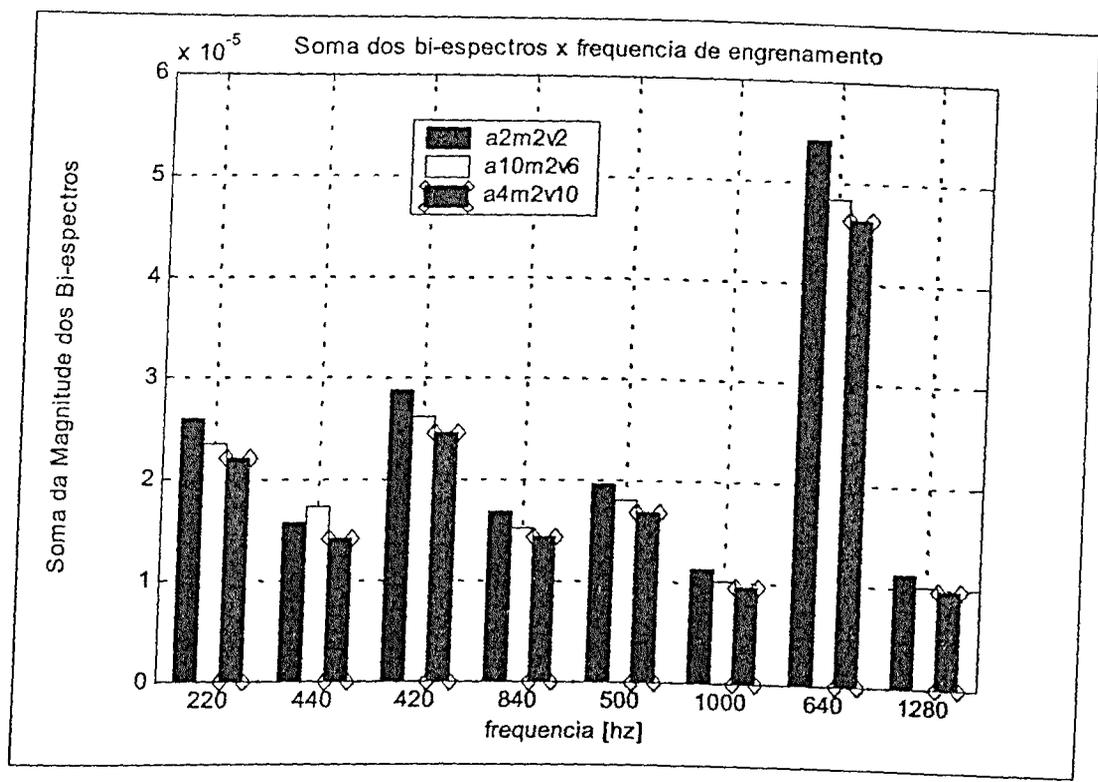


Figura 3.4.2 – Soma das magnitudes dos biespectros para a segunda marcha

Neste caso, para todas as frequências de engrenamento, exceto para a segunda frequência de engrenamento da primeira marcha (440 Hz), a soma dos biespectros relativa ao sinal de fator de modulação de 2% foi maior do que para o sinal com fator de modulação de 10%. Considerando-se o sinal com fator de modulação de 10% em relação ao sinal com fator de modulação de 4%, a soma das magnitudes dos biespectros do primeiro foi superior à do segundo, independentemente do fator de multiplicação das amplitudes e da frequência de engrenamento. É interessante notar que o comportamento da soma dos biespectros para quase todas as frequências é inversamente proporcional ao fator de multiplicação das amplitudes. A única exceção para isto ocorre para a frequência de 440 Hz.

Os valores da soma dos biespectros da terceira marcha em função das demais frequências de engrenamento são mostrados na figura 3.4.3.

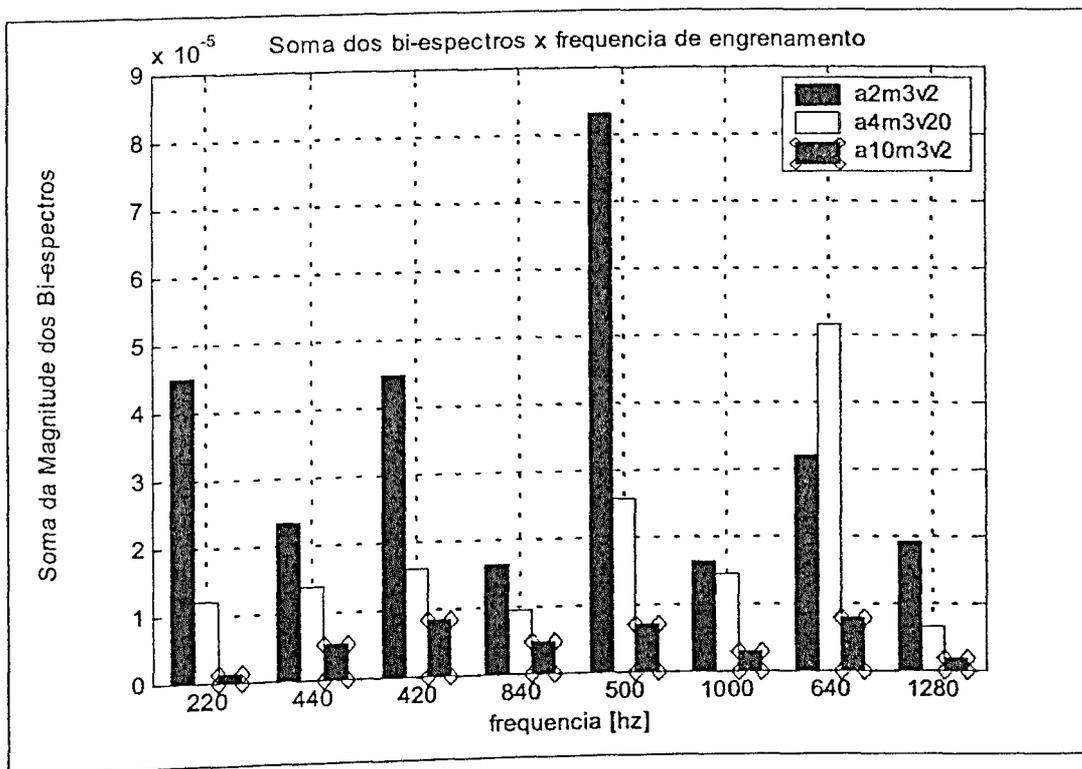


Figura 3.4.3 - Soma das magnitudes dos biespectros para a terceira marcha

Da figura 3.4.3, com exceção da primeira frequência de engrenamento da quarta marcha (640 Hz), nota-se um comportamento inversamente proporcional da soma da magnitude dos biespectros em relação ao fator de modulação em amplitude, independente do fator de multiplicação das amplitudes. Isto fica evidenciado para os sinais com fator de modulação de 2% e 10%, os quais apresentam o mesmo fator de multiplicação de amplitude.

Na figura 3.4.4 são apresentados os valores da soma dos biespectros em função da frequência de engrenamento para a quarta marcha. Para avaliar a influência do fator de modulação em amplitude foram considerados os sinais com o fator de multiplicação da amplitude de 2%, e com fatores de modulação iguais a 2% e 10%.

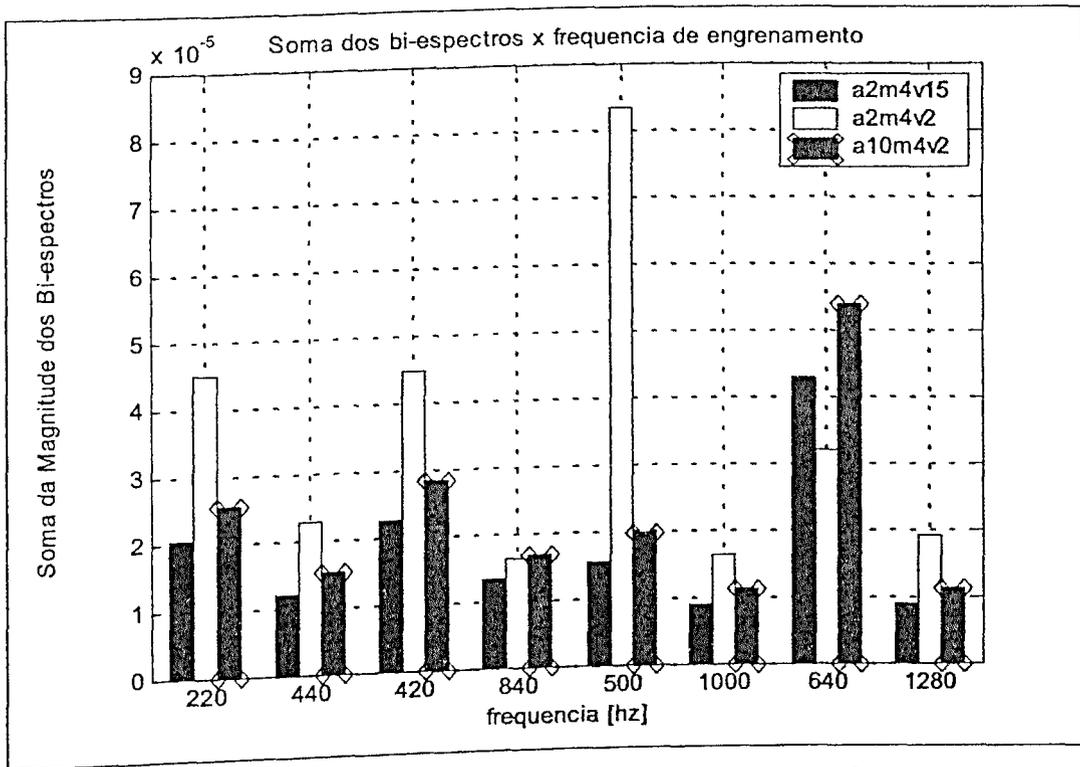


Figura 3.4.4 – Soma da magnitude dos biespectros para a quarta marcha

Da figura 3.4.4 observa-se um comportamento inversamente proporcional do fator de modulação em relação à soma da magnitude dos biespectros para as frequências de engrenamento de 220 Hz, 440 Hz, 420 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 1280 Hz.

Considerando os sinais com fator de modulação em amplitude de 2% e com fatores de multiplicação de 2% e 15%, nota-se um comportamento inversamente proporcional da soma dos biespectros em relação ao fator de multiplicação, exceto para a primeira frequência de engrenamento da quarta marcha (640 Hz).

Como pode ser visto das figuras 3.4.1 a 3.4.4, esta abordagem não permite determinar qual marcha apresenta a maior modulação, pois na maioria dos casos avaliados a soma da magnitude dos biespectros calculada para as frequências de engrenamento associadas a cada marcha não apresenta um padrão definido.

3.4.4 - Biespectros calculados fixando a frequência de engrenamento

Desta feita o bi-espectro foi calculado fixando a primeira e segunda frequência de engrenamento da marcha que está sob análise. As amplitudes dos biespectros foram consideradas até que a soma destas atingisse 90% do total, considerando assim, somente as frequências que apresentam uma contribuição significativa.

Nas figuras 3.4.5 são apresentados os gráficos das magnitudes dos biespectros associados à primeira marcha, nos quais foram mantidas respectivamente, a primeira e a segunda frequência de engrenamento.

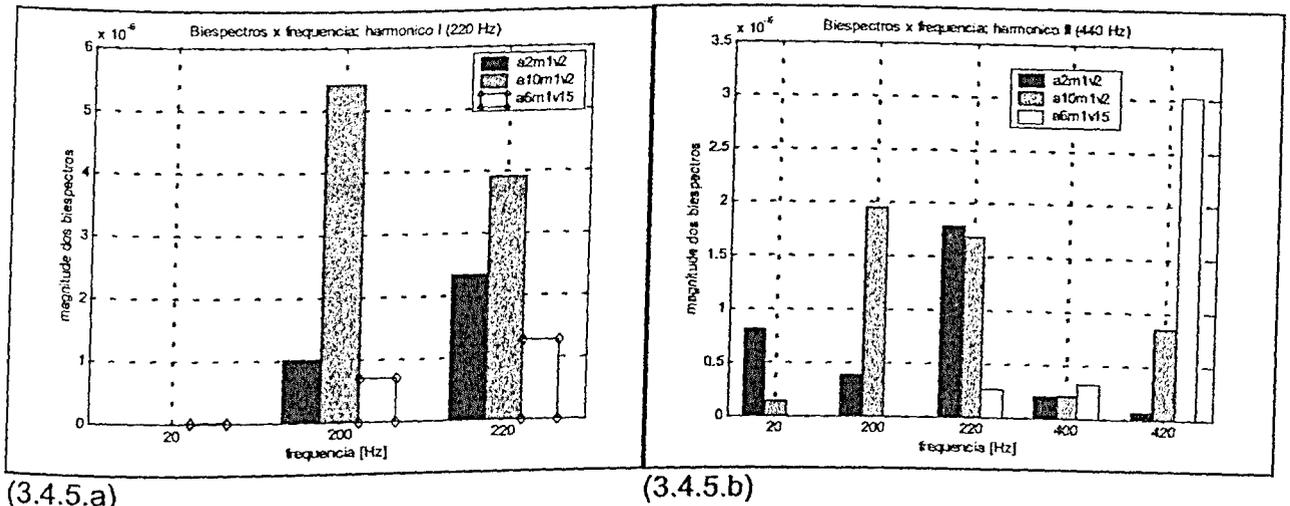
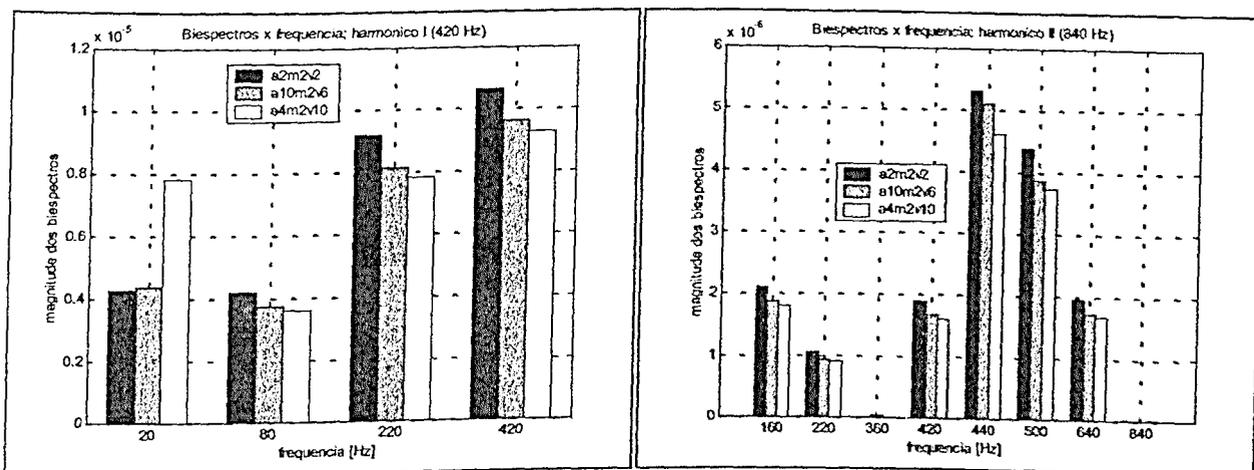


Figura 3.4.5 – Magnitudes dos biespectros em função da freqüência de engrenamento da primeira marcha.

Na figura 3.4.5.a, o biespectro foi calculado fixando-se a freqüência de 220 Hz e variando-se as demais. O bi-espectro obtido para a freqüência de 200 Hz reflete o acoplamento entre a primeira freqüência de engrenamento da primeira marcha, sua primeira banda lateral à esquerda e a primeira freqüência de engrenamento da segunda marcha (420 Hz). Para os sinais de mesmo fator de multiplicação observa-se que quanto maior a modulação, maior a magnitude do bi-espectro. Contudo, para o sinal de fator de modulação de 6% e fator de amplitude de 15% vê-se que a magnitude do biespectro é inferior aquelas obtidas para o sinal com fator de modulação 2%.

No gráfico da figura 3.4.5.b a magnitude do bi-espectro para os sinais com fator de multiplicação de 2%, para as freqüências de 200 Hz, 400 Hz e 420 Hz aumenta juntamente com o aumento da modulação. Para a primeira freqüência de engrenamento da primeira marcha (220 Hz) existe uma redução do valor da amplitude do biespectro com o aumento da modulação. De modo diferente do que ocorreu com os biespectros calculados quando se fixou a primeira freqüência de engrenamento, a amplitude do biespectro para o sinal com fator de modulação de 6% só foi inferior a dos outros dois sinais para a freqüência de 220 Hz.

Nas figuras 3.4.6.a e 3.4.6.b são apresentados os biespectros para os sinais da segunda marcha, calculados fixando-se suas freqüências de engrenamento (420 Hz e 840).



(3.4.6.a)

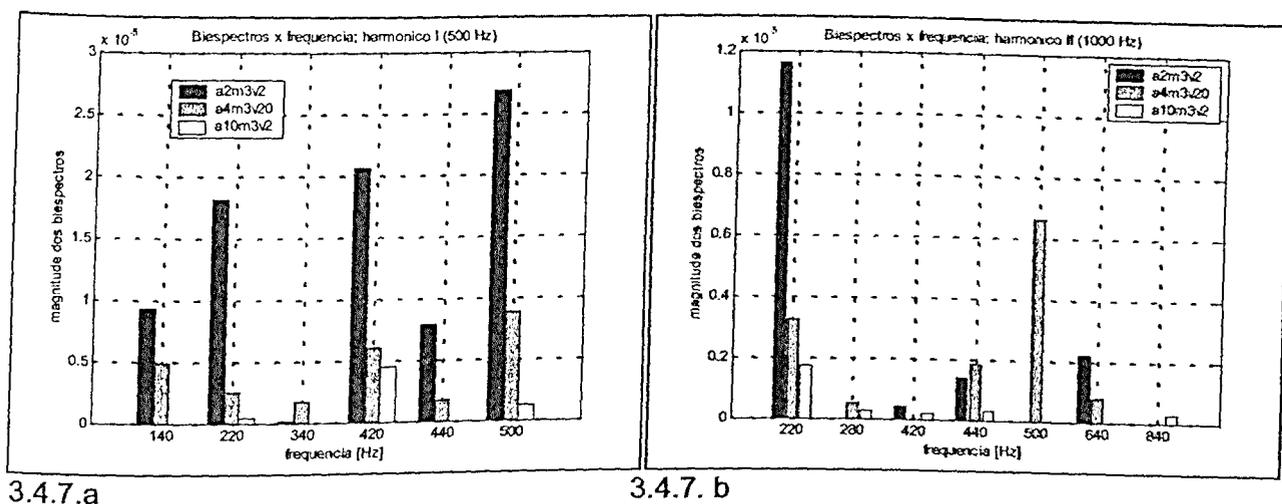
(3.4.6.b)

Figuras 3.4.6 – Magnitudes dos biespectros em função da freqüência de engrenamento para a segunda marcha.

Neste caso, como pode ser visto na figura 3.4.6.a, o sinal sintetizado com o fator de modulação de 2% apresentou o maior valor de amplitude para as freqüências de 80 Hz, 220 Hz e 420 Hz, que estão acopladas em fase com a primeira freqüência da segunda marcha e respectivamente com as freqüências de 500 Hz, 640 Hz e 840 Hz. Para estas freqüências (80 Hz, 220 Hz e 420 Hz) pode-se inferir que um acréscimo no fator de multiplicação da amplitude reflete numa redução da magnitude dos biespectros.

Um comportamento semelhante ocorre ao se calcular o biespectro mantendo fixa a segunda freqüência de engrenamento da segunda marcha, contudo neste caso a maior magnitude do bi-espectro se dá para os sinais com fator de modulação de 2%, sendo que o aumento da amplitude do biespectro com a elevação do fator de multiplicação ocorre para todas as freqüências mostradas.

Os biespectros dos sinais simulados da terceira marcha obtidos fixando-se a primeira e segunda freqüências de engrenamento são mostrados respectivamente nas figuras 3.4.7.a e 3.4.7.b.



Figuras 3.4.7 – Magnitudes dos biespectros em função da frequência de engrenamento para a terceira marcha.

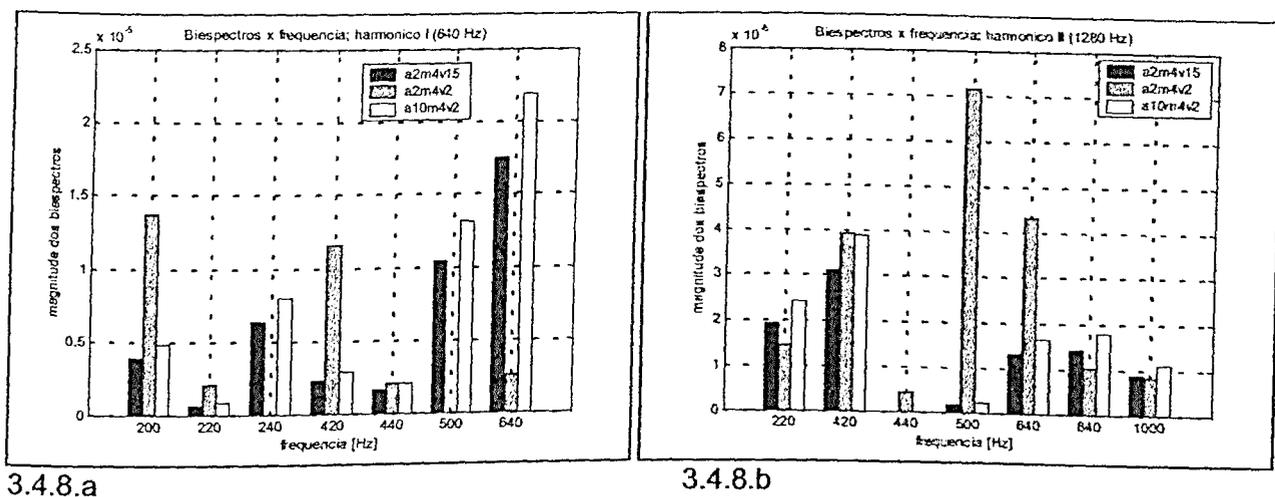
Para os biespectros da figura 3.4.7.a, considerando os sinais com fator de multiplicação de 2%, observa-se em todas as frequências, que um aumento da modulação acarreta numa redução da magnitude dos biespectros. Uma análise conjunta dos três sinais mostra uma elevação do biespectro com o aumento do grau de modulação, independente do fator de modulação em amplitude, para todas as frequências, com exceção feita apenas para a frequência de 340 Hz.

De forma geral observa-se que quanto maior os fatores de modulação e de multiplicação do sinal menor a magnitude do bi-espectro.

Para os biespectros calculados fixando a segunda frequência de engrenamento apresentados na figura 3.4.7.b, observa-se para os sinais de mesmo fator de multiplicação, que um aumento neste fator implica numa redução da amplitude do biespectro, como pode ser visto para as frequências de 220 Hz, 280 Hz, 420 Hz e 640 Hz.

Comparando-se as magnitudes dos biespectros para os sinais gerados com fatores de modulação de 2% e 4% para a frequência de 440 Hz, observa-se um comportamento oposto ao mencionado para as frequências de 220 Hz, 280 Hz, 420 Hz e 640 Hz. Isto pode ser atribuído à influência do fator de multiplicação de amplitude, indicando que a análise deve ser realizada levando-se em conta os dois fatores conjuntamente.

Respectivamente, nas figuras 3.4.8.a e 3.4.8.b são apresentados os gráficos dos biespectros dos sinais simulados de vibração para a quarta marcha.



3.4.8.a

3.4.8.b

Figuras 3.4.8 – Magnitude dos bispectros em função da frequência de engrenamento para a quarta marcha.

Na figura 3.4.8.a, analisando-se os sinais com o mesmo fator de modulação em amplitude e diferentes fatores de multiplicação podemos avaliar o efeito da diferença de amplitude nos bispectros. Para as frequências de 200 Hz, 220 Hz, 420 Hz e 440 Hz, quanto maior o fator de multiplicação, menor a magnitude do bispectro.

De outro modo, o comportamento do bispectro em relação à variação do fator de modulação pode ser avaliado pela observação dos sinais simulados com fator de multiplicação de 2% e fatores de amplitude de 2% e 10%. Para estes sinais, nas frequências de 200 Hz, 220 Hz e 420 Hz nota-se um acréscimo no valor dos bispectros com a redução do fator de multiplicação.

É interessante observar o comportamento do bispectro para a frequência de 640 Hz, acoplada em fase com a segunda frequência de engrenamento da quarta marcha, onde prevalece o fator de modulação. Nesta frequência podemos ver que a maior amplitude ocorre para o sinal de maior fator de modulação – 10%. Vê-se também que para os sinais com fator de modulação de 2%, o que apresentou maior amplitude foi aquele com o maior fator de multiplicação.

Para a segunda frequência de engrenamento, quando se analisa o efeito do fator de multiplicação nos sinais de mesma modulação observa-se um comportamento indefinido. Para as frequências de 420 Hz, 500 Hz e 640 Hz têm-se os maiores valores dos bispectros associados ao menor fator de multiplicação. Todavia, para as frequências de 220 Hz, 840 Hz e 1000 Hz, observa-se o comportamento inverso.

Nos sinais gerados com o fator de multiplicação de 2%, nota-se também uma indefinição no comportamento dos bispectros. Para as frequências de 220 Hz, 840 Hz e 1000 Hz, quanto maior o fator de multiplicação maior a amplitude do bispectro. Contudo, o mesmo não se

confirma para as frequências de 420 Hz e 500 Hz. Talvez isto possa ser explicado pelo fato de que o biespectro calculado para qualquer uma destas frequências com a segunda frequência de engrenamento da quarta marcha (1280 Hz), exceda as frequências significativas presentes no sinal, implicando assim na ausência de um sentido válido para fins de análise.

3.4.5 - Conclusões

De forma geral, o aumento da modulação ou da amplitude do sinal simulado de engrenamento implicou numa redução da soma das amplitudes dos biespectros e da sua magnitude, como pôde ser observado respectivamente nas figuras 3.4.1 a 3.4.4 e 3.4.5 a 3.4.8. Entretanto, as exceções presentes em todos os casos não permitem considerar somente esta ferramenta para a obtenção de um diagnóstico confiável, servindo sim como mais um indicador ao qual se devem juntar outros.

Outro fato que deve ser ressaltado é que nenhuma das duas abordagens permitiu determinar qual marcha apresentou o maior grau de modulação.

Capítulo IV

Análise de Sensibilidade para a Metodologia de Estimadores Estatísticos Aplicados às Parcelas Temporais da Transformada Choi-Williams de Sinais de Engrenamento

Neste capítulo é feita uma análise de sensibilidade da aplicação de indicadores temporais kurtosis e energia, aplicados aos vetores de dados obtidos pelo seccionamento nas freqüências de interesse da Transformada Choi-Williams dos sinais de engrenamento.

Na simulação dos sinais de engrenamento com desalinhamento foram consideradas oscilações nas amplitudes das freqüências de engrenamento de até 20%, logo, as amplitudes dos segundo e terceiro harmônicos da freqüência de rotação ou de engrenamento apresentam acréscimos de 20% a 80% em relação à amplitude das mesmas freqüências para os sinais considerados bons. Pelo mesmo motivo, para o defeito de excentricidade a amplitude da freqüência fundamental de engrenamento é multiplicada por um fator que varia de 2,4 a 3,6 e as amplitudes das bandas laterais serão 56% a 84% maiores que as amplitudes das freqüências correspondentes aos sinais sem defeito.

Para a segunda, terceira e quarta marchas foram gerados sinais sem defeito com variação de amplitude de até 20% para a freqüência de engrenamento e seus respectivos harmônicos. Considerando uma amplitude unitária, as amplitudes do conjunto de sinais bons variaram de 0,8 a 1,2 mm. Assumindo que na realidade não existam sistemas de engrenamento perfeito, as amplitudes das bandas laterais dos sinais bons foram adotadas como 10% da amplitude da respectiva freqüência de engrenamento ou harmônico.

Os sinais defeituosos para as mesmas marchas foram gerados com fatores de amplitude iguais a 1,4; 1,8; 2,2 e 2,6 e para cada fator de amplitude, foram adotados como fatores de banda lateral os valores 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8.

Todos os sinais gerados, tanto os sem defeito como os defeituosos, foram contaminados com ruídos aleatórios aditivos em quatro níveis. O primeiro nível corresponde a um fator de ruído, f_r , de 0,2, o que em média representa 0,5% do nível médio quadrático do sinal. O segundo nível corresponde a um fator de ruído de 0,4, o que em média representa 2,0% do nível de energia do sinal. Os dois níveis restantes correspondem aos fatores de ruído 0,8 e 1,2, que correspondem, respectivamente, a 5,0% e 15,0% do nível total de energia do sinal sem ruído. Para o grupo de sinais sem defeito, além destes fatores de ruído considerados, foi utilizado um fator de ruído igual a 0,1, que em média corresponde a 0,1% do nível de energia do sinal sem ruído.

Após a aplicação da transformada Choi-Williams aos sinais, foram construídos vetores com as linhas da matriz associadas às frequências de interesse. Estes vetores representam o comportamento temporal do sinal nestas frequências, as quais são: frequência fundamental de engrenamento e seu primeiro harmônico, bem como as frequências de suas respectivas bandas laterais à esquerda e à direita.

Em seguida foram calculados os indicadores não paramétricos tradicionalmente usados em manutenção, a kurtosis e o nível médio quadrático ou energia do sinal para cada um dos vetores encontrados.

Para os sinais bons de cada marcha foram calculados, as médias e os desvios padrões de cada um destes indicadores. Para facilitar a análise, os valores de kurtosis e de energia estimados para todos os sinais foram normalizados em relação à média e expressos em função dos desvios padrões calculados para os sinais bons.

$$\text{valor normalizado} = \frac{\text{valor} - \mu}{\sigma} \quad (4.1)$$

A classificação se faz segundo a comparação entre os valores estimados para os sinais defeituosos e para os sinais bons, tendo como limite aceitável o valor de uma vez o desvio padrão obtido para os sinais bons. Esta análise foi realizada, em função da variação dos fatores de amplitude, banda lateral e fator de ruído. Os valores estimados dos desvios padrões e das médias para os sinais bons da segunda, terceira e quarta marchas são mostrados nas tabelas 4.1 a 4.3.

Para a segunda marcha, na tabela 4.1, os limites inferiores e superiores para as médias da kurtosis com base em uma amostra de 80 exemplares e confiança de 95% são respectivamente: 2,622 e 2,696 para a primeira frequência de engrenamento; 2,668 e 2,758 para a segunda frequência de engrenamento; 6,925 e 7,193 para a banda lateral da primeira frequência de engrenamento e 8,401 e 9,205 para a banda lateral da segunda frequência de engrenamento. Para a energia, com base na mesma confiança e tamanho da amostra temos respectivamente os seguintes limites inferiores e superiores: 297,909 e 336,157 para a primeira frequência de engrenamento; 163,326 e 187,294 para a segunda frequência de engrenamento; 84,605 e 88,587 para a banda lateral da primeira frequência de engrenamento e 21,755 e 23,657 para a banda lateral da segunda frequência de engrenamento.

Tabela 4.1 – Média (μ) e desvio padrão (σ) dos indicadores para a segunda marcha.

Indicador	1ª Freq. Engrenam.		2ª Freq. Engrenam.		Banda lat. (1ª feng)		Banda lat. (2ª feng)	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
kurtosis	2,659	0,170	2,713	0,207	7,059	0,610	8,803	1,883
energia	317,033	87,269	175,310	54,687	86,596	9,084	22,706	4,338

Para a terceira marcha, na tabela 4.2, os limites inferiores e superiores para as médias da kurtosis com base em uma amostra de 80 exemplares e confiança de 95% são respectivamente: 2,219 e 2,261 para a primeira freqüência de engrenamento; 2,741 e 2,873 para a segunda freqüência de engrenamento; 7,210 e 7,560 para a banda lateral da primeira freqüência de engrenamento e 11,953 e 12,651 para a banda lateral da segunda freqüência de engrenamento. Para a energia, com base na mesma confiança e tamanho da amostra temos respectivamente os seguintes limites inferiores e superiores: 335,304 e 345,9904 para a primeira freqüência de engrenamento; 168,969 e 173,555 para a segunda freqüência de engrenamento; 73,637 e 76,469 para a banda lateral da primeira freqüência de engrenamento e 28,886 e 29,976 para a banda lateral da segunda freqüência de engrenamento.

Tabela 4.2 – Média (μ) e desvio padrão (σ) dos indicadores para a terceira marcha.

Indicador	1ª Freq. Engrenam.		2ª Freq. Engrenam.		Banda lat. (1ª feng)		Banda lat. (2ª feng)	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
kurtosis	2,240	0,094	2,807	0,300	7,385	0,795	12,302	1,592
energia	340,647	24,384	171,262	10,463	75,053	6,463	29,431	2,488

Para a quarta marcha, na tabela 4.3, os limites inferiores e superiores para as médias da kurtosis com base em uma amostra de 80 exemplares e confiança de 95% são respectivamente: 2,773 e 2,899 para a primeira freqüência de engrenamento; 2,733 e 2,827 para a segunda freqüência de engrenamento; 8,326 e 8,722 para a banda lateral da primeira freqüência de engrenamento e 7,347 e 8,071 para a banda lateral da segunda freqüência de engrenamento. Para a energia, com base na mesma confiança e tamanho da amostra temos respectivamente os seguintes limites inferiores e superiores: 335,304 e 345,990 para a primeira freqüência de engrenamento; 168,969 e 173,555 para a segunda freqüência de engrenamento; 73,637 e 76,469 para a banda lateral da primeira freqüência de engrenamento e 28,886 e 29,976 para a banda lateral da segunda freqüência de engrenamento.

Tabela 4.3 – Média (μ) e desvio padrão (σ) dos indicadores para a quarta marcha.

Indicador	1ª Freq. Engrenam.		2ª Freq. Engrenam.		Banda lat. (1ª feng)		Banda lat. (2ª feng)	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
kurtosis	2,836	0,287	2,780	0,215	8,524	0,905	7,709	1,652
energia	299,573	74,085	75,051	18,756	49,699	7,237	10,635	2,215

Para facilitar a análise dos resultados, devido ao grande volume de informações, será utilizada uma ferramenta estatística gráfica denominada *box-plot*, gráfico-caixa ou diagrama em caixas (Barbetta, 1999; Lima et alli, 2002, Levine et alli, 1998). Esta representação é apropriada quando se deseja apresentar aspectos relevantes de uma distribuição de freqüências.

As linhas, inferior e superior da caixa representam respectivamente os vigésimo quinto e septuagésimo quinto percentis que delimitam os valores abaixo dos quais encontram-se respectivamente, 25% e 75% dos pontos da distribuição. A região limitada pela parte superior e inferior da caixa definem a faixa de interquartil, que representa a faixa dos 50% dos valores mais típicos da distribuição. A linha situada entre os dois quartis corresponde à mediana da amostra, sendo que, esta dá uma noção da simetria dos dados. Os limites máximo e mínimo mostram a extensão do resto da amostra, desde que não existam pontos que excedam os valores normais esperados. Por definição, são considerados pontos discrepantes aqueles que apresentarem ocorrências 50% maiores que os limites da caixa. Estes pontos anormais podem ser resultado de uma entrada incorreta de dados, ou de uma alteração no sistema que gerou os dados ou ainda devido a erros de medição. Tradicionalmente os *box-plots* não apresentam entalhe, contudo estes são introduzidos com o intuito de representar graficamente um intervalo de confiança a respeito da mediana da amostra. Finalmente, além de facilitar a análise dos dados, uma comparação de dois gráficos-caixas representa o equivalente gráfico de um teste de hipótese usando distribuição T-Student. Na figura 4.1.1 é apresentada uma representação genérica de um diagrama em caixa.

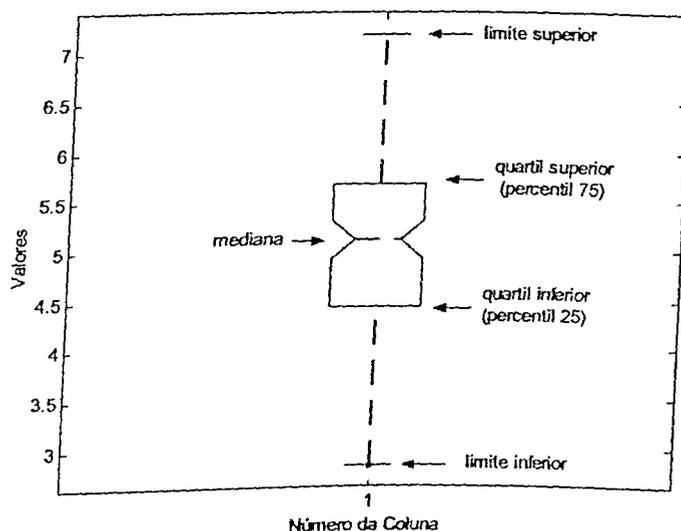


Figura 4.1.1 – Gráfico-caixa e seus elementos básicos.

Para resumir o que se representa graficamente em um gráfico-caixa, na figura 4.1.2 são mostrados quatro tipos diferentes de distribuições e seus correspondentes gráficos-caixas.

Para um conjunto de dados perfeitamente simétrico, como é o caso da figura 4.1.2 (a) e (d), a média aritmética e a mediana são as mesmas. Além disso, o comprimento da linha pontilhada esquerda será igual ao comprimento da linha pontilhada direita, e a linha mediana divide a caixa ao meio. Por outro lado, quando o conjunto de dados for assimétrico à esquerda como mostrado na figura 4.1.2 (b), as poucas observações inferiores distorcem a média aritmética em direção à esquerda. Neste caso a média aritmética é menor que a mediana e a moda. Para essa distribuição assimétrica à esquerda, podemos observar que a natureza assimétrica do conjunto de dados indica que existe um forte aglomerado de observações entre a ponta direita da caixa e o final da linha pontilhada (limite superior) com 75% de todos os valores de dados. Portanto, a linha tracejada à esquerda contém somente a distribuição dos 25% de observações.

Se o conjunto de dados for assimétrico à direita, como mostrado na figura 4.1.2 (c), as poucas observações superiores distorcem a média aritmética em direção à ponta direita. Neste caso a média aritmética é maior que a mediana e a moda. Para o conjunto de dados assimétrico à direita, na figura 4.1.2 (c), a concentração de pontos de dados será do lado esquerdo do gráfico-caixa. Aqui, 75% de todos os valores encontram-se entre o início da linha pontilhada esquerda (limite inferior) e a ponta direita da caixa, e os 25% das observações restantes encontram-se dispersos ao longo da linha pontilhada à direita.

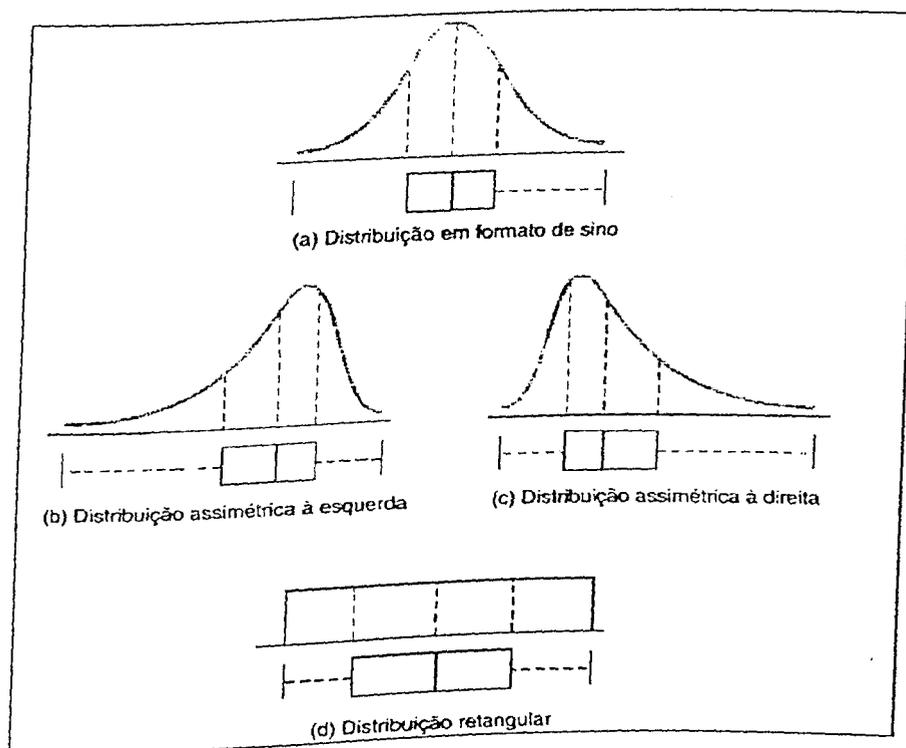


Figura 4.1.2 – Distribuições hipotéticas examinadas através de seus gráficos-caixas.

Fonte: Estatística: teoria e aplicações, Levine, D. M, Berenson, M. L., Stephan, D., 1998, p. 147

Na avaliação da análise de sensibilidade foram consideradas três estratégias aplicadas aos sinais simulados da segunda, terceira e quarta marchas. Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados relativos à segunda marcha, sendo que os resultados obtidos para a terceira e quarta marcha são apresentados no anexo I.

Primeiramente, realizou-se a comparação dos sinais com mesmo fator de ruído e fatores de banda lateral e amplitude diferentes para cada uma das marchas, o que possibilitou quantificar a influência do ruído sobre os indicadores de estado considerados (kurtosis e energia). Em outra etapa, para verificar o comportamento da influência das bandas laterais, foram considerados sinais com mesmo fator de banda lateral e fatores de ruído e amplitude diferentes, permitindo assim analisar a influência da banda lateral sobre a kurtosis e a energia. Finalmente, para conclusão da análise, o comportamento dos estimadores foi avaliado conjuntamente em função dos fatores de banda lateral e de ruído para a primeira e segunda frequência de engrenamento e suas respectivas bandas laterais.

4.1) Avaliação da influência do ruído sobre os estimadores.

4.1.1) Análise para os sinais simulados da segunda marcha.

a) Comportamento das kurtosis estimadas.

Nas figuras (4.2.a) a (4.2.d), são apresentados os gráficos da kurtosis para a segunda marcha. Os gráficos da figura (4.2.a) mostram que os valores das medianas encontram-se abaixo de 1σ para todos os fatores de amplitudes dos sinais considerados bons ($f_a = 0,8$ a $1,2$). Os sinais defeituosos ($f_a = 1,4$ a $2,6$) também possuem medianas localizadas abaixo de 1σ . Contudo para os fatores de amplitude $1,4$ e $2,6$ tem-se uma distribuição mais simétrica dos valores em relação às medianas e um número significativo de ocorrências inferiores a 1σ . Para os fatores de amplitude de $1,8$ e $2,2$ há uma concentração de valores abaixo das medianas, como pode ser observado pela assimetria dos diagramas.

Na figura (4.2.b) os gráficos-caixas dos sinais sem defeito gerados com um fator de ruído igual a $0,4$ apresentam medianas menores que $0,5\sigma$. Observa-se ainda que mais de 75% das ocorrências encontram-se abaixo de 1σ , sendo que, exceto para $f_a = 1,0$ todos os limites máximos são inferiores a este valor.

Dos sinais defeituosos, apenas aquele com $f_a = 1,8$ apresenta mediana superior a 1σ ($1,1\sigma$). Considerando a kurtosis, o maior número de ocorrências para o sinal com $f_a = 1,4$

encontra-se abaixo da mediana, indo de $0,2\sigma$ a $-2,0\sigma$. Para $f_a = 1,8$ vê-se que a maior quantidade de valores se encontra entre 5σ e $1,1\sigma$, para $f_a = 2,2$ o maior número de incidências se dá para valores entre $-1,8\sigma$ e $0,1\sigma$ e finalmente, para $f_a = 2,6$ os limites mostram que 50% dos valores encontram-se entre -3.5σ e 3σ .

Na figura (4.2.c), os valores das medianas dos sinais bons com fator de ruído igual a 0,8 são inferiores a 1σ e independente dos fatores de amplitude a maior parte dos valores encontram-se acima de 1σ ou abaixo de -1σ . Considerando-se ainda os sinais bons, exceto para o fator de amplitude de 0,8, todos os limites superiores dos diagramas estão abaixo de 1σ .

Os valores das medianas de todos os sinais defeituosos são menores que 1σ e para qualquer fator de amplitude o maior número de ocorrências se dá sob sua respectiva mediana.

Para o fator de ruído igual a 1,2 observa-se dos gráficos da figura (4.2.d) uma grande oscilação na posição das medianas. As medianas e todos os 75º percentis dos sinais sem defeito são inferiores a 1σ . Os sinais defeituosos também possuem medianas inferiores a 1σ e a maior quantidade de ocorrências, qualquer que seja o fator de amplitude, situa-se abaixo desta.

De modo geral, independente do fator de ruído, as medianas das kurtosis não apresentam um comportamento monotômico em relação ao fator de amplitude.

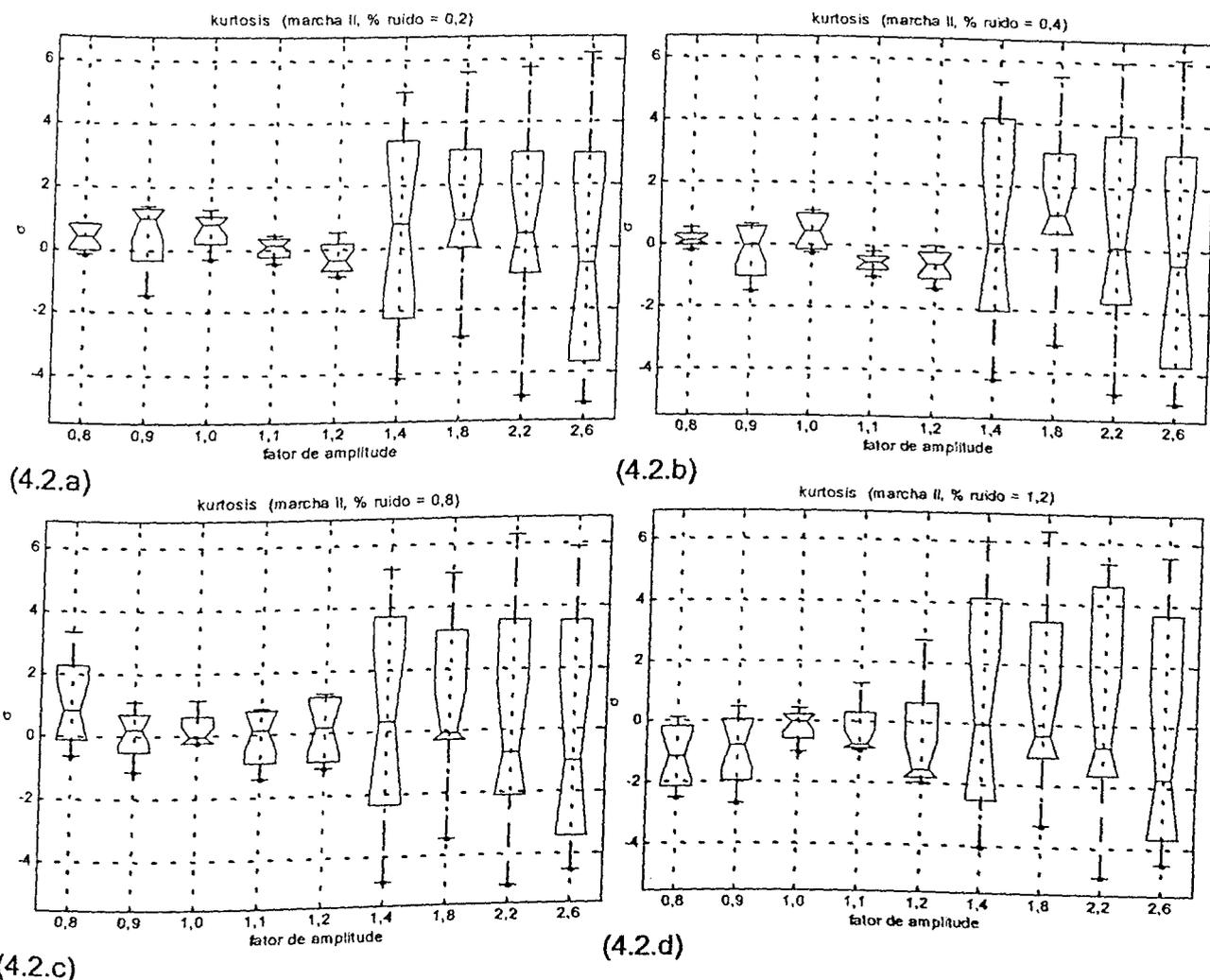


Figura 4.2 – Gráficos-caixas das kurtosis agrupadas segundo o mesmo fator de ruído em função do fator de amplitude (segunda marcha).

b) Comportamento das energias estimadas.

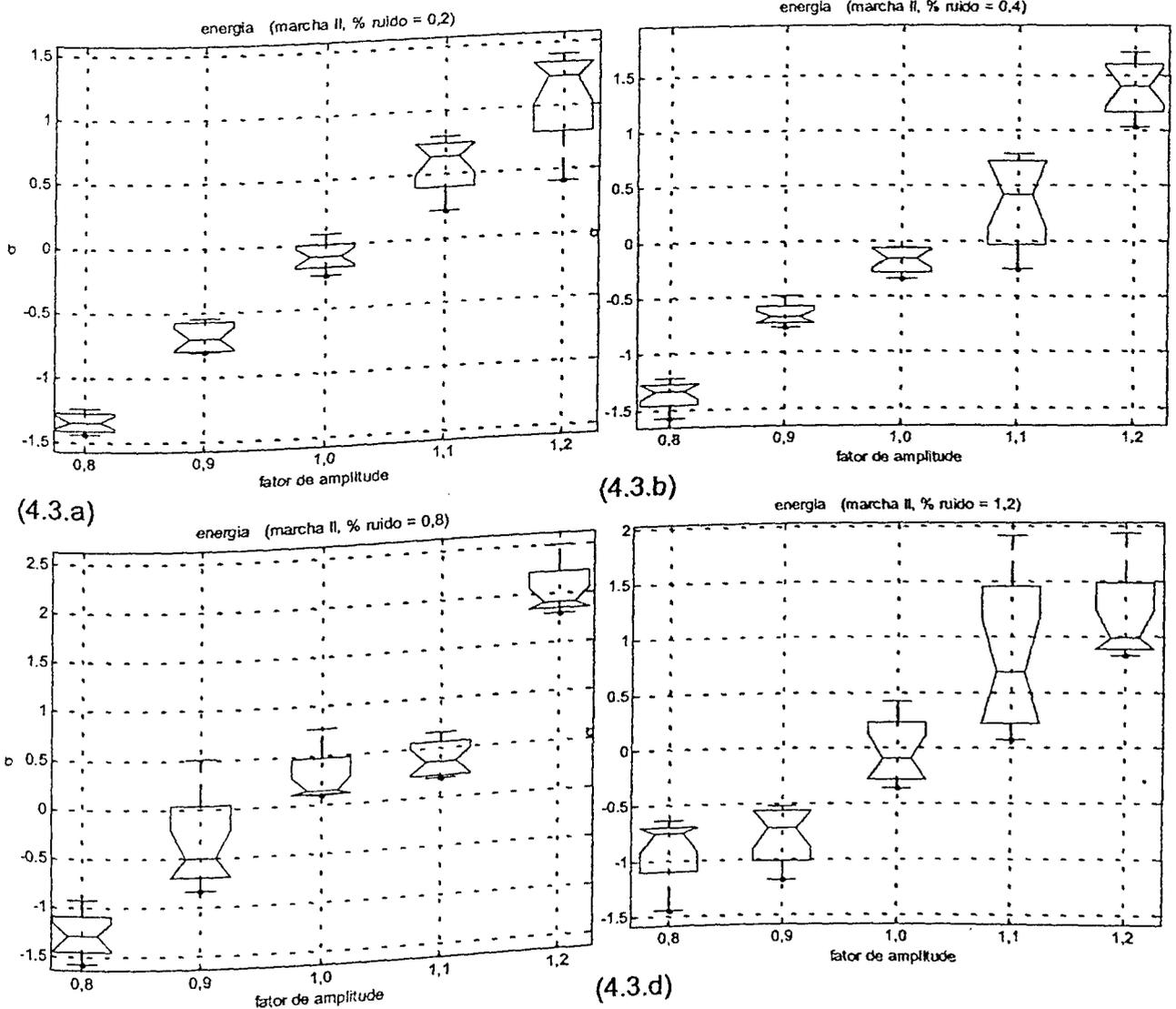
A análise do comportamento da energia das porções temporais dos sinais simulados da segunda marcha pode ser feita a partir das figuras (4.3.a) até (4.3.h). Devido à ordem de grandeza dos valores de energia dos sinais bons em relação aos sinais com defeito, os gráficos-caixas dos sinais bons serão mostrados em separado dos obtidos para os sinais defeituosos com o intuito de facilitar a visualização. Os gráficos-caixas obtidos para os sinais bons são mostrados nas figuras de (4.3.a) a (4.3.d).

Para o fator de ruído igual a 0,2, observa-se nos gráficos dos sinais bons da figura (4.3.a) que todos os valores são menores que 1σ , exceto para o fator de amplitude de 0,5. Verifica-se ainda que as amostras encontram-se bem distribuídas e que as medianas situam-se no centro

dos interquartis. Para $f_a = 1,2$ a mediana tem um valor de $1,2\sigma$ e que a maior parte das ocorrências localizam-se acima deste valor.

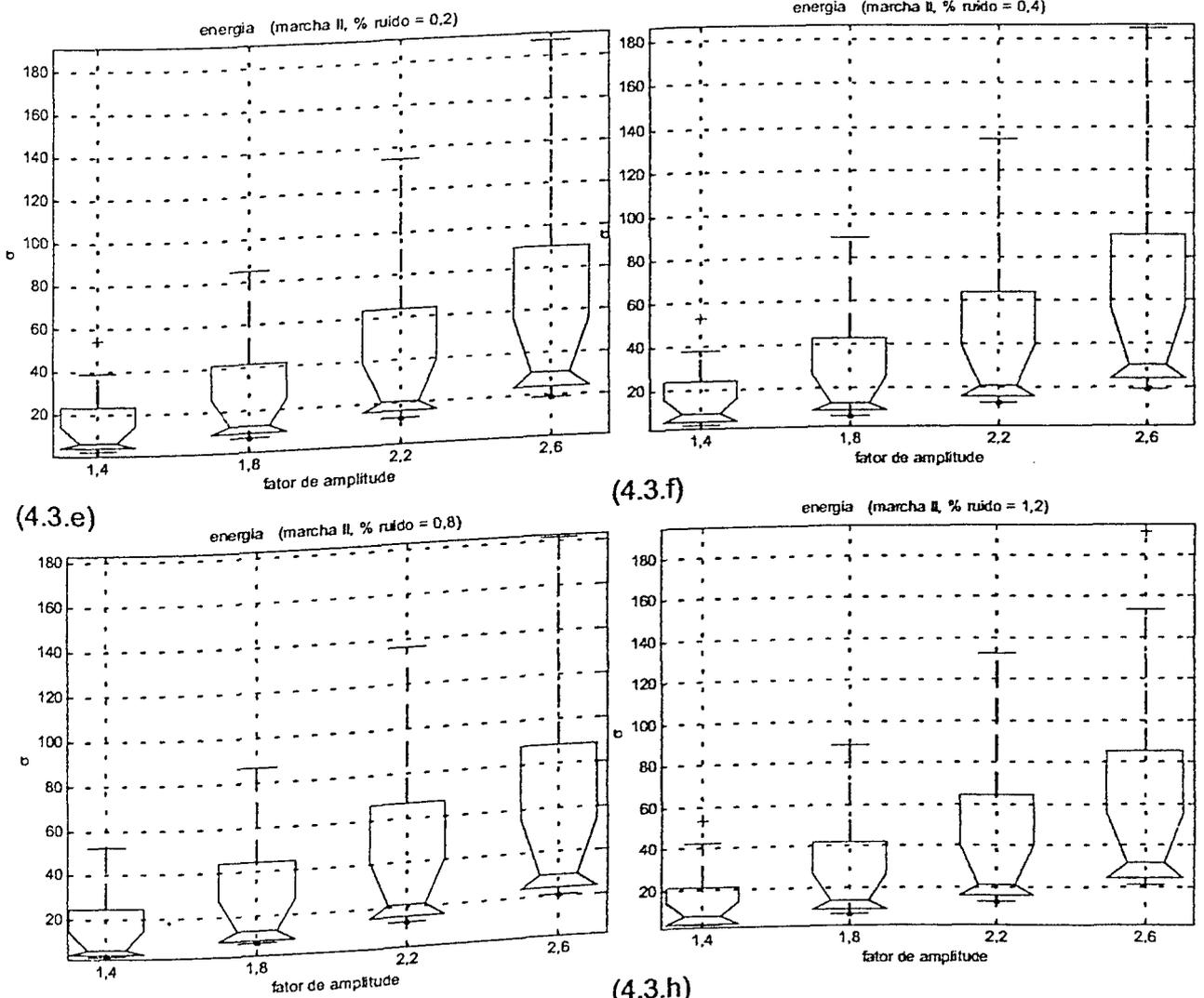
Para o fator de ruído de 0,4, o mesmo comportamento descrito anteriormente é observado nos gráficos dos sinais bons da figura (4.3.b). Entretanto neste caso, todos os valores de energia obtidos para o sinal gerado com fator de amplitude de 1,2 encontram-se acima de 1σ . Este também é o mesmo comportamento presente nos gráficos da figura (4.3.c).

As medianas das energias dos sinais bons simulados com fator de ruído de 1,2 são inferiores a 1σ , a menos para o fator de amplitude de 1,2 cujo valor é de $1,05\sigma$. Os sinais com fatores de amplitude de 0,8 até 1,0 possuem todas as energias menores que 1σ , sendo que para os sinais com fatores de amplitude iguais a 1,1 e 1,2 os valores são superiores a 1σ .



(4.3.c)
 Figura 4.3.1 – Gráficos-caixas das energias agrupadas segundo o mesmo fator de ruído versus fator de amplitude (sinais bons, segunda marcha)

Os gráficos-caixas das energias das parcelas temporais dos sinais defeituosos são apresentados nas figuras de (4.3.e) até (4.3.h). Os sinais defeituosos obtidos com fator de ruído de 0,2 a 1,2 apresentam medianas das energias maiores que 5σ , sendo seus valores respectivamente: 7σ , 13σ , 21σ e 31σ . Todos os limites inferiores estão situados acima de $4,5\sigma$ e que a maior parte das ocorrências, dentro dos interquartis, situam-se abaixo das respectivas medianas. Importante se ressaltar o comportamento crescente da energia em função do aumento do fator de amplitude e a insensibilidade deste indicador aos diferentes níveis de ruído.



(4.3.g) (4.3.h)
 Figura 4.3.2 – Gráficos-caixas das energias agrupadas segundo o mesmo fator de ruído versus fator de amplitude (sinais defeituosos, segunda marcha).

4.2) Avaliação da influência dos fatores de modulação sobre os estimadores.

4.2.1) Análise para os sinais simulados da segunda marcha.

a) Comportamento das kurtosis estimadas.

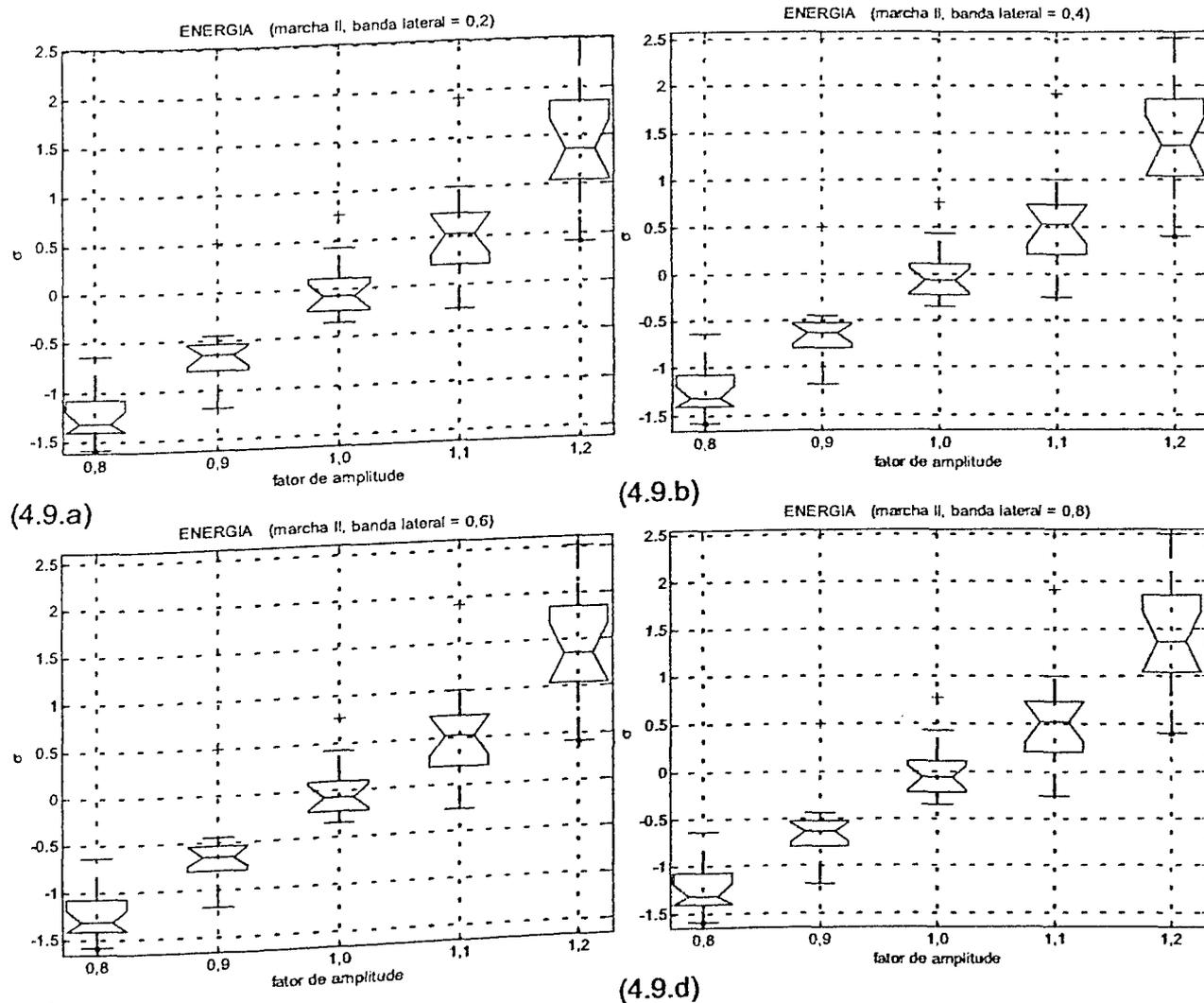
As figuras (4.8.a) a (4.8.d) mostram os gráficos da kurtosis para a segunda marcha. Para os sinais bons gerados com fator de banda lateral de 0,2 – figura (4.8.a), mais de 75% dos valores encontram-se sob 1σ , como pode ser visto pela posição dos 75º percentis dos diagramas. Os sinais com fatores de amplitude iguais ou superiores a 1,4 apresentam um comportamento semelhante ao dos sinais bons, exceto que para os fatores de amplitude de 1,8 e 2,6 que possuem alguns valores maiores que 1σ . Contudo nestes casos, a maior parte dos pontos são menores que as medianas, as quais valem respectivamente: $0,316\sigma$ e $-1,28\sigma$.

O comportamento dos valores da kurtosis para os sinais gerados com fator de banda lateral de 0,4 pode ser visto nas figuras (4.8.b). Para os sinais bons, as medianas são inferiores a 1σ assim como os 75º percentis. As medianas dos sinais defeituosos com fatores de amplitude iguais a 1,8 e 2,2 são maiores que 1σ , o que não ocorre com os fatores de amplitude de 2,6 e 1,4 cujos valores são menores que 1σ . Observa-se que todos os 75º percentis dos sinais defeituosos são maiores que 3σ , embora uma grande quantidade de valores situe-se abaixo de 1σ .

Os gráficos-caixas dos sinais bons gerados com fator de banda lateral igual a 0,6 e 0,8, mostrados respectivamente nas figuras (4.8.c) e (4.8.d) possuem os 75º percentis abaixo de 1σ e medianas dentro dos limites de -1σ a 1σ . Para os sinais defeituosos com fatores de amplitude iguais a 1,8 e 2,2 as kurtosis apresentam medianas próximas à 2σ . Nos gráficos vê-se também que os 25º percentis associados aos sinais defeituosos são menores que -2σ . Logo, uma quantidade razoável de valores pertence à faixa de sinais considerados bons.

Dos resultados analisados observa-se, de modo geral, que este estimador apresenta uma baixa confiabilidade para classificar e avaliar os sinais simulados de engrenamento para a segunda marcha.

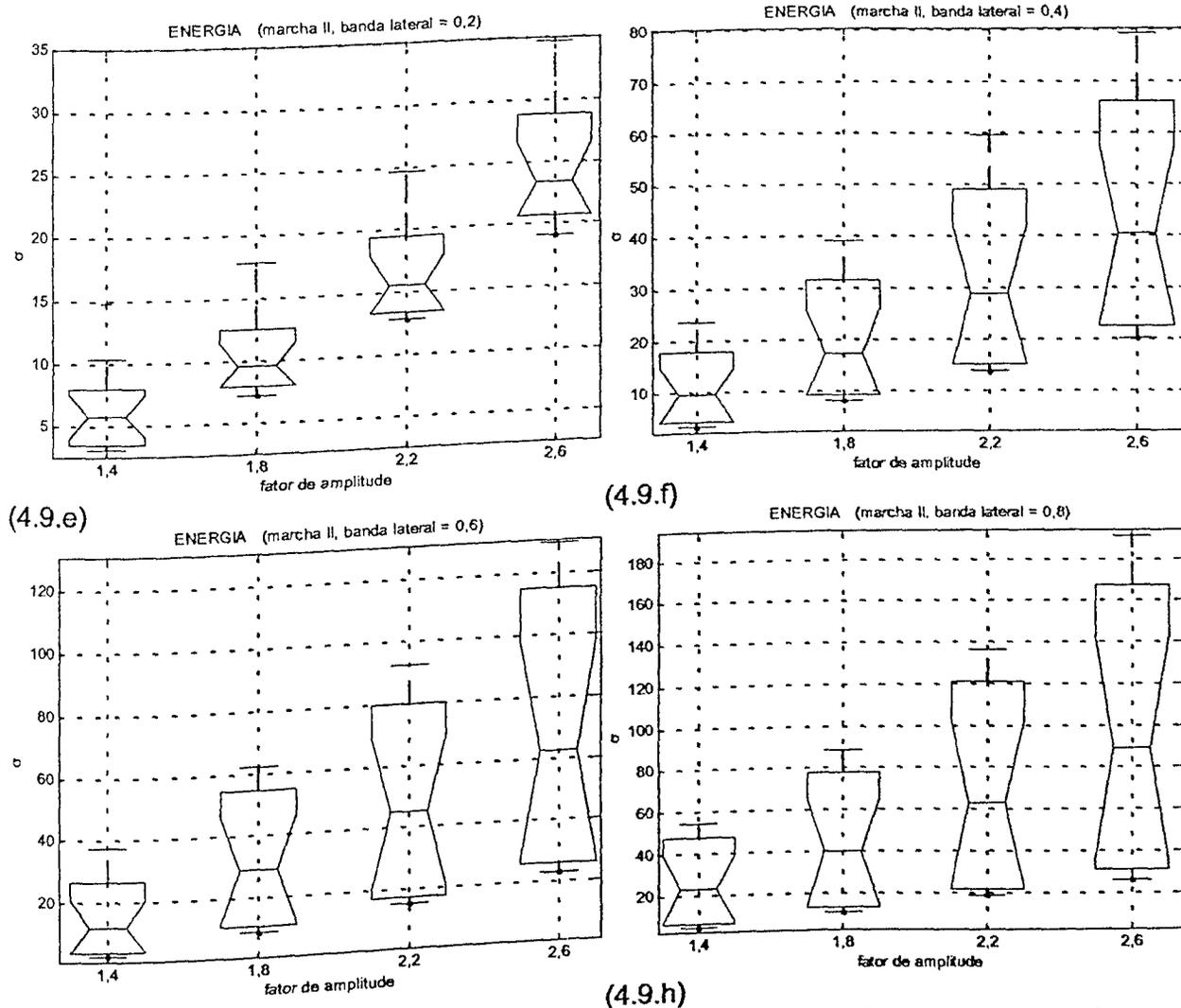
amplitude de 1,2. Para estes, os gráficos-caixas da energia para os sinais defeituosos com fator de banda lateral de 0,4; 0,6 e 0,8 possuem interquartis dentro do intervalo que vai de 1σ a 2σ .



(4.9.c)
Figura 4.9.1 – Gráficos-caixas das energias agrupadas segundo o fator de modulação versus fator de amplitude (sinais bons, segunda marcha).

Todas as energias estimadas para os sinais defeituosos são maiores que 3σ , como pode ser visto nas figuras (4.9.e) a (4.9.h).

Em geral, as figuras (4.9) mostram um comportamento crescente da energia em função do fator de amplitude e uma pequena sensibilidade à presença de ruído.



(4.9.g) (4.9.h)
 Figura 4.9.2 – Gráficos-caixas da energia versus fator de amplitude (sinais defeituosos, segunda marcha).

4.3) Avaliação conjunta da influência dos fatores de banda lateral e ruído sobre os estimadores.

4.3.1) Análise para os sinais simulados da segunda marcha.

a) Comportamento das kurtosis estimadas.

Nas figuras (4.14.a), (4.14.b), (4.14.c) e (4.14.d) são mostrados os valores de kurtosis associadas respectivamente à primeira frequência de engrenamento, a segunda frequência de engrenamento, a banda lateral da primeira frequência de engrenamento e a banda lateral da segunda frequência de engrenamento. As quatro primeiras posições do eixo horizontal representam os pontos obtidos para o fator de banda lateral igual a 0,2. Os pontos da quinta

até a oitava posição correspondem a banda lateral 0,4. Os valores das kurtosis para o fator de banda lateral igual a 0,6 são associados as abscissas nona a décima segunda. E, finalmente, as quatro últimas posições mostram os valores de energia para o fator de banda lateral de 0,8. Nestas figuras, para todos os fatores de banda lateral consideradas, as quatro posições estão associadas aos fatores de ruído 0,2 a 1,2.

Na figura (4.14.a) para o fator de banda lateral 0,2, os sinais defeituosos possuem kurtosis menores que 1σ para os fatores de ruído 0,8 e 1,2 com fator de amplitude igual a 1,4 e também para o fator de ruído 1,2 com fator de amplitude de 1,8. As demais bandas laterais apresentam kurtosis maiores que 3σ .

Os sinais bons com fator de amplitude e de ruído iguais a 0,8 apresentam valores inferiores à 1σ qualquer que seja a banda lateral. O mesmo ocorre para os sinais simulados com fator de amplitude 1,0 e fator de ruído igual a 0,8. Fora estes casos, os sinais bons apresentam kurtosis menores que 1σ .

As kurtosis para a segunda frequência de engrenamento são mostradas na figura (4.14.b). Para o fator de banda lateral 0,2, vários pontos dos sinais defeituosos encontram-se abaixo da linha de 1σ , sendo que para os demais fatores de banda lateral os valores são maiores que 1σ . Os sinais bons apresentam valores maiores que 1σ , como por exemplo, para o fator de amplitude e de ruído iguais a 1,2.

Nas figuras (4.14.c) e (4.14.d) são apresentados os gráficos das kurtosis para as bandas laterais, os quais, para a maioria dos sinais defeituosos, situam-se abaixo de -1σ . Com exceção aos valores correspondentes aos sinais gerados com fator de amplitude igual a 1,8.

Para os sinais sem defeito os valores são superiores a 1σ , a menos para aqueles gerados com fator de amplitude 1,2 e fatores de ruído 0,8 e 1,2, para os quais os valores de kurtosis foram menores que -1σ . Observa-se ainda destas figuras a ocorrência de muitos pontos pertencentes ao intervalo de -1σ a 1σ para os sinais com fator de amplitude 1,8.

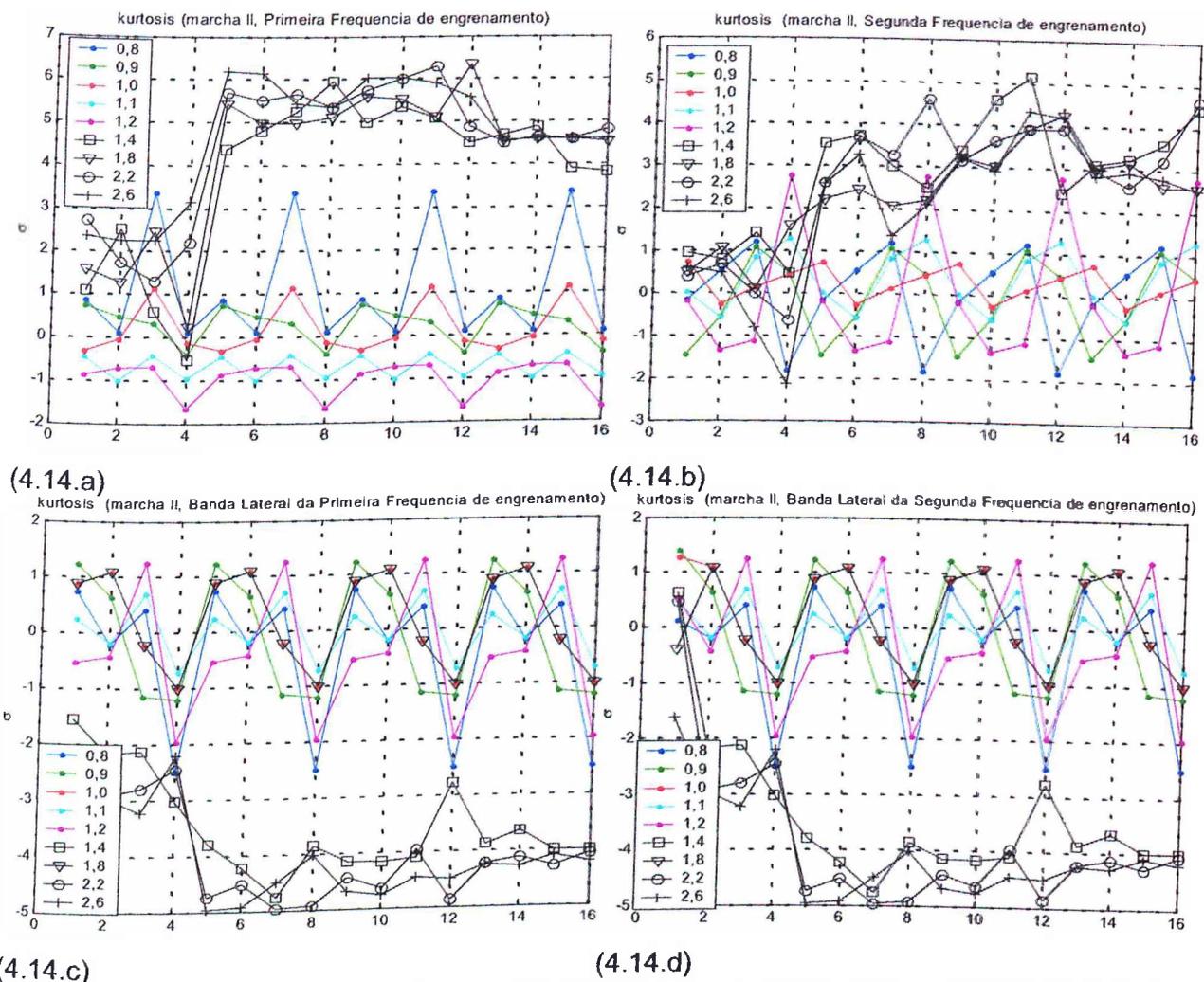


Figura 4.14 – Kurtosis em função das freqüências de engrenamento e bandas laterais da segunda marcha.

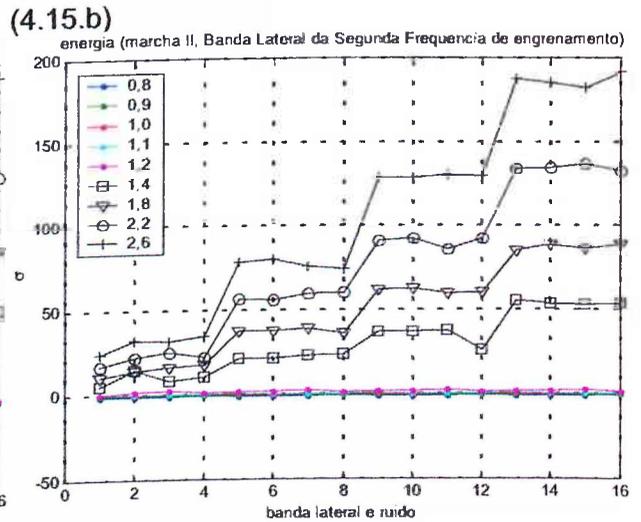
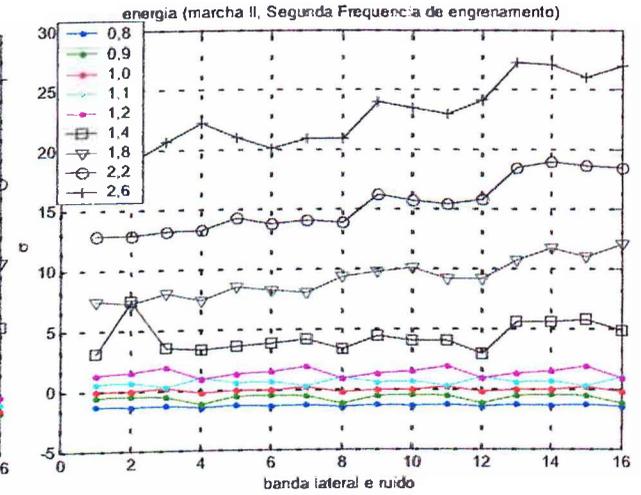
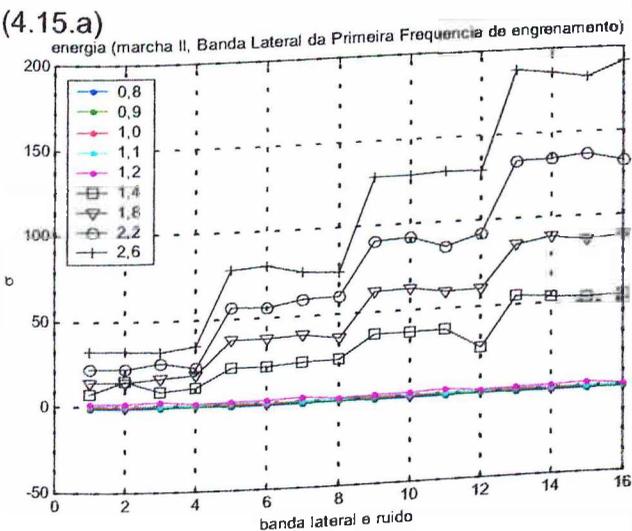
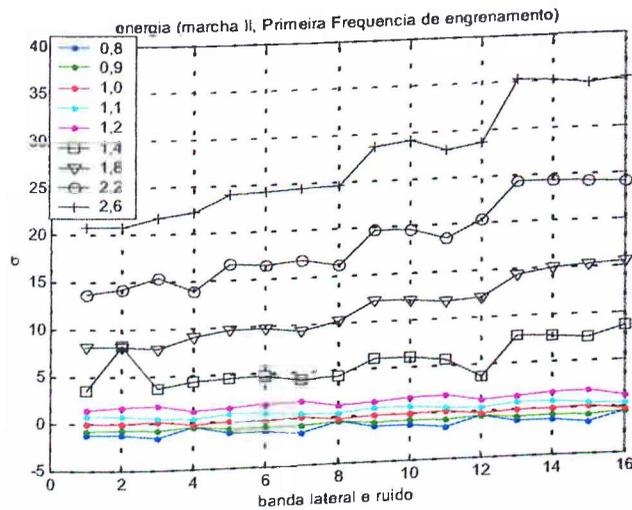
b) Comportamento das energias estimadas.

Nas figuras (4.15.a), (4.15.b), (4.15.c) e (4.15.d) são apresentados os valores dos níveis médios quadráticos ou energias estimadas para as parcelas temporais dos sinais de engrenamento associadas a primeira e segunda freqüências de engrenamento bem como as bandas laterais da primeira e da segunda freqüências de engrenamento.

Nas figuras (4.15.a) e (4.15.b) são mostrados os valores correspondentes a primeira e segunda freqüência de engrenamento. Nota-se que para todos os sinais defeituosos as energias são maiores que 3σ . Os valores para os sinais bons, exceto para o fator de amplitude igual a 1,2 são menores que 1σ . Interessante observar que o aumento dos fatores de amplitude e de banda lateral promove um acréscimo da energia, e que a mesma não foi afetada pelo

nível de ruído, como pode ser visto quando são analisados os sinais gerados com os mesmos fatores de banda lateral.

Para as bandas laterais, o mesmo comportamento anterior pode ser visualizado nos gráficos apresentados nas figuras (4.15.c) e (4.15.d), contudo a sensibilidade apresentada para estas frequências é superior a que ocorre para as frequências de engrenamento.



(4.15.a) (4.15.b) (4.15.c) (4.15.d)
 Figura 4.15 – Energia em função das frequências de engrenamento e bandas laterais da segunda marcha.

4.4) Conclusões

De modo geral, o estimador baseado no uso da energia das parcelas temporais associadas às frequências de engrenamento e bandas laterais da transformada Choi-Williams apresentou uma grande consistência e confiabilidade para a classificação e quantificação de defeitos nos câmbios simulados, o mesmo não ocorrendo em relação a kurtosis. Deve ser ressaltada a baixa sensibilidade do indicador baseado na energia em relação a presença de ruído aleatório aditivo presente nos sinais analisados.

Capítulo V

Análise de sensibilidade para os valores de amplitude e fase de sinais simulados de engrenamento demodulados via procedimento de mínimos quadrados.

Neste capítulo é feita uma análise de sensibilidade dos valores das amplitudes e fases das freqüências de engrenamento e seus harmônicos para sinais de engrenamento simulados, demodulados via procedimento de mínimos quadrados.

Os sinais foram gerados computacionalmente de forma que as relações de transmissão apresentassem o mesmo comportamento de uma caixa de câmbio real, para isto foram adotados os mesmos números de dentes e as mesmas relações de transmissão presentes nos sistemas reais. Os efeitos da variação dos autovetores e autovalores nas funções resposta em freqüência das caixas de transmissão foram levados em consideração pela introdução de um fator de amplitude, f_a , aplicado às amplitudes das freqüências de engrenamento indo de 2% até o limite de 20%. Considerou-se ainda que, como no caso real, todas as engrenagens estejam girando simultaneamente com àquela que está transmitindo potência.

Para permitir alterar o grau de defeito foi introduzido um fator de modulação, f_m , que assume valores de 10% a 80% da amplitude associada à freqüência de engrenamento ou a seu harmônico, sendo os sinais bons gerados com fator de modulação de 10%. Os fatores de modulação são as porcentagens das amplitudes das freqüências de engrenamento, resultando nas amplitudes das bandas laterais associadas a estas freqüências. Na tabela 5.1 são mostrados os fatores de modulação com a respectiva porcentagem da amplitude das freqüências de engrenamento.

Tabela 5.1 – Fator de modulação e porcentagem da amplitude da freqüência de engrenamento

f_m	1,0	1,6	2,4	2,8	3,2
%	10,0	16,0	22,5	27,0	32,0

Na simulação dos sinais de engrenamento com desalinhamento foram consideradas oscilações de até 20%, logo, as amplitudes dos segundo e terceiro harmônicos da freqüência de rotação ou de engrenamento apresentam acréscimos de 20% a 80% em relação à amplitude da freqüência fundamental. Pelo mesmo motivo, para o defeito devido a excentricidade, a amplitude da freqüência fundamental de engrenamento é multiplicada por um fator que varia de 2,4 a 3,6 e as amplitudes das bandas laterais serão 56% a 84% das

amplitudes das freqüências de engrenamento correspondentes.

Para a segunda, terceira e quarta marchas foram gerados sinais sem defeito com variação de amplitude de até 20% para a freqüência de engrenamento e seus respectivos harmônicos. Ao se adotar uma amplitude unitária para as freqüências de engrenamento, devido à influência das funções de transferência, as amplitudes do conjunto de sinais bons variaram de 0,8 a 1,2. Assumindo que na realidade não existam sistemas de engrenamento perfeitos, foram adotados para as amplitudes das bandas laterais dos sinais bons valores de 10% da amplitude da respectiva freqüência de engrenamento ou harmônico.

Os sinais defeituosos foram gerados com fatores de amplitude iguais a 1,4; 1,8; 2,2 e 2,6, sendo que para cada fator de amplitude foram adotados como fatores de banda lateral os valores 1,6; 2,4; 2,8 e 3,2.

Todos os sinais gerados foram contaminados com cinco níveis de ruído aleatório aditivo. O primeiro nível corresponde a um fator de ruído de 0,01, que representa em média 0,1 % do nível médio quadrático do sinal puro. O segundo nível corresponde a um fator de ruído de 0,2, representando aproximadamente 0,5% do nível de energia do sinal. Os três níveis restantes correspondem aos fatores de ruído 0,4; 0,8 e 1,2, que correspondem a aproximadamente 2,0%, 5,0% e 15,0% do nível total de energia do sinal sem ruído, respectivamente.

A demodulação dos sinais de engrenamento pelo procedimento de mínimos quadrados permite obter as amplitudes e as fases associadas às freqüências de interesse. Estes valores estimados trazem informações relevantes a respeito da condição do par engrenado que se deseja avaliar.

Para os conjuntos de sinais bons e defeituosos de cada marcha foram calculados, as médias e os desvios padrões de cada uma das amplitudes e fases. Os valores obtidos dos desvios padrões e médias para os sinais bons são mostrados nas tabelas 5.2 a 5.3.

Tabela 5.2 – média (μ) e desvio padrão (σ) das amplitudes e fases (sinais bons, segunda marcha).

Indicador	1ª Freqüência de engrenamento		2ª Freqüência de engrenamento	
	μ	σ	μ	σ
Amplitude	1,647	0,222	1,188	0,166
Fase	0,054	0,023	0,0083	0,034

Na tabela 5.2 os limites inferiores e superiores para as médias das amplitudes com base em uma amostra de 80 exemplares e confiança de 95% são respectivamente: 1,598 e 1,696 para a primeira freqüência de engrenamento e 1,151 e 1,224 para a segunda freqüência de engrenamento. Para as médias das fases os limites inferiores e superiores são respectivamente: 0,049 e 0,059 para a primeira freqüência de engrenamento e 0,001 e 0,016 para a segunda freqüência de engrenamento.

Tabela 5.3 – média (μ) e desvio padrão (σ) das amplitudes e fases (sinais bons, terceira marcha).

Indicador	1ª Freqüência de engrenamento		2ª Freqüência de engrenamento	
	μ	σ	μ	σ
Amplitude	1,639	0,228	1,201	0,170
Fase	0,046	0,014	0,0087	0,020

Na tabela 5.3 os limites inferiores e superiores para as médias das amplitudes com base em uma amostra de 80 exemplares e confiança de 95% são respectivamente: 1,589 e 1,689 para a primeira freqüência de engrenamento e 1,164 e 1,238 para a segunda freqüência de engrenamento. Para as médias das fases os limites inferiores e superiores são respectivamente: 0,043 e 0,049 para a primeira freqüência de engrenamento e 0,005 e 0,013 para a segunda freqüência de engrenamento.

Para facilitar a análise, os valores de amplitude e fase associados aos sinais defeituosos de cada marcha foram parametrizados em função da média e do desvio padrão estimados para os sinais simulados de engrenamento sem defeitos relativos à mesma marcha.

Procedeu-se então a uma comparação entre os valores calculados para os sinais defeituosos tendo como parâmetro aceitável para câmbios bons o valor de uma vez o desvio padrão estimado. Esta análise foi realizada, em função da variação dos fatores de amplitude, banda lateral e fator de ruído.

Novamente, para facilitar a análise dos resultados, foi utilizada a ferramenta estatística gráfica *box-plot* (Barbetta, 1999; Lima et alli, 2002; Levine et alli, 1998), que é uma representação apropriada quando se deseja apresentar aspectos relevantes de uma distribuição de freqüências estatísticas.

Na análise de sensibilidade foram consideradas três estratégias aplicadas ao conjunto de sinais simulados para a segunda, terceira e quarta marchas.

Primeiramente, realizou-se a comparação dos sinais com mesmo fator de ruído e fatores de banda lateral e amplitude diferentes para cada uma das marchas, o que possibilitou quantificar a influência do ruído sobre as amplitudes e fases demoduladas. Na outra etapa, para verificar o comportamento da influência das bandas laterais, foram considerados sinais com mesmo fator de banda lateral e fatores de ruído e amplitude diferentes, permitindo assim analisar a influência da banda lateral sobre as amplitudes e fases. Finalmente, para conclusão da análise, o comportamento das amplitudes e fases estimadas foi avaliado em função dos fatores de modulação e de ruído para a primeira e segunda freqüência de engrenamento.

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados da análise de sensibilidade relativos aos sinais da segunda marcha, sendo que os resultados pertinentes a terceira marcha encontram-se no anexo II.

5.1) Avaliação da influência das amplitudes para os sinais simulados da segunda marcha.

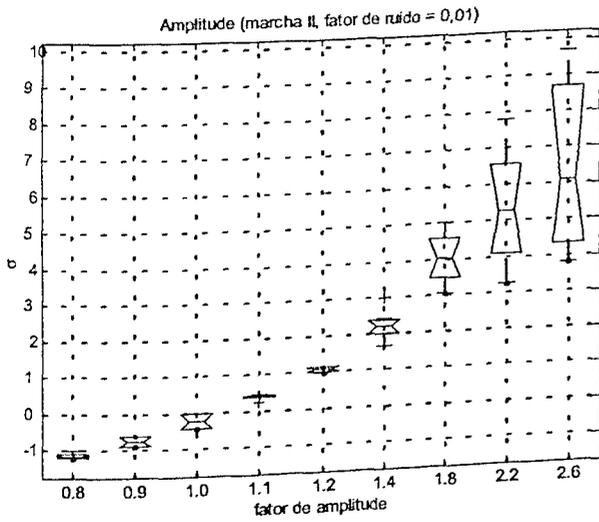
5.1.1) Comportamento das amplitudes estimadas.

Nas figuras (5.1.a) a (5.1.e), são apresentados os gráficos das amplitudes estimadas para a segunda marcha. Os diagramas dos sinais bons da figura (5.1.a), onde estão agrupados sinais com fator de ruído igual a 0,01, mostram que exceto para o fator de amplitude 1,2, cujo diagrama encontra-se totalmente acima de 1σ , todas as demais amplitudes dos sinais considerados bons ($f_a = 0,8$ a 1,2) encontram-se abaixo deste patamar. Todos os sinais defeituosos ($f_a = 1,4$ a 2,6) apresentam diagramas posicionados acima de 1σ e observa-se também uma distribuição simétrica dos valores em relação às medianas bem como um comportamento crescente dos mesmos em relação aos fatores de amplitude.

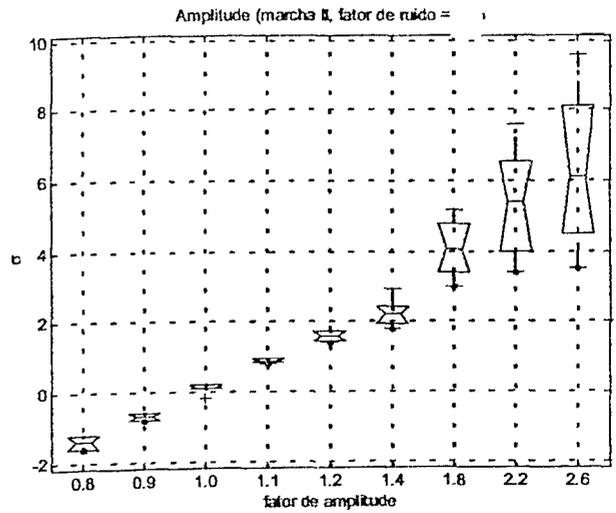
Na figura (5.1.b), onde são representados os sinais gerados com fator de ruído igual a 0,2, os gráficos-caixas dos apresentam o mesmo comportamento observado para o caso anterior.

Na figura (5.1.c), cujos sinais foram contaminados com fator de ruído igual a 0,4, os diagramas mostram que os sinais bons gerados com fator de amplitude 1,2 encontram-se acima de 1σ . Contudo, todas as demais amplitudes dos sinais com fatores de amplitude de 0,8 a 1,2, encontram-se abaixo deste limite. Novamente, todos os sinais defeituosos apresentaram diagramas posicionados acima de 1σ , tendo uma distribuição simétrica de valores em relação às medianas e um comportamento crescente destes em relação aos fatores de amplitude.

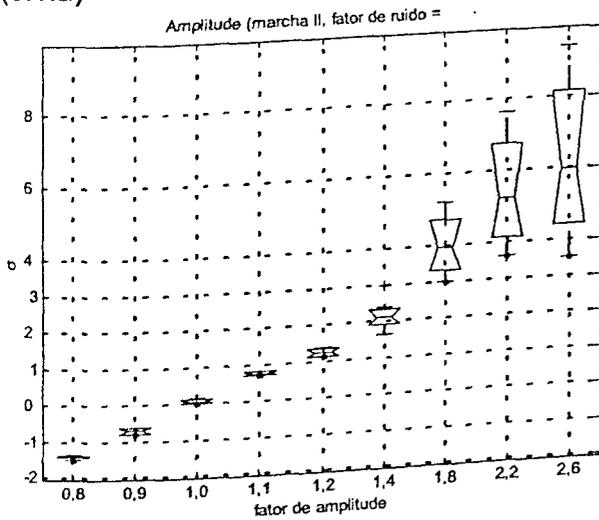
Para o fator de ruído igual a 0,8 e 1,2 observa-se dos gráficos das figuras (5.1.d) e (5.1 e) o mesmo comportamento verificado nos gráficos-caixas associados aos fatores de ruído 0,01, 0,2 e 0,4, tanto para os sinais sem defeitos quanto para os sinais simulados com defeitos. De modo geral, independentemente do fator de ruído, as amplitudes estimadas apresentam um comportamento monotômico crescente em relação ao fator de amplitude.



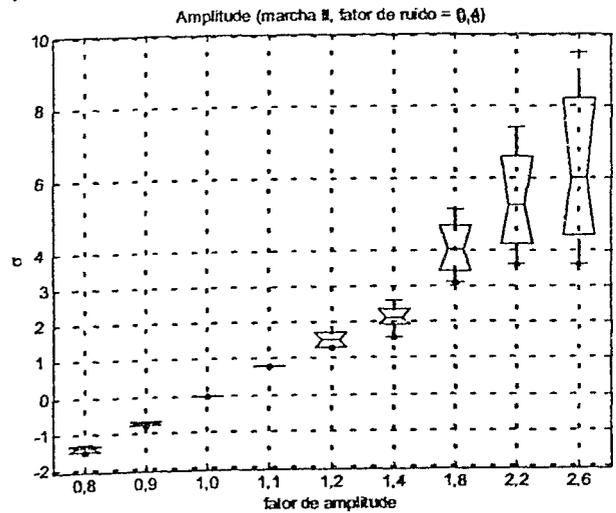
(5.1.a)



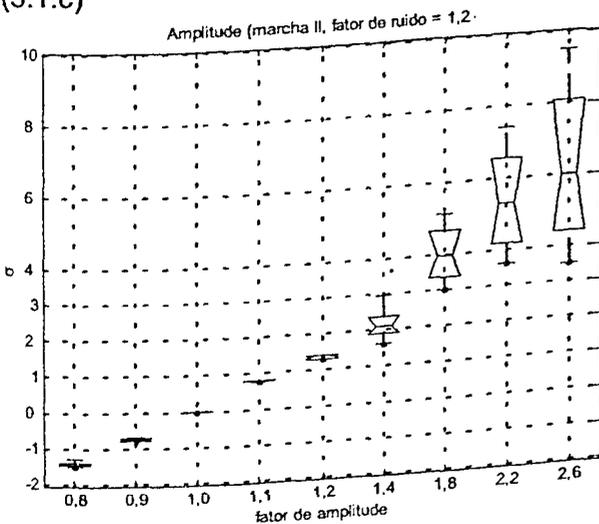
(5.1.b)



(5.1.c)



(5.1.d)



(5.1.e)

Figuras 5.1 – Gráficos-caixas das amplitudes agrupadas segundo o mesmo fator de ruído versus fator de amplitude (segunda marcha).

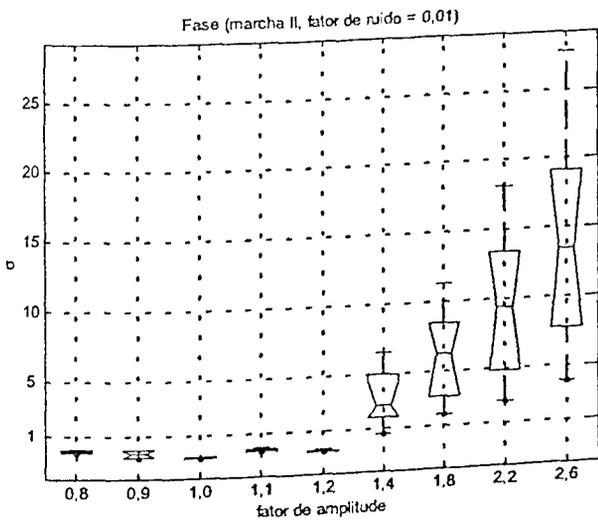
5.1.2) Comportamento das fases estimadas.

As figuras (5.2.a) a (5.2.e) mostram o comportamento das fases em relação aos fatores de amplitude e ruído para a segunda marcha.

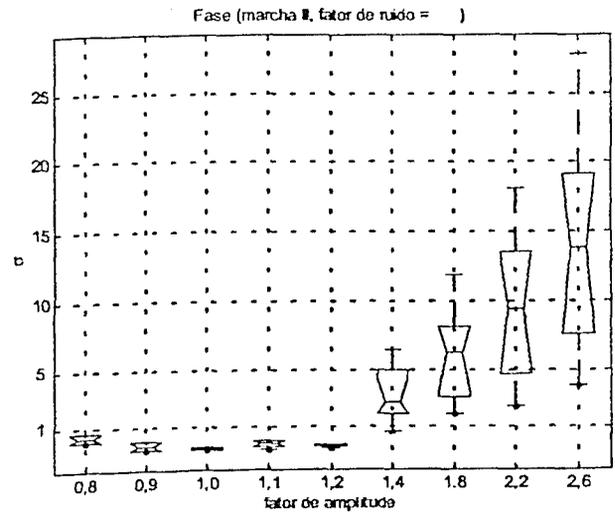
Os gráficos-caixas dos sinais bons das figuras (5.2.a), (5.2.b) e (5.2.c) onde estão agrupados respectivamente os sinais com fatores de ruído iguais a: 0,01, 0,2 e 0,4, situam-se abaixo da linha de 1σ para todos os fatores de amplitudes dos sinais considerados bons ($f_a = 0,8$ a $1,2$). Todos os sinais defeituosos ($f_a = 1,4$ a $2,6$) apresentaram diagramas posicionados acima de 1σ observando-se ainda uma distribuição simétrica dos valores em relação as medianas e um comportamento crescente em relação aos fatores de amplitude.

Para os gráficos-caixas da figura (5.2.d) alguns valores obtidos para o fator de amplitude igual a 1,0 encontram-se acima da linha de 1σ . Observa-se também que os sinais de engrenamento de câmbios defeituosos com fator de amplitude igual a 1,4 apresentam valores menores que 1σ .

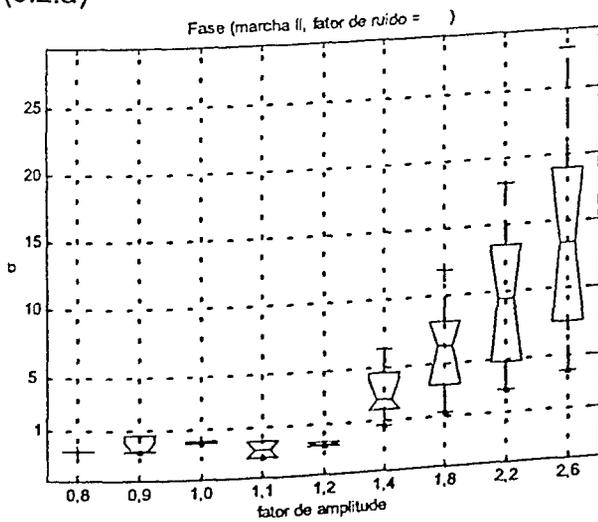
Na figura (5.2.e) referente aos sinais com fator de ruído de 1,2, nota-se uma dispersão nos diagramas. Pode-se perceber ainda que os sinais simulados de câmbios bons com fatores de amplitudes iguais a 0,8, 0,9 e 1,0 possuem alguns valores acima de 1σ . Já os sinais defeituosos com fatores de amplitude de 1,4 e 1,8 apresentaram parte dos valores localizados no quartil inferior, abaixo do limite de 1σ .



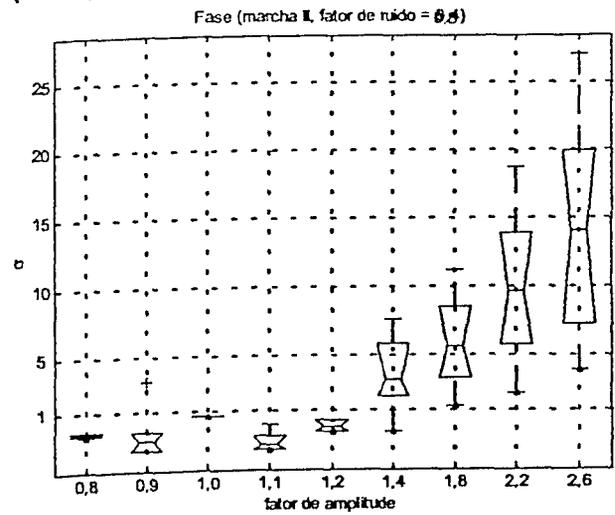
(5.2.a)



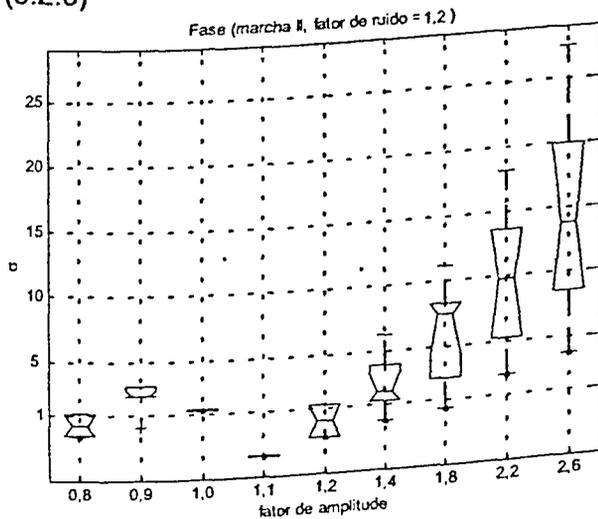
(5.2.b)



(5.2.c)



(5.2.d)



(5.2.e)

Figuras 5.2 – Gráficos-caixas das fases agrupadas segundo o mesmo fator de ruído versus fator de amplitude (segunda marcha).

5.2) Avaliação da influência das bandas laterais sobre os sinais simulados da segunda marcha.

5.2.1) Comportamento das amplitudes estimadas.

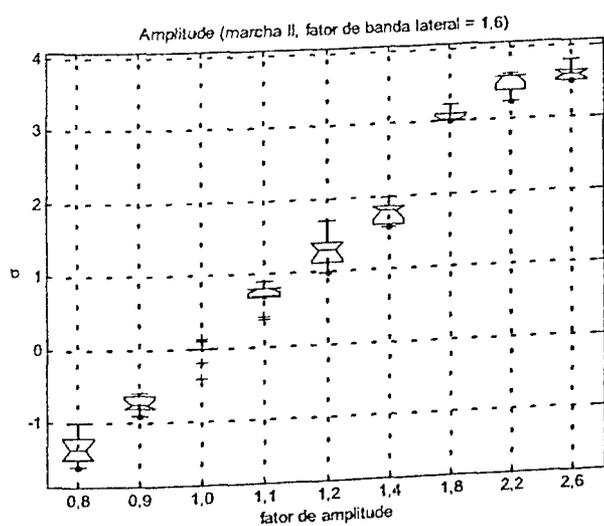
Nas figuras (5.3.a) a (5.3.d) são mostrados os gráficos das amplitudes estimadas para a segunda marcha dos sinais agrupados segundo o fator de banda lateral.

Os sinais de engrenamento simulados como bons, gerados com qualquer fator de banda lateral e fatores de amplitude $-f_a$ de 0,8 a 1,1, apresentam diagramas abaixo do limite de 1σ . Para o fator de amplitude igual a 1,2, como pode ser visto pelo limite inferior de seu gráfico - caixa, todos os valores encontram-se acima de 1σ .

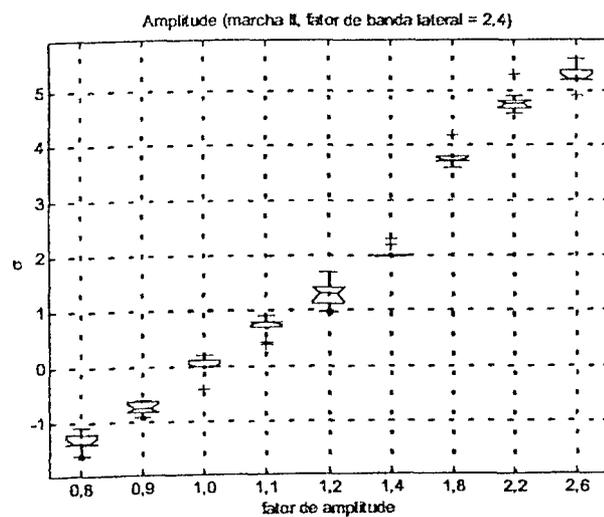
Os gráficos-caixas dos sinais defeituosos ($f_a = 1,4$ a 2,6) situam-se acima do limite considerado para sinais classificados como bons, possuindo limites inferiores acima de 2σ como mostram as figuras (5.3.a) e (5.3.b), que representam respectivamente o conjunto de sinais gerados com fatores de banda lateral 1,6 e 2,4.

Observa-se também a presença de pontos discrepantes para os diversos fatores de amplitude indiferente do fator de banda lateral considerado. Isto provavelmente decorre da presença de pontos associados aos sinais de engrenamento contaminados com fatores de ruído iguais a 0,8 e 1,2 analisados simultaneamente com os sinais contaminados com fatores de ruído menores.

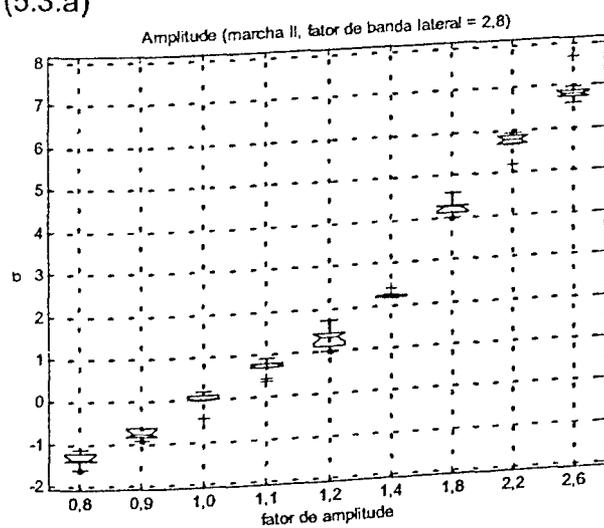
Outra importante característica observada diz respeito ao comportamento crescente das amplitudes estimadas em função do aumento dos fatores de amplitude.



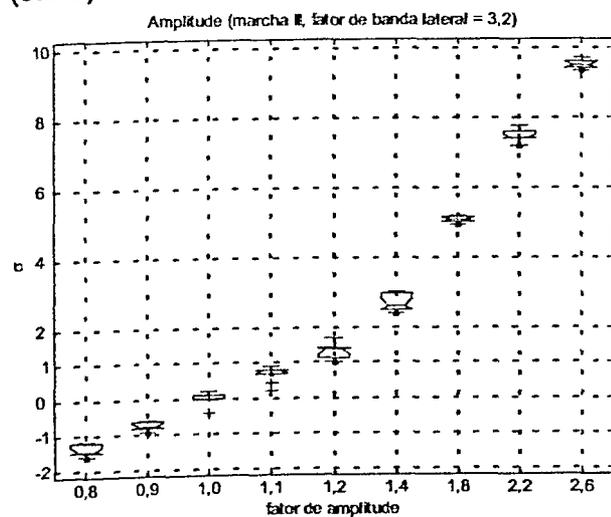
(5.3.a)



(5.3.b)



(5.3.c)



(5.3.d)

Figura 5.3 – Gráficos-caixas das amplitudes agrupadas segundo o fator de modulação versus fator de amplitude (segunda marcha).

5.2.2) Comportamento das fases estimadas.

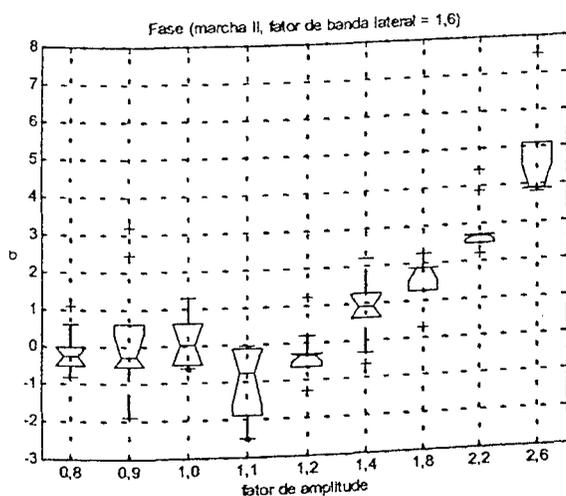
Nas figuras (5.4.a) a (5.4.d) são mostrados os gráficos das fases estimadas para a segunda marcha dos sinais agrupados segundo o fator de banda lateral.

Para os sinais de engrenamento simulados como bons, independente do fator de banda lateral com que foram gerados, apresentam diagramas abaixo do limite de 1σ , para os fatores de amplitude $f_a = 0,8, 1,1$ e $1,2$. Para os sinais gerados com fatores de amplitude iguais a $0,9$ e $1,0$, aproximadamente 25% das fases encontram-se acima de 1σ , como pode ser visto pelos limites superiores de seus gráficos-caixas.

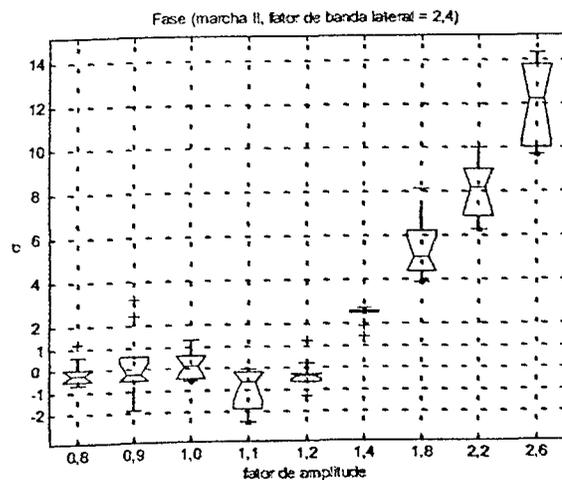
Interessante notar a natureza oscilatória dos diagramas independentemente do fator de banda lateral adotado na geração dos sinais de engrenamento.

Os gráficos-caixas dos sinais defeituosos ($f_a = 1,4$ a $3,2$) situam-se acima do limite considerado para sinais classificados como bons, tendo limites inferiores maiores que 1σ , como mostram as figuras (5.4.a) e (5.4.b), as quais representam respectivamente o conjunto de sinais gerados com fatores de banda lateral $1,6$ e $1,8$. A única exceção pode ser vista para o diagrama relativo ao sinal gerado com fator de amplitude de $1,4$ e fator de banda lateral igual a $1,6$ - figura 5.4.a, o qual apresenta aproximadamente 50% das amplitudes estimadas abaixo da linha de 1σ .

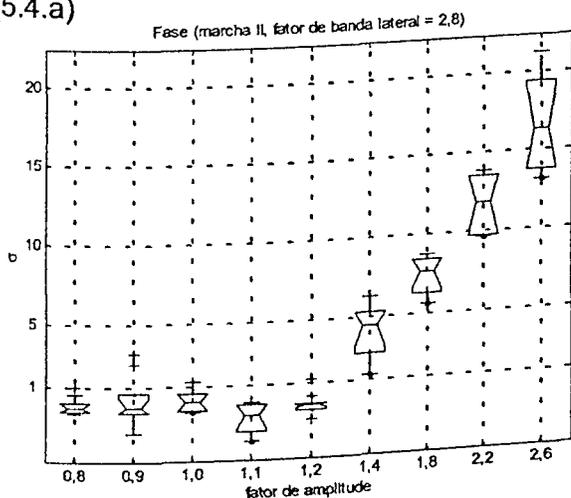
Observa-se novamente a presença de pontos discrepantes para os diversos fatores de amplitude indiferente do fator de banda lateral considerado e o comportamento crescente das fases estimadas em função do aumento do fator de amplitude.



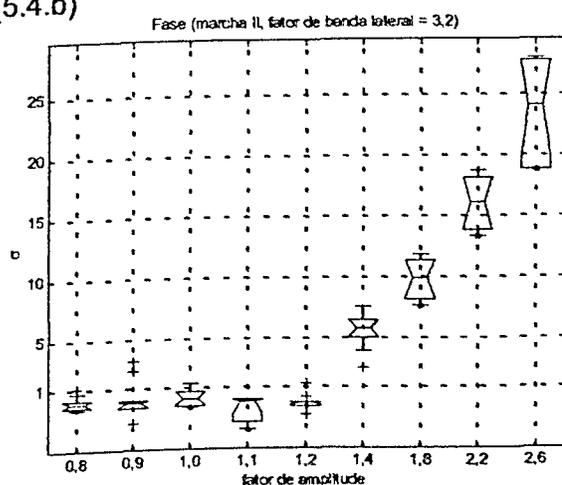
(5.4.a)



(5.4.b)



(5.4.c)



(5.4.d)

Figuras 5.4 – Gráficos-caixas para as fases agrupadas segundo o fator de modulação versus fator de amplitude (segunda marcha)

5.3) Avaliação da influência dos fatores de banda lateral e ruído para os sinais simulados.

5.3.1) Comportamento das amplitudes estimadas.

Nas figuras (5.5.a) até (5.5.d) são mostrados os valores das amplitudes estimadas para a primeira e segunda frequência de engrenamento, agrupadas em função dos fatores de ruído e de banda lateral. Os valores das amplitudes mostrados nas figuras (5.5.a) e (5.5.b) são associadas à segunda marcha e finalmente nas figuras (5.5.c) e (5.5.d) podem ser vistas as amplitudes relacionadas com a terceira marcha. As cinco primeiras posições do eixo horizontal representam os valores estimados para os sinais simulados com fator de banda lateral igual a 1,6. Os pontos da sexta até a décima posição correspondem aos parâmetros estimados para os sinais de engrenamento gerados com fator de banda lateral de 2,4. Os valores das amplitudes para os sinais cujo fator de banda lateral é igual a 2,8 são representados da décima primeira até a décima quinta abscissas. Por fim, as cinco últimas posições mostram as amplitudes obtidas para os sinais gerados com fator de banda lateral de 3,2.

Em todos os intervalos definidos pelas bandas laterais, os valores apresentam-se segundo a ordem crescente do fator de ruído, sendo o primeiro valor associado ao fator de ruído igual a 0,01 e o quinto e último valor referente ao fator de ruído de 1,2.

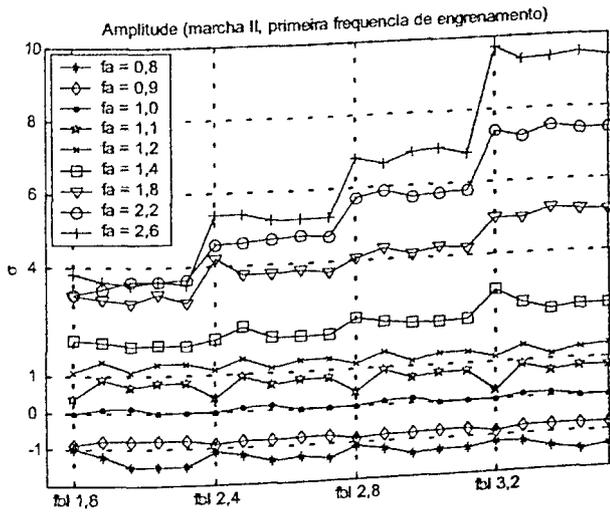
Na figura (5.5.a) as amplitudes estimadas para os sinais defeituosos são todas maiores que 2σ , independente dos fatores: de ruído, de banda lateral e de amplitude. Considerando-se os sinais com fator de banda lateral comum, verificou-se que o aumento do fator de amplitude implicou numa elevação da amplitude estimada.

Todos os valores mostrados nas figuras (5.5.b) a (5.5.d) são maiores que 1σ . Para os sinais gerados com fator de amplitude 1,4 as amplitudes estimadas oscilaram em torno de 2σ .

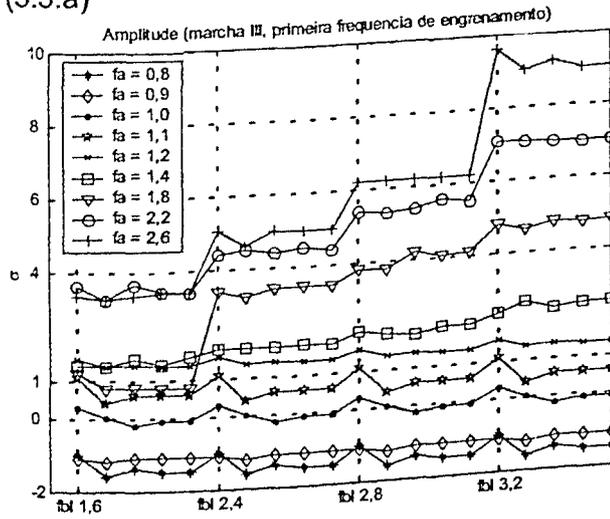
Em todos os casos e para as duas marchas observa-se um comportamento decrescente dos valores das amplitudes com o aumento do fator de banda lateral.

Para os sinais bons, apenas as amplitudes estimadas para os sinais gerados com fator de amplitude igual a 1,2 apresentaram valores maiores que 1σ .

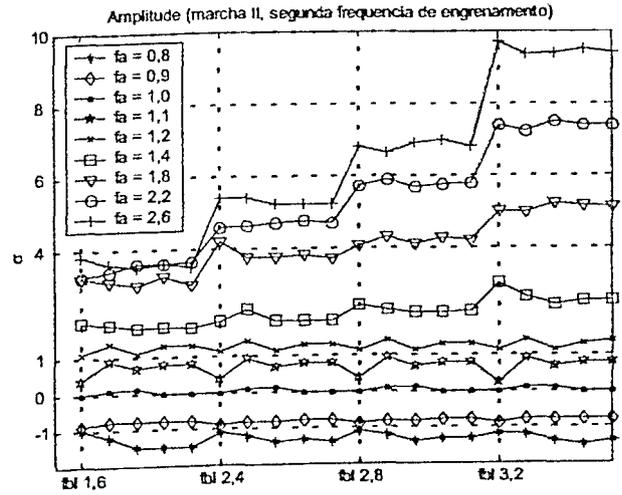
Como pode ser visto nos gráficos, de modo geral, ao se analisar os conjuntos de dados formados com o mesmo fator de amplitude e banda lateral, conclui-se que o procedimento foi insensível ao aumento do fator de ruído.



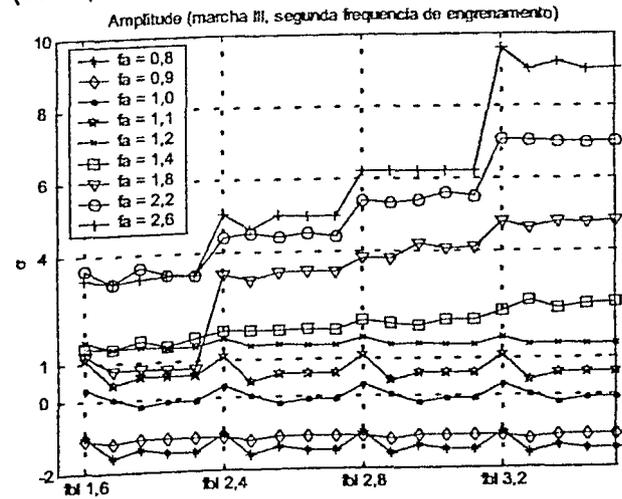
(5.5.a)



(5.5.c)



(5.5.b)



(5.5.d)

Figura 5.5 – Amplitudes versus freqüências de engrenamento e bandas laterais para a segunda e terceira marchas.

5.3.2) Comportamento das fases estimadas.

Nas figuras (5.6.a) até (5.6.d) são mostrados os valores das fases estimadas para a primeira e segunda frequência de engrenamento, agrupadas em função dos fatores de ruído e de banda lateral. As fases mostradas nas figuras (5.6.a) e (5.6.b) são associadas à segunda marcha e nas figuras (5.6.c) e (5.6.d) podem ser vistas as fases relacionadas com a terceira marcha. As cinco primeiras posições do eixo horizontal representam os valores estimados para os sinais simulados com fator de banda lateral igual a 1,6. Os pontos da sexta até a décima posição correspondem aqueles gerados com fator de banda lateral de 2,4. Os valores das fases para os sinais cujo fator de banda lateral é igual a 2,8 são representados da décima primeira até a décima quinta abscissas. Finalmente, as cinco últimas posições mostram os valores das fases obtidas para os sinais gerados com fator de banda lateral de 3,2.

Em todos os intervalos definidos pelas bandas laterais, os valores apresentam-se segundo a ordem crescente do fator de ruído, sendo o primeiro valor associado ao fator de ruído igual a 0,02 e o quinto e último valor do intervalo referente ao fator de ruído 1,2.

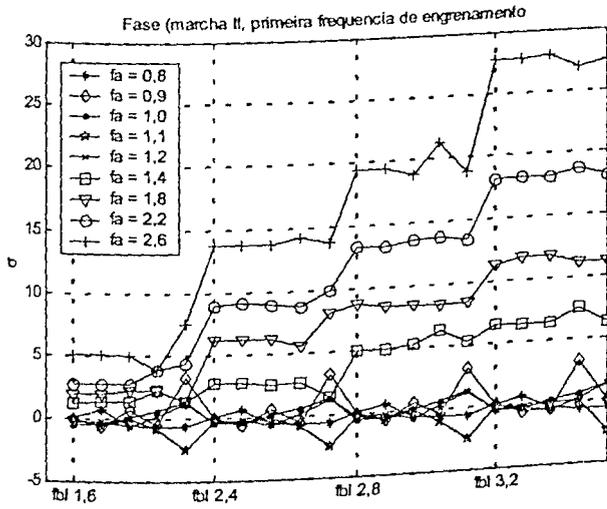
Na figura (5.6.b) e (5.6.d) as fases estimadas para os sinais defeituosos são em sua maioria superiores a 1σ , independente dos fatores de ruído, de banda lateral e de amplitude. Contudo, para o fator de amplitude igual a 1,4 são observados valores abaixo deste limite.

Em todos os casos, nota-se que o aumento do fator de amplitude implica em uma elevação da fase estimada, considerando-se os sinais com fator de banda lateral comum. Isto ocorre por se considerar como amplitude das bandas laterais uma porcentagem da amplitude da frequência de engrenamento ou de seu harmônico.

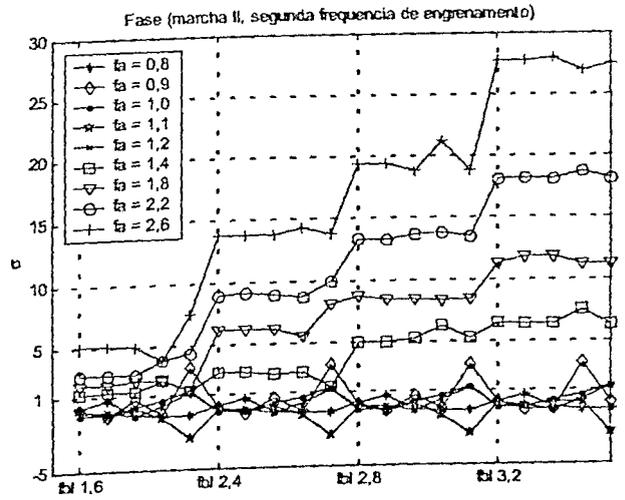
Em todos os casos e para todas as marchas observa-se um comportamento crescente dos valores das fases com o aumento do fator de banda lateral.

Dos sinais bons, observa-se que as fases estimadas para os sinais gerados com fator de amplitude igual a 1,2 e 0,8 com fator de ruído 1,2 apresentam valores maiores que 1σ .

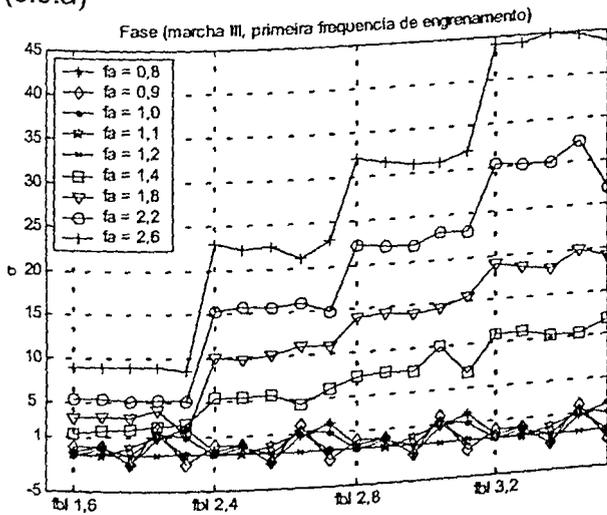
Globalmente o procedimento foi insensível quanto ao aumento do fator de ruído, como pode ser visto nos gráficos, ao serem analisados os conjuntos de dados formados com o mesmo fator de amplitude e banda lateral.



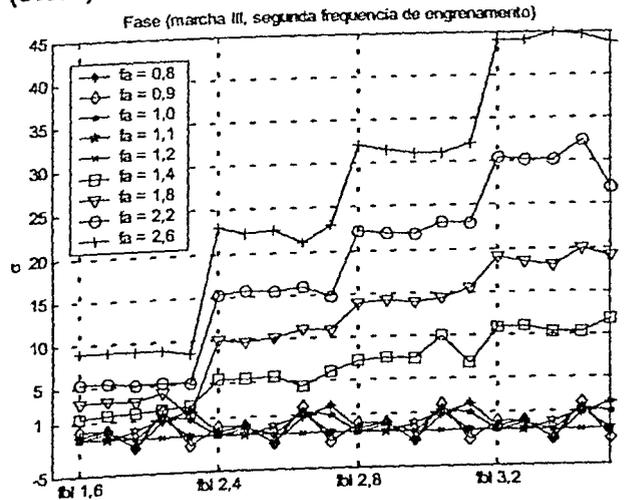
(5.6.a)



(5.6.b)



(5.6.c)



(5.6.d)

Figuras 5.6 – Fases versus freqüências de engrenamento e bandas laterais para a segunda e terceira marchas.

5.4) Conclusões

Como pode ser observado nos gráficos das figuras verificou-se a robustez da metodologia analisada, principalmente em relação às amplitudes estimadas. Para as fases, notou-se a presença de um comportamento oscilante dos valores estimados principalmente para os sinais bons, indicando uma maior sensibilidade aos efeitos do ruído. Contudo, em ambos os casos – amplitude e fase, os valores foram coerentes com o esperado, exceto para as amplitudes dos sinais gerados com fator de amplitude igual a 1,2, como pode ser visto nas figuras 5.1 e 5.3.

Capítulo VI

Análise dos dados medidos para os câmbios 14-58.

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos na classificação dos sinais de vibração para a segunda, terceira, quarta e quinta marchas e diferencial para os câmbios 14-58. Inicialmente é feita uma descrição das características da caixa de câmbio a fim de facilitar a relação entre as frequências que caracterizam cada par engrenado e a cinemática do sistema. Em seguida, são feitos alguns comentários pertinentes à bancada de teste e ao funcionamento do sistema de aquisição utilizado para a coleta de dados.

6.1 Especificações da caixa de transmissão

A caixa de transmissão utilizada nesta pesquisa é a do modelo 14-58 que equipa os automóveis com motores de 1000 cm^3 de cilindrada da Fiat Automóveis. As engrenagens de dentes helicoidais fixas ao eixo primário são responsáveis pelos movimentos de marcha à frente, sendo a marcha à ré executada pelo engate da engrenagem de dentes retos, também fixa ao eixo primário. A potência é então transmitida ao eixo secundário, no qual estão as demais engrenagens que compõem a caixa de câmbio, conforme pode ser visto na figura 6.1. Além da carcaça, rolamentos e vários outros elementos mecânicos, a coroa que se localiza na extremidade direita do eixo secundário, transmite torque e rotação para o diferencial que se encontra montado na parte final do câmbio.

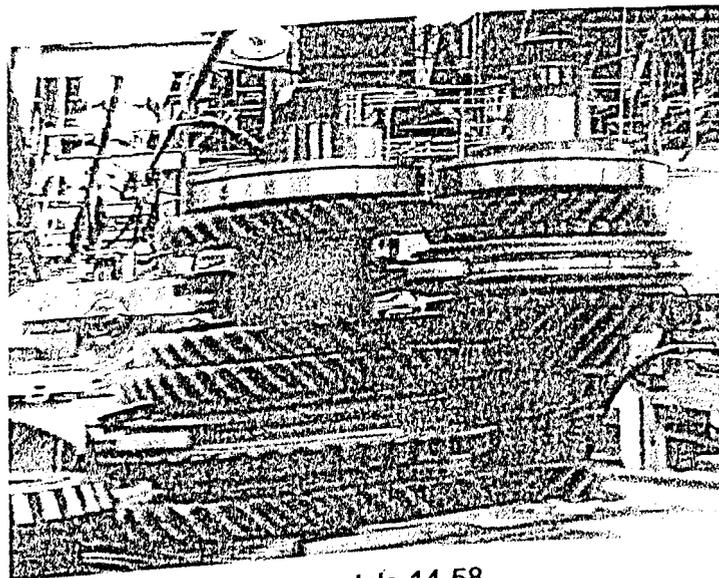


Figura 6.1 – Foto da caixa de transmissão modelo 14-58

A maioria das engrenagens do eixo primário são usinadas durante a própria fabricação do eixo, sendo posteriormente submetidas a um processo de têmpera superficial visando aumentar a resistência dos flancos dos dentes ao desgaste.

Os números de dentes para os pares de engrenagens considerados neste capítulo estão mostrados na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Número de dentes para as engrenagens do câmbio 14-58.

Marcha	Segunda	Terceira	Quarta	Quinta	Diferencial
Eixo Primário	21	25	32	37	15
Eixo Secundário	47	38	37	31	61

A ausência de dados relativos à primeira marcha se justifica devido ao pequeno tempo durante o qual esta mesma permanece engrenada no uso de um automóvel, fazendo com que o efeito das rumorosidades decorrentes de defeitos de fabricação ou montagem não seja relevante.

6.2 Bancada de aquisição de sinais e instrumentação utilizada

A instrumentação utilizada para a amostragem dos dados consiste de um acelerômetro piezelétrico fixado magneticamente do lado externo da carcaça da caixa de transmissão. Para garantir repetibilidade, o posicionamento do sensor é realizado por um braço mecânico. O acelerômetro é conectado a um condicionador de sinais, que tem por objetivo dentre outras coisas, amplificar o sinal de vibração. Nesta bancada, um medidor de nível de pressão sonora também faz parte da cadeia de medição, entretanto nas análises realizadas neste trabalho foram utilizados exclusivamente os sinais de vibração captados pelo acelerômetro.

Uma placa analógica / digital de três canais, interligada a um microcomputador Pentium 333 MHz é utilizada para aquisição e conversão em tempo real dos dados oriundos da cadeia de medição. Estes sinais são processados em um *software* destinado ao controle de qualidade de cada caixa de transmissão avaliada. As características de cada um dos instrumentos se encontram na listagem a seguir:

- Acelerômetro

Fabricante: Brüel & Kjaer

Tipo: 4383

Número de série: 2067424

Sensibilidade: 3,179 pC/ms²

- Condicionador de Sinal

Fabricante: Brüel & Kjaer

Tipo: 2635

Número de série: 2002759

Ganho: 31,6 mV/unid.

- Medidor de nível de pressão sonora

Fabricante: Brüel & Kjaer

Tipo: 2236

- Placa Analógica Digital

Fabricante: Iotech

Tipo: Wave Bech 512

Faixa de aquisição: 0 a 100 kHz

A localização do ponto de medição (letra A) sobre a carcaça da caixa de transmissão conforme mostrado na figura 6.2, foi determinada depois de realizado um procedimento de análise modal em diversas caixas, no qual se buscou a região de maior sensibilidade às excitações e respostas provenientes dos elementos que se desejam observar. Outro fator levando em conta foi a repetibilidade dos espectros, mesmo com a reinstalação dos sensores, de modo a propiciar confiabilidade aos dados medidos.

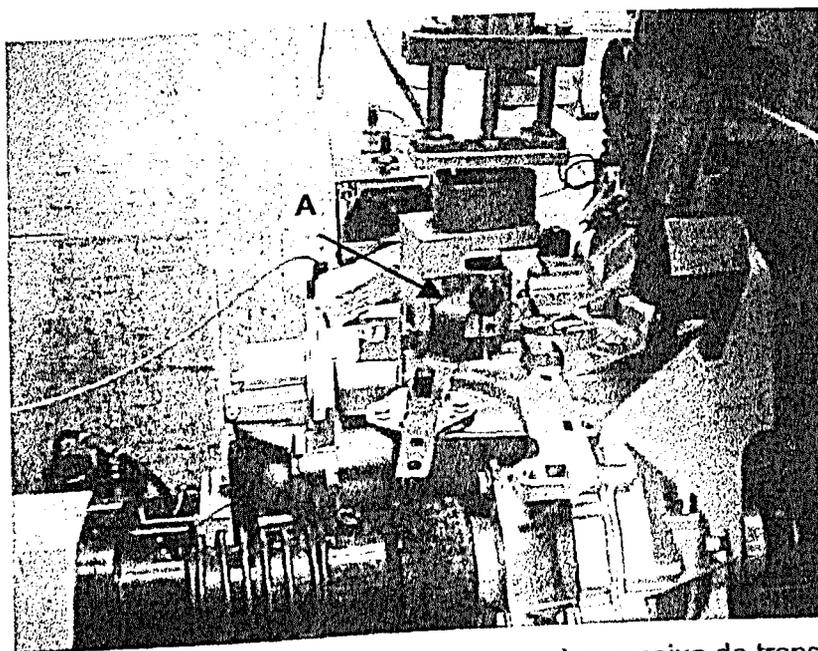


Figura 6.2 – Localização do ponto de fixação do sensor sobre a caixa de transmissão.

O controle de qualidade dos câmbios testados é realizado com base no programa CÂMBIO, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, cujo funcionamento consiste em uma comparação em tempo real dos desvios dos espectros de 1/3 de oitava dos sinais de vibração dos câmbios sob teste em relação aos espectros de um conjunto de câmbios considerados como padrão. Caso as diferenças se encontrem acima de um limite pré-estabelecido, o câmbio testado é recusado seguindo para análise visando determinar qual o elemento defeituoso e a causa do problema.

No sistema automatizado de aquisição de sinais mostrado na figura 6.3, o braço (1), que possui em sua extremidade um cilindro pneumático (2) com um acelerômetro montado no porta sensor (3) desloca-se até o ponto de medição. Em seguida a haste do cilindro pneumático movimenta verticalmente o porta sensor até a posição de encaixe na carcaça do câmbio. Assim que o sensor se encontra devidamente montado na carcaça, o sistema de acionamento é acoplado ao eixo primário do câmbio sob teste.

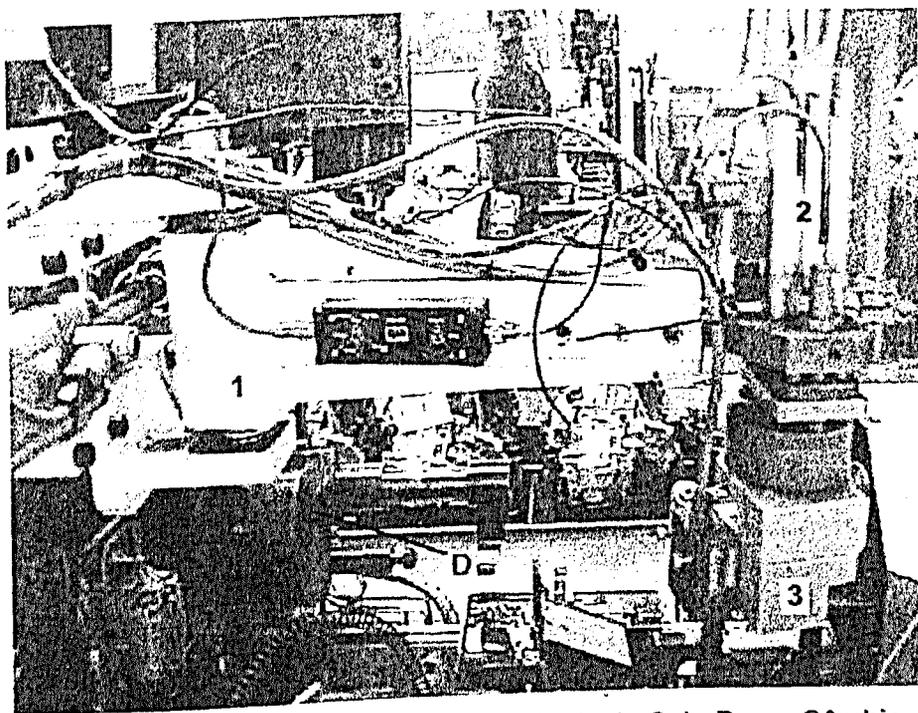


Figura 6.3 – Sistema automatizado de aquisição de sinais da Sala Prova Câmbio

Os sinais de aceleração de vibração das marchas foram gravados para cada câmbio. Estes sinais foram colhidos com uma frequência de amostragem de 16384 Hz, resultando em uma frequência de Nyquist de 8192 Hz. O teste de cada marcha é composto de três etapas: aceleração até uma rotação de aproximadamente 3600 RPM; manutenção desta rotação por um tempo de aproximadamente quatro segundos dependendo do par engrenado testado;

seguida de uma desaceleração até o repouso. Nas análises de cada par engrenado foi utilizado o trecho do ensaio realizado com rotação constante de onde foram tomados 4096 pontos.

6.3 Descrição da Estratégia Adotada

Neste estudo, foram medidos sinais de vibração de um conjunto de câmbios ruidosos e de um câmbio não ruidoso, o qual foi considerado como padrão. As definições a respeito do estado de ruidosidade dos câmbios foram determinadas utilizando o sistema de análise elaborado pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, que se encontra em funcionamento na sala de testes de câmbios da Fiat Automóveis S. A. localizada em Betim, estado de Minas Gerais.

Para maior clareza, os câmbios defeituosos foram denominados segundo o seu principal motivo de ruidosidade. Quando da ocorrência de mais de um câmbio com um mesmo defeito este recebeu uma numeração seqüencial. Sete espécimes compuseram o conjunto de câmbios defeituosos: ruidoso, ruidoso I, ruidoso II, golpe no diferencial, golpe no diferencial I, golpe no diferencial II e golpe no diferencial III.

Os sinais obtidos sofreram um pré-processamento por média no domínio do tempo, sendo utilizado para cada par engrenado o período relativo à frequência de rotação do eixo primário e também o período associado à frequência de rotação do eixo secundário, para que os harmônicos relacionados ao diferencial fossem destacados. Esta operação tem por objetivo reduzir a influência do ruído existente no sinal melhorando a relação sinal / ruído.

Como os defeitos que se desejam avaliar não são defeitos de natureza impulsiva, como, por exemplo, trincas em dentes, e sim defeitos de montagem ou fabricação que se expressam basicamente como modulação em fase ou amplitude, que são distribuídos e ocorrem durante todo o sinal, o procedimento de média não prejudica a análise posterior.

A avaliação de cada uma das metodologias foi dividida em duas fases. Primeiramente avaliou-se a eficácia do procedimento de demodulação e posteriormente a do procedimento baseado na estimativa da energia contida na parcela temporal associada à frequência de interesse obtida pelo "fatiamento" da transformada Choi-Williams do sinal.

6.4 Procedimento de Demodulação da Amplitude e da Fase.

Para avaliar a eficiência deste procedimento foram consideradas duas análises: Primeiramente foi verificada a eficiência global deste procedimento, determinando para os sinais de vibração dos câmbios defeituosos a porcentagem de ocorrências de amplitudes superiores às obtidas para o câmbio padrão. Em uma segunda etapa, para cada câmbio

defeituoso, foi analisada a porcentagem de ocorrências de valores de amplitude maiores que as determinadas para o câmbio padrão.

Para os casos reais, de modo diferente do que se fez com os sinais simulados, as fases estimadas não foram consideradas na determinação do estado dos câmbios analisados devido aos ensaios terem sido realizados sem carga na saída, pois nesta situação a modulação em fase, que consiste na flutuação da velocidade de rotação, não se manifesta de maneira clara e constante dentro de um período de rotação.

Na tabela 6.2 estão mostradas as porcentagens do número de vezes em que as amplitudes dos sinais rúmosos foram em média 2,6 dB maiores que as amplitudes demoduladas para o câmbio padrão, considerando-se a segunda, terceira, quarta, quinta marchas e o diferencial.

Tabela 6.2 - Porcentagem de amplitude e fase acima do estimado para o câmbio padrão.

Par engrenado	Amplitude		Fase	
	Feng 1	Feng 2	Feng 1	Feng 2
Segunda	28,6	71,4	85,7	42,9
Diferencial	100	85,7	85,7	42,9
Terceira	100	71,4	71,4	42,9
Diferencial	85,7	100	100	100
Quarta	0,0	28,6	0,0	42,9
Diferencial	14,3	57,1	100	71,4
Quinta	85,7	28,6	28,6	0,0
Diferencial	57,1	57,1	28,6	0,0

Levando-se em conta apenas às frequências de engrenamento, observa-se deste conjunto de câmbios analisados que provavelmente exista a presença de um erro de manufatura ou montagem no diferencial, como pode ser observado pelas porcentagens da segunda e terceira marchas.

Nota-se também, a provável existência de erros de manufatura ou montagem no par da terceira marcha para este conjunto de câmbios avaliados.

Pela análise das porcentagens das amplitudes superiores às estimadas para o câmbio padrão, podemos concluir que o par relacionado à quarta marcha apresenta uma pequena probabilidade de ocorrência de erros de manufatura ou montagem.

Nos quadros 6.1 a 6.7 são apresentadas as ocorrências de amplitude acima do valor estimado para o câmbio padrão para os sinais de vibração associados à segunda, terceira, quarta e quinta marchas, bem como para os diferenciais dos câmbios em questão. Nestes quadros cada ocorrência encontra-se assinalada com o caractere x.

No quadro 6.1 pode-se verificar que o sinal referente ao câmbio *rumoroso* provavelmente indica a presença de defeitos no par engrenado da quinta marcha e no diferencial. O rumor do diferencial pode ser observado quando foram engatadas a segunda e terceira marchas.

Quadro 6.1 - Ocorrências de amplitude e fase do câmbio *rumoroso* acima do estimado para o câmbio padrão.

Par engrenado	Amplitude		Fase	
	Feng 1	Feng 2	Feng 1	Feng 2
Segunda	x		x	x
Diferencial	x	x		
Terceira	x			x
Diferencial	x	x	x	x
Quarta		x		
Diferencial		x	x	x
Quinta	x	x		
Diferencial				

A partir dos resultados obtidos pelo procedimento de demodulação, observa-se no quadro 6.2 que o câmbio denominado *rumoroso 1* apresenta defeitos na segunda e terceira marchas. O defeito no diferencial fica mais bem caracterizado quando a segunda marcha encontra-se engrenada. Contudo, durante o engate da terceira marcha observa-se, para a segunda frequência de engrenamento, a ocorrência de valor superior ao obtido para a média dos sinais considerados bons.

Quadro 6.2 - Ocorrências de amplitude e fase do câmbio *rumoroso I* acima do estimado para o câmbio padrão.

Par engrenado	Amplitude		Fase	
	Feng 1	Feng 2	Feng 1	Feng 2
Segunda	x	x	x	
Diferencial	x	x	x	x
Terceira	x	x	x	x
Diferencial		x	x	x
Quarta		x		
Diferencial			x	x
Quinta	x			
Diferencial			x	

Como pode ser visto no quadro 6.3, a demodulação dos sinais das marchas do câmbio *rumoroso II* mostra que as amplitudes da primeira frequência de engrenamento e de seu segundo harmônico apresentam valores superiores aos obtidos para os sinais do câmbio bom, quando do engate da terceira marcha. Isto também ocorre com a primeira e segunda frequência de engrenamento associadas ao diferencial para esta mesma marcha. Para quase

todos os pares, exceto para o da quarta marcha, nota-se a presença de amplitudes maiores que as obtidas para o sinal bom associadas à primeira frequência de engrenamento da segunda e quinta marchas.

Quadro 6.3 - Ocorrências de amplitude e fase do câmbio *rumoroso II* acima do estimado para o câmbio padrão.

Par engrenado	Amplitude		Fase	
	Feng 1	Feng 2	Feng 1	Feng 2
Segunda		x	x	x
Diferencial	x		x	x
Terceira	x	x	x	
Diferencial	x	x	x	x
Quarta		x		
Diferencial			x	x
Quinta	x		x	
Diferencial	x			

Para o câmbio denominado *golpe no diferencial*, cujos resultados da demodulação se encontram no quadro 6.4, as amplitudes são superiores àquelas encontradas para o câmbio padrão, indicando claramente defeitos no diferencial quando do engreno da segunda, terceira e quarta marchas. Dos dados obtidos pelo procedimento de demodulação para este caso, apenas o par da terceira marcha apresenta amplitudes da frequência de engrenamento e do seu primeiro harmônico, superiores as encontradas para o sinal do câmbio bom.

Quadro 6.4 - Ocorrências de amplitude e fase do câmbio *golpe no diferencial* acima do estimado para o câmbio padrão.

Par engrenado	Amplitude		Fase	
	Feng 1	Feng 2	Feng 1	Feng 2
Segunda			x	
Diferencial	x	x	x	
Terceira	x	x		
Diferencial	x	x	x	x
Quarta				
Diferencial	x	x	x	x
Quinta	x		x	
Diferencial		x	x	

Para o câmbio *golpe no diferencial I*, no quadro 6.5 são mostradas ocorrências de amplitudes maiores que as encontradas para o câmbio padrão. A presença de amplitudes superiores às estimadas para o câmbio padrão nas frequências de engrenamento do diferencial e seus harmônicos, tanto para a segunda, terceira e quinta marchas, evidencia algum problema associado à montagem ou fabricação deste par de engrenagens.

Apesar de a segunda e quinta marchas possuírem amplitudes maiores que os valores associados a estas marchas para o câmbio bom, apenas a terceira marcha apresenta esta ocorrência associada às duas freqüências de interesse, indicando uma grande probabilidade de que esta marcha possua defeitos associados à montagem ou fabricação.

Quadro 6.5 - Ocorrências de amplitude e fase do câmbio golpe no diferencial I acima do estimado para o câmbio padrão.

Par engrenado	Amplitude		Fase	
	Feng 1	Feng 2	Feng 1	Feng 2
Segunda		x		
Diferencial	x	x	x	
Terceira	x	x	x	x
Diferencial	x	x		x
Quarta			x	
Diferencial		x		
Quinta	x			
Diferencial	x	x		

Da análise das amplitudes demoduladas dos sinais de vibração para as marchas do câmbio golpe no diferencial II, verifica-se a ocorrência de amplitudes maiores que aquelas obtidas para o câmbio padrão apenas para o par de engrenagens do diferencial, independente da marcha engrenada, como pode ser visto no quadro 6.6. Este resultado é um claro indicativo de que esta transmissão apresenta uma grande probabilidade de defeito de fabricação ou montagem relacionada ao diferencial.

Quadro 6.6 - Ocorrências de amplitude e fase do câmbio golpe no diferencial II acima do estimado para o câmbio padrão.

Par engrenado	Amplitude		Fase	
	Feng 1	Feng 2	Feng 1	Feng 2
Segunda		x	x	
Diferencial	x	x	x	x
Terceira	x		x	x
Diferencial	x	x		x
Quarta			x	
Diferencial				
Quinta		x		
Diferencial	x			

No quadro 6.7 pode-se observar que as amplitudes demoduladas dos sinais relativos à segunda, terceira e quinta marchas do câmbio golpe no diferencial III são maiores que as respectivas amplitudes obtidas para os sinais de vibração do câmbio padrão, indicando uma elevada probabilidade de defeitos de montagem ou fabricação para o diferencial. Além disto,

também se nota que as amplitudes das frequências de engrenamento da terceira e quinta marchas se encontram acima dos valores estimados para as mesmas marchas do câmbio padrão.

Quadro 6.7 - Ocorrências de amplitude e fase do câmbio *golpe no diferencial III* acima do estimado para o câmbio padrão.

Par engrenado	Amplitude		Fase	
	Feng 1	Feng 2	Feng 1	Feng 2
Segunda		x	x	x
Diferencial	x	x	x	x
Terceira	x	x	x	
Diferencial	x	x	x	
Quarta				x
Diferencial		x	x	x
Quinta	x	x		
Diferencial	x	x		

6.5 Cálculo da Energia da parcela temporal obtida para as frequências de interesse via Transformada de Choi-Williams.

Para avaliar o estado dos câmbios defeituosos também foi estimada a energia contida no sinal de vibração para a primeira e segunda frequência de engrenamento e as suas respectivas bandas laterais à esquerda e a direita. Este procedimento foi efetuado após a aplicação da transformada de Choi-Williams ao sinal de vibração seguida da construção de um vetor com a parcela temporal associada a estas frequências. A tabela 6.3 mostra a porcentagem do número de vezes em que os valores de energia estimados para os sinais de vibração dos câmbios defeituosos foram, em média, 2,5 dB maiores que os obtidos para o câmbio padrão para a segunda, terceira, quarta e quinta marcha.

A inexistência de valores de energia para a segunda frequência de engrenamento e suas bandas laterais para a quarta e quinta marcha é devido a estas serem maiores que a máxima frequência obtida para a transformada de Choi-Williams destes sinais, que para esta transformada tempo-frequência é definida como a metade da frequência de Nyquist, sendo neste caso de 4096 Hz (Flandrin e Martin, 1985).

Considerando-se as frequências de engrenamento, nota-se para este conjunto de câmbios analisados a provável existência de um erro de manufatura ou montagem para o diferencial, como pode ser observado pelas porcentagens calculadas para a segunda, terceira e quinta marchas.

Nesta análise global observa-se também a ocorrência de erros de manufatura ou montagem para o par de engrenagens da segunda e quinta marchas deste conjunto de câmbios.

Da análise das porcentagens de ocorrência de energia relativas às frequências de interesse dos câmbios defeituosos as quais são superiores aquelas obtidas para o câmbio padrão, podemos concluir que o par relacionado à terceira marcha possui uma baixa probabilidade de que erros de manufatura ou montagem estejam presentes. O par associado à quarta marcha apresenta um índice razoável de ocorrências para as bandas laterais (71,4%). Contudo uma baixa porcentagem associada à frequência de engrenamento, onde se concentra mais energia que nas bandas laterais, permite inferir que também exista uma baixa probabilidade de ocorrência de defeitos neste par.

Tabela 6.3 - Porcentagem de energia acima do estimado para o câmbio padrão.

Par Engrenado		Banda Lat. Esq.	Feng 1	Banda Lat. Dir.	Banda Lat. Esq.	Feng 2	Banda Lat. Dir.
Segunda	Primário	100	57,14	71,4	100	85,7	100
	Diferencial	71,4	28,6	57,14	100	100	100
Terceira	Primário	0,0	71,4	14,3	14,3	28,6	85,7
	Diferencial	100	100	85,7	100	100	100
Quarta	Primário	71,4	42,9	71,4	---	---	---
	Diferencial	0,0	0,0	28,6	28,6	14,3	14,3
Quinta	Primário	100	100	85,7	---	---	---
	Diferencial	100	85,7	57,1	14,3	0,0	28,6

Nos quadros 6.8 até 6.9, as ocorrências de valores de energia associadas às frequências de engrenamento e suas bandas laterais para a segunda, terceira, quarta e quinta marchas de cada câmbio analisado que apresentaram valores maiores que as energias calculadas para as respectivas frequências do câmbio sem rumorosidade são indicadas com o caractere **x**.

No quadro 6.8, relativo ao câmbio *rumoroso*, nota-se que os sinais de vibração da segunda, quarta e quinta marchas apresentam energias acima do estimado para o câmbio padrão. Para a quinta marcha observa-se que a primeira frequência de engrenamento e sua banda lateral à esquerda relativas ao diferencial possuem energia acima daquela estimada para o câmbio não rumoroso. Quando do engate da segunda marcha este câmbio também apresentou valores de energia superiores aos estimados para o câmbio bom, principalmente para a segunda frequência de engrenamento e suas bandas laterais.

Quadro 6.8 - Ocorrências de energia do câmbio *rumoroso* acima do estimado para o câmbio padrão.

Par Engrenado		Banda Lat. Esq.	Feng 1	Banda Lat. Dir.	Banda Lat. esq	Feng 2	Banda Lat. Dir.
Segunda	Primário	x	x	x	x	x	x
	Diferencial	x			x	x	x
Terceira	Primário		x		x		x
	Diferencial	x	x	x	x	x	x
Quarta	Primário	x	x	x	---	---	---
	Diferencial						
Quinta	Primário	x	x	x	---	---	---
	Diferencial	x	x		x		

Para o câmbio *rumoroso I*, no quadro 6.9 observa-se que a quinta marcha apresenta uma grande probabilidade de defeito de montagem ou fabricação. De modo não tão acentuado, verifica-se uma provável rumorosidade relacionada ao diferencial, como pode ser notado durante o engate da segunda e quinta marchas, nas quais todos os valores de energia associados às freqüências de interesse são maiores que os estimados para a mesma marcha do câmbio padrão.

Quadro 6.9 - Ocorrências de energia do câmbio *rumoroso I* acima do valor estimado para o câmbio padrão.

Par Engrenado		Banda Lat. Esq.	Feng 1	Banda Lat. Dir.	Banda Lat. esq	Feng 2	Banda Lat. Dir.
Segunda	Primário	x			x	x	x
	Diferencial	x		x	x	x	x
Terceira	Primário		x				x
	Diferencial	x	x	x	x	x	x
Quarta	Primário	x		x	---	---	---
	Diferencial				x	x	x
Quinta	Primário	x	x	x	---	---	---
	Diferencial	x	x				

As energias dos sinais de vibração obtidas para o câmbio *rumoroso II* mostradas no quadro 6.10 indicam a presença de defeitos de fabricação ou montagem para a segunda marcha, como pode ser visto pela presença de valores maiores que os obtidos para todas as freqüências de engrenamento e bandas laterais do câmbio padrão. Para a freqüência de engrenamento e banda lateral esquerda da quinta marcha observa-se também valores de energia superiores aos estimados para a mesma marcha do câmbio padrão, indicando uma provável presença de desvio de forma ou erro de montagem.

Exceto durante o engate da quarta marcha, o sinal vibratório associado ao diferencial apresenta valores de energia maiores que o do câmbio bom para a segunda, terceira e quinta marchas. Sendo esta situação menos acentuada para a segunda marcha do que para a

terceira e quinta. A presença de valores elevados de energia em quase todas as marchas é um forte indício de defeitos no par de engrenagens do diferencial.

Quadro 6.10 - Ocorrências de energia do *câmbio rumoroso II* acima do estimado para o câmbio padrão.

Par Engrenado		Banda Lat. Esq.	Feng 1	Banda Lat. Dir.	Banda Lat. esq	Feng 2	Banda Lat. Dir.
Segunda	Primário	x	x	x	x	x	x
	Diferencial	x		x	x	x	x
Terceira	Primário						x
	Diferencial	x	x	x	x	x	x
Quarta	Primário				---	---	---
	Diferencial						
Quinta	Primário	x	x		---	---	---
	Diferencial	x	x	x			

No quadro 6.11, as energias dos sinais de vibração obtidas para o câmbio *golpe no diferencial* indicam a presença de defeitos de fabricação ou montagem para a segunda, quarta e quinta marchas. Como pode ser visto, no engrenamento da quarta e quinta marchas, os valores de energia são superiores aos obtidos para o câmbio padrão em todas as frequências de engrenamento e bandas laterais.

Durante o engate da terceira e da quinta marcha, o sinal de vibração associado ao diferencial apresenta energia maior do que as obtidas para o câmbio bom considerando-se a mesma configuração. A presença de valores de energia acima do estimado para o câmbio bom, em todas as frequências e bandas laterais ocorre apenas quando do engate da terceira marcha, sendo que para a quinta marcha têm-se este comportamento somente para as frequências das bandas laterais, indicando uma tendência moderada de defeito.

Quadro 6.11 - Ocorrências de energia do câmbio *golpe no diferencial* acima do estimado para o câmbio padrão.

Par Engrenado		Banda Lat. Esq.	Feng 1	Banda Lat. Dir.	Banda Lat. esq	Feng 2	Banda Lat. Dir.
Segunda	Primário	x		x	x	x	x
	Diferencial				x	x	x
Terceira	Primário		x				x
	Diferencial	x	x	x	x	x	x
Quarta	Primário	x	x	x	---	---	---
	Diferencial			x			
Quinta	Primário	x	x	x	---	---	---
	Diferencial	x		x			

As ocorrências de energia superiores aos valores do câmbio padrão para os sinais de vibração das marchas do câmbio *golpe no diferencial I* são mostradas na quadro 6.12. Observa-se que a segunda e quinta marchas apresentam, para todas as freqüências de engrenamento e bandas laterais, valores maiores que os obtidos para o câmbio padrão. Para a quarta marcha nota-se este comportamento apenas para as bandas laterais, indicando uma tendência marginal de defeito.

No engate da segunda, terceira e quinta marchas, verifica-se a presença de energia acima dos valores estimados para o câmbio padrão para todas as freqüências de engrenamento e bandas laterais, caracterizando uma forte possibilidade de defeito neste componente.

Quadro 6.12 - Ocorrências de energia do câmbio *golpe no diferencial I* acima do estimado para o câmbio padrão.

Par Engrenado		Banda Lat. Esq.	Feng 1	Banda Lat. Dir.	Banda Lat. esq	Feng 2	Banda Lat. Dir.
Segunda	Primário	x	x	x	x	x	x
	Diferencial	x	x	x	x	x	x
Terceira	Primário		x	x	x		
	Diferencial	x	x	x	x	x	x
Quarta	Primário	x		x	---	---	---
	Diferencial						
Quinta	Primário	x	x	x	---	---	---
	Diferencial	x	x	x			

No quadro 6.13 são mostradas as ocorrências de energia superiores aos valores do câmbio padrão para os sinais de vibração das marchas do câmbio *golpe no diferencial II*. Observa-se para a segunda marcha valores de energia superiores aos obtidos para o câmbio padrão em todas as freqüências de engrenamento e bandas laterais. Na terceira marcha, verifica-se este comportamento apenas para a primeira e segunda freqüência de engrenamento e para a banda lateral à direita da segunda freqüência de engrenamento, mostrando uma relativa tendência de defeito.

No engate da segunda, terceira e quinta marchas, nota-se a presença de energia acima dos valores estimados para o câmbio padrão em todas as freqüências de engrenamento e bandas laterais, novamente caracterizando uma forte possibilidade de defeito deste componente.

Quadro 6.13 - Ocorrências de energia do câmbio *golpe no diferencial II* acima do valor estimado para o câmbio padrão.

Par Engrenado		Banda Lat. Esq.	Feng 1	Banda Lat. Dir.	Banda Lat. esq	Feng 2	Banda Lat. Dir.
Segunda	Primário	x	x	x	x	x	x
	Diferencial		x	x	x	x	x
Terceira	Primário		x			x	x
	Diferencial	x	x	x	x	x	x
Quarta	Primário				---	---	---
	Diferencial						
Quinta	Primário	x	x	x	---	---	---
	Diferencial	x	x	x	x		x

No quadro 6.14, as energias dos sinais de vibração obtidas para o câmbio *golpe no diferencial III* indicam a presença de defeitos de fabricação ou montagem na terceira marcha,, onde se pode ver que os valores de energia são superiores aos obtidos para o câmbio padrão em todas as freqüências de engrenamento e bandas laterais.

Durante o engate da segunda, terceira e quinta marcha, o sinal de vibração associado ao diferencial apresenta energia maior que as obtidas para o câmbio bom considerando-se a mesma situação. Sendo que todas as freqüências de engrenamento e bandas laterais da terceira marcha possuem valores de energia acima do calculado para o câmbio padrão, indicando uma grande probabilidade de ocorrência de defeito de fabricação. No engate da segunda e quinta marchas, os valores de energia acima do que fora estimado para o câmbio bom, ocorre somente para algumas freqüências de interesse do diferencial.

Quadro 6.14 - Ocorrências de energia do câmbio *golpe no diferencial III* acima do valor estimado para o câmbio padrão.

Par Engrenado		Banda Lat. Esq.	Feng 1	Banda Lat. Dir.	Banda Lat. esq	Feng 2	Banda Lat. Dir.
Segunda	Primário	x			x	x	x
	Diferencial	x		x	x	x	x
Terceira	Primário		x			x	x
	Diferencial	x	x		x	x	x
Quarta	Primário	x	x	x	---	---	---
	Diferencial			x			
Quinta	Primário	x	x	x	---	---	---
	Diferencial	x	x		x		x

6.6 Índice de Rumorosidade (*IR*) para a energia da parcela temporal obtida para a frequência de interesse da transformada de Choi-Williams.

Como forma de contabilizar simultaneamente as informações contidas na energia das frequências de engrenamento e bandas laterais foi proposto um índice de rumorosidade (*IR*). Este índice é uma média ponderada das energias calculadas para as bandas laterais e frequências de engrenamento. Para as frequências de engrenamento foi atribuído um peso maior, em virtude de seu conteúdo de energia representar uma parcela significativa da energia global do sinal de engrenamento.

$$IR = (4E_{feng} + 6E_{bandalateral}) / 10 \quad (6.1)$$

6.6.1 Avaliação do diferencial.

Na figura 6.4 são mostrados os gráficos dos índices de rumorosidade para o diferencial para cada uma das marchas. Os índices de rumorosidade para o diferencial, relativo ao engrenamento da segunda, terceira, quarta e quinta marcha são respectivamente mostrados nas figuras 6.4.a, 6.4.b, 6.4.c e 6.4.d. Os valores adimensionais foram obtidos tendo como referência o *IR* de cada frequência de engrenamento do câmbio padrão.

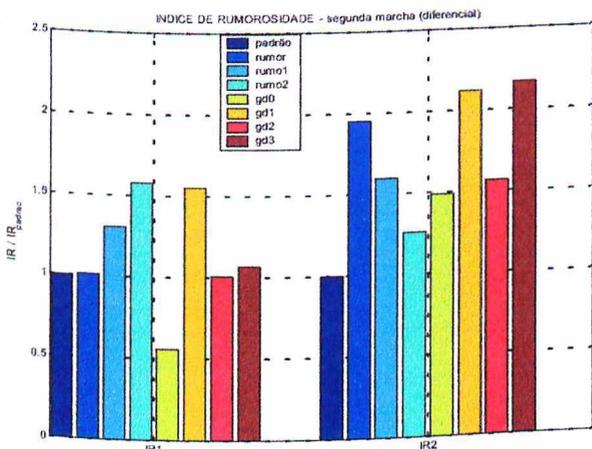
Quando a segunda marcha se encontra engrenada, vê-se que os câmbios: *rumoroso*, *rumoroso I* e *II* e *golpe no diferencial I, II e III* apresentam *IR* superior ao calculado para o câmbio padrão em todas as frequências de engrenamento, indicando uma elevada probabilidade de defeito de fabricação ou montagem do diferencial.

Para o câmbio rotulado "gd0" – *golpe no diferencial*, observa-se *IR* maior que o do câmbio padrão apenas para a segunda frequência de engrenamento, implicando numa menor probabilidade de defeito.

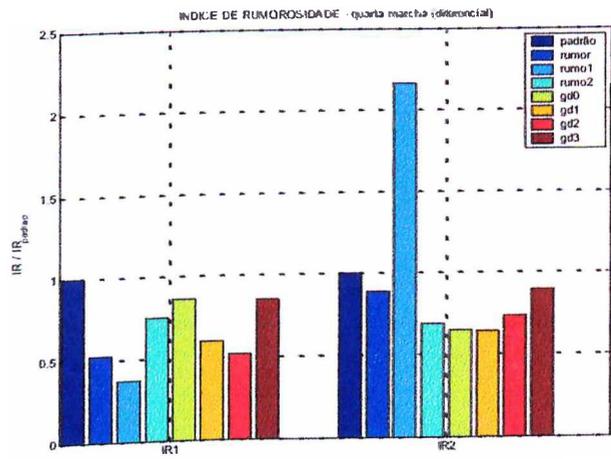
Como pode ser visto na figura (6.4.b), todos os índices de rumorosidade calculados para o terceiro par engrenado são superiores aos obtidos para o câmbio padrão, independentemente da frequência de engrenamento considerada. Neste caso, todas as caixas de transmissão possuem uma grande probabilidade de apresentarem defeito de fabricação ou montagem.

Quando a quarta marcha esteve engrenada, somente o câmbio *rumoroso I* acusou um *IR* maior que o do câmbio padrão, sendo que isto aconteceu apenas para a segunda frequência de engrenamento.

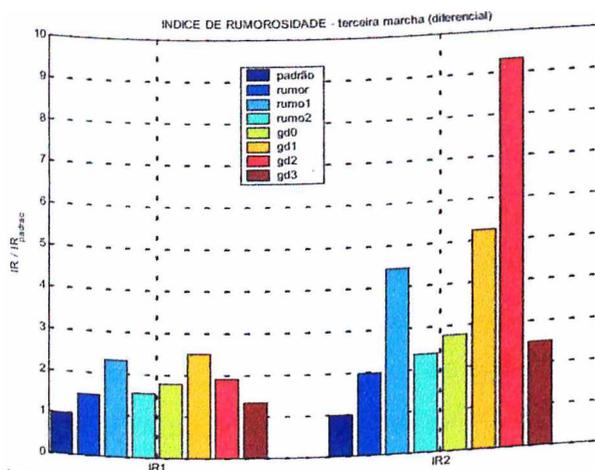
Na figura (6.4.d) estão mostrados os índices de rumorosidade relativos ao diferencial durante o engrenamento da quinta marcha. Apenas para os câmbios denominados *golpe no diferencial* II e III, os índices de rumorosidade calculados para a segunda frequência de engrenamento apresentaram valores superiores ao obtido para o câmbio padrão para esta mesma frequência. Para a primeira frequência de engrenamento todos os câmbios apresentaram *IR* maior que o do câmbio padrão para a mesma frequência, evidenciando uma alta probabilidade de existência de defeitos associados ao diferencial.



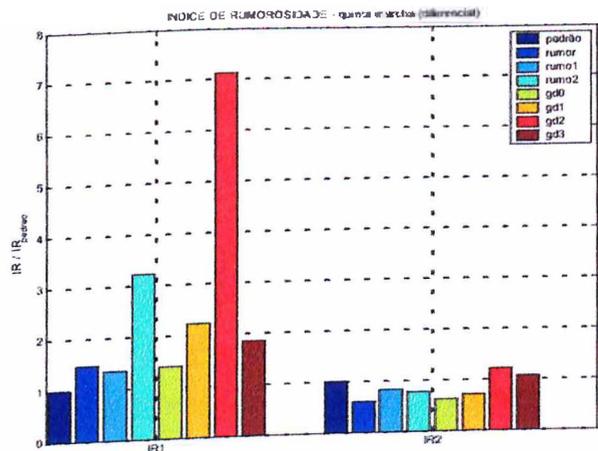
(6.4.a)



(6.4.c)



(6.4.b)



(6.4.d)

Figura 6.4 – Índices de Rumorosidade para o diferencial em função da marcha.

Como se pode observar no quadro 6.15, todos os índices de rumorosidade calculados para os sinais de vibração relativos ao diferencial dos câmbios analisados encontram-se acima do valor estimado para o câmbio bom pelo menos durante o engrenamento de duas marchas.

A quarta marcha foi aquela na qual houve um menor número de ocorrências, sendo apenas uma para a segunda frequência de engrenamento do câmbio *rumoroso I*. Já a terceira

marcha foi a que apresentou maior número de ocorrências. Das caixas de transmissão avaliadas a que apresentou um menor número de índices de rumorosidade acima do calculado para o câmbio padrão foi a denominada *golpe no diferencial*, com ocorrências para a primeira frequência de engrenamento da terceira e da quinta marchas e para a segunda frequência de engrenamento da segunda e terceira marchas.

Quadro 6.15 – Ocorrências de *IR* acima do valor estimado para o câmbio padrão (diferencial).

Câmbio	Segunda		Terceira		Quarta		Quinta	
	Feng. 1	Feng. 2	Feng. 1	Feng. 2	Feng. 1	Feng. 2	Feng. 1	Feng. 2
Rumoroso	x	x	x	x			x	
Rumoroso 1	x	x	x	x		x	x	
Rumoroso 2	x	x	x	x			x	
Golpe no diferencial		x	x	x			x	
Golpe no diferencial I	x	x	x	x			x	
Golpe no diferencial II	x	x	x	x			x	x
Golpe no diferencial III	x	x	x	x			x	x

6.6.2 Avaliação das marchas

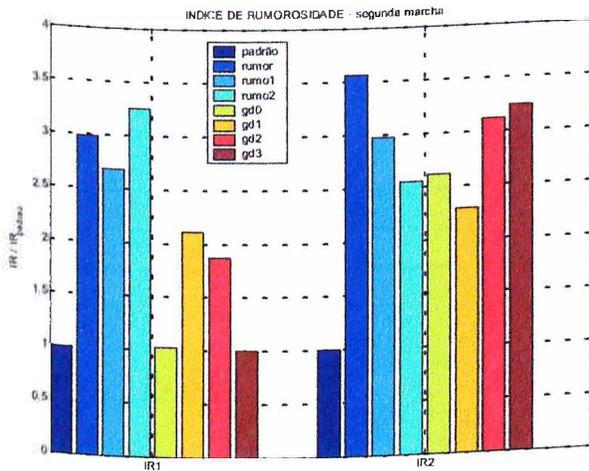
Na figura 6.5 são mostrados os gráficos dos índices de rumorosidade para cada uma das marchas. Os Índices de Rumorosidade para a segunda, terceira, quarta e quinta marchas encontram-se, respectivamente nas figuras 6.5.a, 6.5.b, 6.5.c e 6.5.d. Novamente os valores adimensionais foram obtidos tendo como referência o *IR* de cada frequência de engrenamento do câmbio padrão.

Quando do engrenamento da segunda marcha – figura (6.5.a), pode-se ver que de todos os câmbios, apenas o rotulado como *golpe no diferencial III* apresentou um *IR* menor que o calculado para o câmbio padrão para a primeira frequência de engrenamento. Os demais apresentaram *IR* superior ao calculado para o câmbio padrão em todas as frequências de engrenamento, indicando uma elevada probabilidade de defeito de fabricação ou montagem.

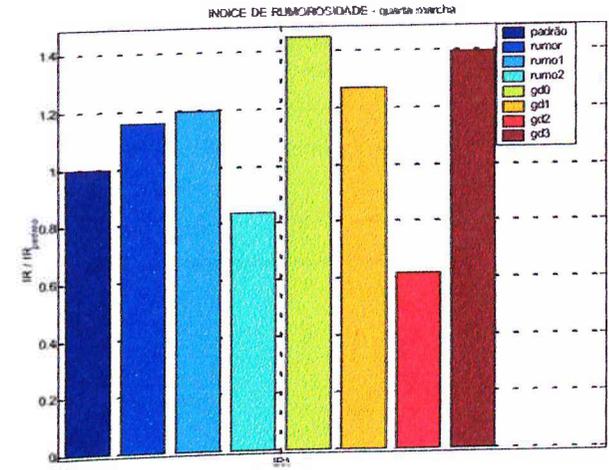
Como pode ser visto na figura (6.5.b), todos os índices de rumorosidade calculados para a primeira frequência de engrenamento da terceira marcha são inferiores aos obtidos para o câmbio padrão. Para a segunda frequência de engrenamento os índices de rumorosidade são menores apenas para as caixas de transmissão: *rumoroso II* e *golpe no diferencial*.

Quando a quarta marcha esteve engrenada, somente os câmbios: *rumoroso II* e *golpe no diferencial II* não acusaram índices de rumorosidade maiores que o calculado para a primeira frequência de engrenamento do câmbio padrão, como pode ser visto na figura (6.5.c).

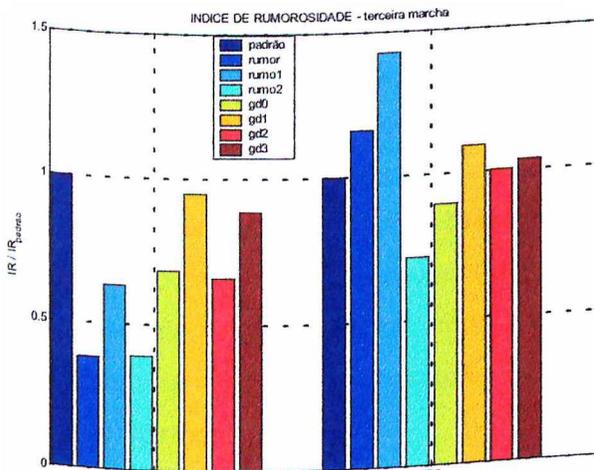
Na figura (6.5.d) estão mostrados índices de rumorosidade relativos ao engrenamento da quinta marcha. Todos os índices de rumorosidade para a primeira frequência de engrenamento apresentaram valores superiores ao obtido para o câmbio padrão para nesta mesma frequência, o que implica em uma alta probabilidade de existência de defeitos associados a este par de engrenagens.



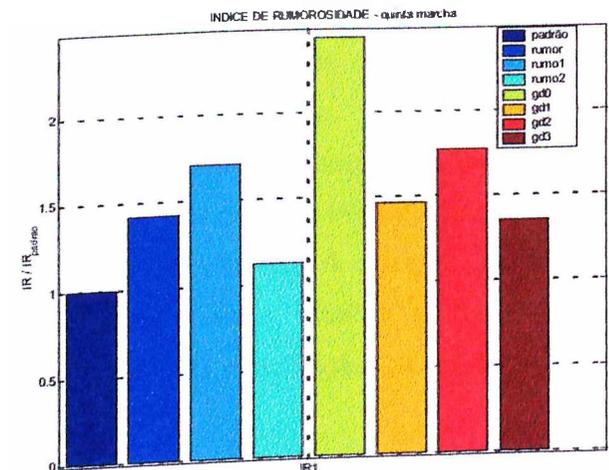
(6.5.a)



(6.5.c)



(6.5.b)



(6.5.d)

Figura 6.5 – Índices de Rumorosidade para o diferencial para a segunda, terceira, quarta e quinta marcha.

Do quadro 6.16 pode-se verificar que todos os câmbios analisados possuem índices de rumorosidade superiores ao estimado para o câmbio bom em pelo menos duas marchas.

De modo geral, a terceira marcha foi aquela na qual houve um menor número de ocorrências, sendo que nenhuma para a primeira frequência de engrenamento. Já a segunda e quinta marchas foram as que mais apresentaram incidências.

Das caixas de transmissão avaliadas a que apresentou menor número de ocorrências foi a rotulada como *rumoroso II*, com incidências para a primeira frequência de engrenamento da

segunda e da quinta marchas e para a segunda frequência de engrenamento da segunda marcha.

Quadro 6.16 – Ocorrências de *IR* acima do valor estimado para o câmbio padrão (marchas).

Câmbio	Segunda		Terceira		Quarta		Quinta	
	Feng. 1	Feng. 2	Feng. 1	Feng. 2	Feng. 1	Feng. 2	Feng. 1	Feng. 2
Rumoroso	x	x		x	x	---	x	---
Rumoroso 1	x	x		x	x	---	x	---
Rumoroso 2	x	x				---	x	---
Golpe no diferencial	x	x			x	---	x	---
Golpe no diferencial I	x	x		x	x	---	x	---
Golpe no diferencial II	x	x		x		---	x	---
Golpe no diferencial III		x		x	x	---	x	---

6.7) Conclusões.

De modo geral, a demodulação da amplitude e da fase dos sinais de vibração obtidos para o câmbio 14-58 mostrou coerência em relação aos estados previamente conhecidos das caixas de transmissão. Infelizmente as fases demoduladas não podem ser utilizadas de modo confiável para determinar qual a marcha que apresenta rumorosidade e qual sua gravidade, devido ao ensaio ser realizado sem carga na saída do câmbio sob teste.

Os resultados alcançados com o uso da energia das parcelas temporais associadas às frequências de engrenamento e bandas laterais da transformada Choi-Williams foram bastante coerentes com o estado previamente conhecido de cada câmbio. A adoção do índice de rumorosidade, que pondera com maior incidência a energia relativa à frequência de engrenamento mostrou-se bastante eficaz e tornou mais fácil a definição global do estado do sistema de engrenamento.

Capítulo VII

Conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros

As principais conclusões deste trabalho foram:

- Os sinais gerados com o modelo adotado possibilitaram avaliar as metodologias propostas devido principalmente a grande semelhança dos sinais simulados com os sinais reais e a confiança em se variar o tipo de defeito e o seu nível. Outra característica vantajosa da modelagem utilizada consiste em sua simplicidade e rapidez para a geração dos sinais.
- A técnica de demodulação da amplitude e da fase dos sinais de engrenamento mostrou-se eficiente para a análise dos sinais simulados, conseguindo diferenciar os tipos de modulação e quantificá-las, sendo uma metodologia de fácil implementação e rápida execução e de reduzido custo computacional. Entretanto deve-se tomar cuidado quando de sua utilização devido à influência das bandas laterais de modulação sobrepostas às frequências de engrenamento que se deseja demodular.
- A decomposição de sinais via transformada S permite estimar o grau e o tipo de modulação presente no sinal desde que sejam retiradas as frequências que se encontram sobrepostas às bandas laterais de modulação, pois mesmo quando isto não é feito a decomposição se processa de maneira incoerente, mesmo respeitando o critério da conservação da energia, o que conduz a estimação de parâmetros inconsistentes. Uma grande desvantagem para o emprego deste método diz respeito ao elevado tempo necessário para a decomposição, causado pelo cálculo de transformada S ; pelo processo de otimização iterativo utilizado na escolha da janela que melhor se adapte as características presentes no sinal e posteriormente, pelo ajuste dos parâmetros da janela escolhida. Um dos pontos fortes da metodologia, que é a estimativa da fase instantânea, também pode ser determinada através da técnica de demodulação necessitando de um intervalo de tempo extremamente menor.
- A abordagem de "fatiamento" nas frequências de interesse da distribuição Choi-Williams aplicada aos sinais simulados de engrenamento permite avaliar a contribuição em energia ao longo do tempo para esta frequência, sem os inconvenientes causados pela presença de termos cruzados existentes em outras distribuições bidimensionais de energia. A dificuldade de interpretação dos mapas complexos resultantes da distribuição de Choi-Williams pode ser contornada pelo uso de procedimentos clássicos não paramétricos, sendo que destes, o nível

médio quadrático foi o que apresentou maior confiabilidade para detecção e mensuração dos defeitos e menor sensibilidade à presença de ruído.

- Em geral, como pode ser observado nas avaliações preliminares, o aumento da modulação ou da amplitude do sinal de engrenamento simulado implicou em uma redução da soma da magnitude dos biespectros e do biespectro. Contudo as exceções presentes em todas as situações analisadas não permitem considerar esta ferramenta na obtenção de um diagnóstico confiável. Outro fator a ser ressaltado, foi que em nenhuma das situações analisadas as abordagens adotadas permitiram determinar qual a marcha apresentou o maior grau de modulação.
- A demodulação da amplitude e da fase dos sinais de vibração obtidos para o câmbio 14-58 mostrou coerência em relação aos estados previamente conhecidos das caixas de transmissão. Infelizmente as fases demoduladas não podem ser utilizadas de modo confiável para determinar qual a marcha que apresenta rumorosidade e qual a sua gravidade, devido ao ensaio na sala de prova de câmbios ser realizado sem carga na saída da transmissão.
- Os resultados alcançados com o uso da energia das parcelas temporais associadas às frequências de engrenamento e bandas laterais da transformada Choi-Williams foram bastante coerentes com o estado previamente conhecido de cada câmbio. A adoção do índice de rumorosidade, que pondera com maior incidência a energia relativa à frequência de engrenamento mostrou-se bastante eficaz e tornou mais fácil a definição global do estado do sistema de engrenamento.
- Um inconveniente para aplicação da metodologia que utiliza a transformada Choi-Williams reside na elevada taxa de amostragem necessária para se observar os fenômenos relativos à segunda frequência de engrenamento, devido à característica inerente desta técnica, na qual a frequência de aquisição usada para a coleta de dados deve ser quatro vezes maior que a maior componente que se deseja observar.

Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

1. Para a demodulação da amplitude e da fase e também para a metodologia fundamentada na Transformada Choi-Williams, utilizar um conjunto maior de sinais de vibração medidos em câmbios bons e ruidosos, permitindo classificar e quantificar o grau do defeito em relação ao padrão estimado para o conjunto de câmbios bons.
2. Utilizar dados provenientes de testes realizados com carga na saída da caixa de transmissão, principalmente no procedimento de demodulação da amplitude e da fase e verificar se as fases estimadas trazem informações mais consistentes quanto ao estado dos câmbios, observando se isto aumentaria o grau de confiabilidade desta técnica na predição dos defeitos.
3. Utilizar procedimentos de classificação empregando redes neurais artificiais ou lógica "fuzzy" aplicados aos dados obtidos com a metodologia fundamentada na transformada de Choi-Williams visando quantificar de forma mais detalhada e confiável o estado das caixas de transmissão.
4. Empregar a decomposição via transformada Stockwell para caracterizar conjuntos de caixas de transmissão boas e ruidosas, como forma de se obter parâmetros mais confiáveis nas simulações e possível localização de defeitos.
5. Aplicar a metodologia biespectral aos sinais acústicos de câmbios ruidosos e bons obtidos durante os testes dos câmbios para verificar a capacidade de quantificar e qualificar as caixas ensaiadas.

Capítulo VIII

Referências Bibliográficas

- Aguirre, L. A., 2000, "Introdução à identificação de sistemas – técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais", Editora da UFMG, Belo Horizonte, MG.
- Alguidingue, I. E., Loskiewics-Buczak A. and Uhrig R. E., 1993, "Monitoring and Diagnosis of Rolling Element Bearing using Artificial Neural Networks", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 40, No. 2, April, pp. 209-217.
- Amabilli, M. and Fregolent, A., 1998, "A Method to Identify Modal Parameters and Gear Errors by Vibrations of a Spur Gear Pair", Journal of Sound and Vibration, vol. 214, No. 2, pp. 339-357
- Arakere, N. K. and Nataraj, C., 1998, "Vibration of High-Speed Spur Gear Webs", Journal of Vibration and Acoustics, vol. 120, July, pp. 791-800.
- Arato Jr., A. e Silva, D. G., 2001, "Análise estatística de sinais vibratórios na detecção de falhas em sistemas de engrenamento sujeitos a variação de potência", XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil, CDRROM.
- Barbetta, A. P., 1999, "Estatística aplicada às Ciências Sociais", 3ª Edição, Editora da UFSC, Florianópolis, SC.
- Barkov, A. V. and Barkova, N. A., 1996, "Diagnostics of gearing and geared couplings using envelope spectrum methods", Proceedings of the 20th Annual Meeting of the Vibration Institute, Saint Louis, Missouri, USA, pp. 75-83.
- Bartelmus, W., 2001, "Mathematical modelling and computer simulations as an aid to gearbox diagnosis", Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 14, No. 5, pp. 855-872.
- Beck, J. V. and Arnold, K. J., 1976, "Parameter Estimation in Engineering and Science", John Wiley & Sons, New York, USA.
- Bendat, J. S. And Piersol, A. G., 1986, "Random Data – analysis and measurement procedures", 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Berniere, A., D'Apuzzo, M., Sansone, L., and Savastano, M., 1994, "A neural network approach for identification and fault diagnosis on dynamic systems", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 43, No. 6, December, pp. 867-873.
- Bouillaut, L. and Sidahmed, M., 2001, "Cyclostationary approach and bilinear approach: comparison, applications to early diagnosis for helicopter gearbox and classification method based on HOCS", Vol. 15, No. 5, pp. 923-943.

- Boulaabal, D., Golnaraghi, M. F. and Ismail, F., 1999, "Amplitude and Phase Wavelet Maps for the Detection of Cracks in Geared Systems", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 13, No. 3, pp. 423-436.
- Braun, S. 1986, "Mechanical Signature Analysis – theory and applications", Academic Press, Inc., Florida, USA.
- Braun, S. and Datner, B., 1979, "Analysis of Roller/Ball Bearing Vibrations", *Transactions of the ASME*, Vol. 101, January, pp. 118-125.
- Brie, D., Tomczak, M., Oehlmann H. and Richard, A., 1997, "Gear crack detection by adaptive amplitude and phase demodulation", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 11, No. 1, pp. 149-167.
- Brito, J. N. e Léopore Neto, F. P., 1996, "Modelo para a rigidez de engrenamento", *Anais do IV Congresso de Engenharia Mecânica – Norte / Nordeste*, pp. 935-939.
- Brito, J. N., 1994, "Estudo dos efeitos dos erros geométricos e dos defeitos de engrenamento no comportamento dinâmico de redutores de eixo flexível", dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil.
- Bucher, H. F., Magluta, C., 1999, "Utilização de técnicas tempo-freqüência no auxílio à interpretação de sinais em engenharia", *XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Águas de Lindóia, SP, Brasil, CDROM.
- Choi, H-I. and Williams, W. J., 1989, "Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels", *IEEE Transactions of Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. 37, No. 6, pp. 862-871.
- Cohen, A. and Kovacevic, J. 1996, "Wavelets: the mathematical background", *Procedures on IEEE*.
- Cohen, L., 1995, "Time-Frequency Analysis", Prentice Hall Inc., New Jersey, USA.
- Collis, W. B., White, P. R. and Hammond, J. K., 1998, "Higher-order Spectra: The Bispectrum and Trispectrum", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 12, No. 3, pp. 357-394.
- Dalpiazz, G. and Rivola, A., 1997, "Condition Monitoring and Diagnostics in Automatic Machines: Comparison of Vibration Analysis Techniques", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 1, pp. 53-73.
- Dyer, D. and Stewart, R. M., 1978, "Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis", *Journal of Mechanical Design*, vol. 100, April, pp. 229-235.
- El Badaoui, M., Antoni, J., Guillet, F., Danière, J. and Velex, P., 2001, "Use of the moving cepstrum integral to detect and localize tooth spalls in gears", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, pp. 873-886

- Fackrell, J. W. A., White, P. R., Hammond, J. K., Pinnington, R. J. and Parsons, A. T., 1995a, "The interpretation of the bispectra of vibration signals – I Theory", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 9, No. 3, pp. 257-266.
- Fackrell, J. W. A., White, P. R., Hammond, J. K., Pinnington, R. J. and Parsons, A. T., 1995b, "The interpretation of the bispectra of vibration signals – II Experimental results and applications", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 9, No. 3, pp. 267-274.
- Freeman, A. J. and Skapura, D. M., 1992, "Neural Networks – Algorithms, Applications and Programming Techniques", Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company.
- Gregoris, D. J. and Yu, S., 1994, "Introduction to the theory and applications of wavelet transforms", *Spar Journal of Engineering and Technology*, Vol. 3, pp. 20-33.
- Guimarães, T. A., 2000, "Análise tempo-frequência de sinais de vibração aplicada à detecção de falhas em caixas de câmbio", *Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.*
- Howard, I., Jia, S. and Wang, J., 2001, "The dynamic modeling of spur gear in mesh including friction and a crack", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, pp. 831-854.
- Jaggi, S., Kani, W. C., Mallat, S. and Wilsky, A. S., 1998, "High resolution pursuits for feature extraction", *Applied and Computational Harmonic Analysis*, Vol. 5, pp. 428-449
- Jones, D. L. and Parks, T. W., 1992, "A resolution comparison of several time-frequency representations", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 40, No. 2, pp. 413-420
- Kadambe, S. and Boudreaux-Bartels, G. F., 1992, "A comparison of the existence of "cross terms" in the Wigner distribution and the squared magnitude of the Wavelet transform and the Short Time Fourier transform", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 40, No. 10, pp. 2498-2517
- Kokur, D. and Stanko, R., 2000, "Order bispectrum: A new tool for reciprocated machine condition monitoring", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 14, No. 6, pp. 871-890
- Lee, J. and Kramer, B. M., 1994, "Analysis of machine degradation using a Neural Network based Pattern Discrimination Model", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 12, No. 5, pp. 379-386
- Lépore Neto, F. P., Santos, M. B. e Barreto, R. G., 1999, "Detecção de defeitos em máquinas rotativas utilizando redes neurais e sinais de vibração tratados utilizando wavelet", *Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, SP, Brasil, CDROM.*
- Lépore Neto, F. P., Santos, M. B. e Barreto, R. G., 2001, "Caracterização de forças de excitação em máquinas rotativas usando redes neurais combinadas com a transformada

- wavelet", Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil, pp. 519-528, CDROM
- Levine, D. M., Berenson, M. L., Stephan, D., 1998, "Estatística: teoria e aplicações – usando o Microsoft Excell em Português", Editora Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, RJ.
- Lin, D. C., Golnaraghi, M. F. and Ismail, F., 1997, "The dimension on the gearbox signal", Journal of Sound and Vibration, Vol. 208, No. 4, pp. 664-670
- Liu, B. and Ling, S. -F., 1999, "On the selection of informative wavelets for machinery diagnosis", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 13, No. 1, pp. 145-162
- Liu, B. Ling, S. and Meng, Q., 1997, "Machinery diagnosis based on wavelet packets", Journal of Vibration and Control, Vol. 3, pp. 5-17
- Ma and Li, 1996, "Gear defect detection through model-based wideband demodulation of vibrations", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 10, No. 5, pp. 653-665
- Magalhães, M. N., de Lima, A. C. P., 2002, "Noções de probabilidade e estatística", 1ª edição, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Mallat, S. G. and Zhang Zhifeng, 1993, "Matching Pursuits with time-frequency dictionaries", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 41, No. 12, December, pp. 3397-3415
- Martin, W. and Flandrin, P., 1985, "Wigner-ville spectral analysis of nonstationary process", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 33, No. 6, pp. 1461-1470
- Masters, T., 1995, "Advanced algorithms for Neural Networks a C++ Sourcebook", John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- McFadden, P. D, 1986, "Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration", Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design, Vol. 108, pp. 165-170.
- McFadden, P. D, 1987a, "A revised model for the extraction of periodic waveforms by time domain averaging", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 1, No. 1, pp. 83-95
- McFadden, P. D, 1987b, "Examination of a technique for early detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of the meshing vibration", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 1, No. 2, pp. 173-183
- McFadden, P. D, 1989, "Interpolation technique for time domain averaging of gear vibration", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 3, No. 1, pp. 87-97
- McFadden, P. D., Cook, J. G. and Forster, L. M., 1999, "Decomposition of gear vibration signals by the generalized S Transform", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 13, No. 5, pp. 691-707.

- McFadden, P. D., Cook, J. G., Forster, L. M., 1999, "Decomposition of gear vibration signals by the generalized S transform", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 13, No. 5, pp. 691-707.
- Menegatti, W. B. e Duarte, M. A. V., 1999, "Identificação de falhas em engrenagens de câmbios", XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 22-26 de Novembro, Águas de Lindóia, São Paulo.
- Meng, Q. and Qu, L., 1991, "Rotating Machinery fault diagnosis using Wigner distribution", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 5, No. 3, pp. 155-166.
- Michalewicz, Z., 1994, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", AI Series, Springer-Verlag, New York, USA.
- Newland, D. E., 1993, "Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis", 3rd edition, Longman, Harlow and John Wiley, New York, USA.
- Newland, D. E., 1994a, "Wavelet analysis of vibration, Part I: Theory", *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 116, pp. 417-425.
- Newland, D. E., 1994b, "Wavelet analysis of vibration, Part II: Wavelet Maps", *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 116, pp. 409-416.
- Padovese, L. R., 1999, "Using Acoustical Noise for fault classification in gearbox", XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 22-26 de Novembro, Águas de Lindóia, São Paulo.
- Parker Jr., E. B., Ware, H. A., Wipf, D. P., Tompkins, W. R., Clark, B. R., Larson, E. C. and Poor, V. H., 2000, "Fault diagnostics using statistical change detection in the bispectral domain", *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 14, No. 4, pp. 561-570.
- Paya, B. A., Esat, I. I. and Badi, M. N. M., 1997, "Artificial Neural Network based fault diagnostics of rotating machinery using Wavelet transforms as a preprocessor", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 5, pp. 751-765.
- Peck, J. P. and Burrows, J., 1994, "On-line condition monitoring of rotating equipment using Neural Networks", *ISA Transactions*, Vol. 33, pp. 159-164.
- Peyrin, F. and Prost, R., 1986, "A Unified Definition for the Discrete-Time, Discrete-Frequency and Discrete-Time/Frequency Wigner Distributions", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. 34, No. 4, August, pp. 858-866.
- Qian, S. and Chen, D., 1996, "Joint time-frequency analysis", Ed. Prentice Hall, New York, USA.
- Randall, R. B., 1982, "A new method of modeling gear faults", *Journal of Mechanical Design*, Vol.104, April, pp. 259-267.

- Randall, R. B., 2001, "Editorial for special edition on gear and bearing diagnostics", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, No. 5, pp. 827-830.
- Randall, R. B., Antoni, J. and Chobsaard, S., 2001, "The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, No. 5, pp. 945-962.
- Ruzzene, M., Fasana, A., Garibaldi, L., Piombo, B., 1997, "Natural Frequencies and Dampings identification using wavelet transform: Application to real data", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 2, pp. 207-218.
- Santana, D., Ribeiro, C. R., Duarte, M. A. V. e Cabacinha, A., 1998, "Um procedimento estatístico para identificação de rumorosidades em câmbios em linhas de montagem", Congresso SAE Brasil'98, São Paulo, Brasil.
- Saramago, S. F. P., Assis, E. G. and Steffen, V., 1999, "Simulated Annealing: Some applications in mechanical systems optimization", Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 22-26 de Novembro, Águas de Lindóia, São Paulo.
- Staszewski, W. J. and Tomlinson, G. R., 1994, "Application of wavelet transform to fault detection in a spur gear", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 8, No. 3, pp. 289-307.
- Staszewski, W. J. and Tomlinson, G. R., 1997, "Local tooth fault detection in gearboxes using a moving window procedure", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 3, pp. 331-350.
- Staszewski, W. J., Worden, K. and Tomlinson, G. R., 1997, "Time-frequency analysis in gearbox fault detection using the Wigner-Ville distribution and pattern recognition", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 5, pp. 673-692.
- Stockwell, R. G., Mansinha, L. and Lowe, R. P., 1996, "Localization of the complex spectrum: The S transform", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 44, pp. 998-1001.
- Sun, M., Li, C-C., Sekhar, L. N. and Sciabassi, R. J., 1989, "Efficient computation of the discrete Pseudo-Wigner distribution", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. 37, No. 11, pp. 1735-1742.
- Teolis, A., 1998, "Computational signal processing with wavelets", Springer Verlag, USA.
- Velex, P. and Maatar, M., 1996, "A Mathematical model for analyzing the influence of shape deviations and mounting errors on gear dynamic behaviour", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 10, No. 5, pp. 629-660.

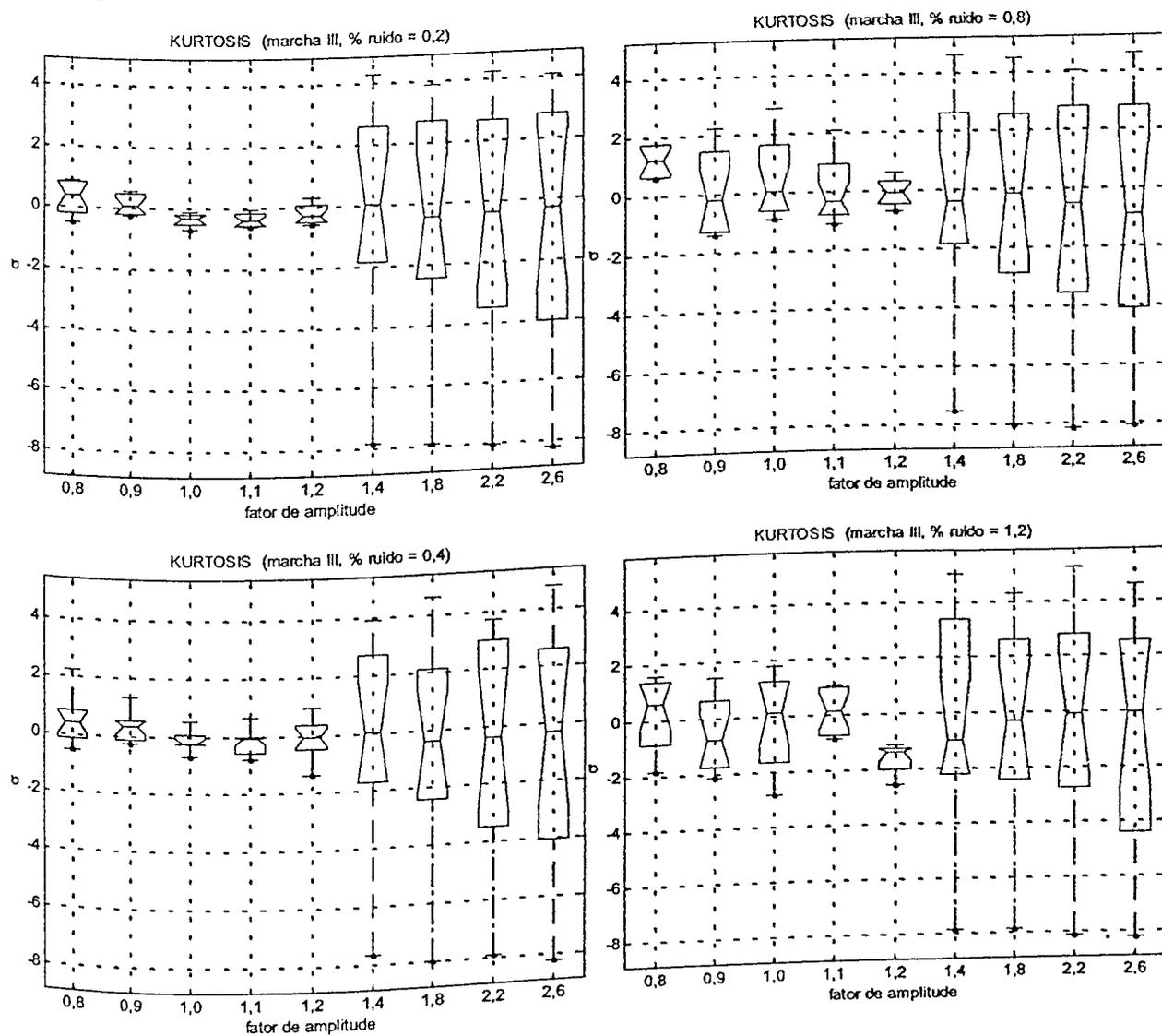
- Wang, W. J. and McFadden, P. D., 1993, "Early detection of gear failure by vibration analysis – I – Calculation of the time-frequency distribution", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 7, pp. 193-203.
- Wang, W. J. and McFadden, P. D., 1995a, "Application of orthogonal wavelets to early gear damage detection", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 9, No. 5, pp. 497-507.
- Wang, W. J. and McFadden, P. D., 1995b, "Decomposition of gear motion signals and its application to gearboxes diagnostics", *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 117, pp. 363-369.
- Wang, W. J. and McFadden, P. D., 1996, "Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 192, No. 5, pp. 927-939.
- Wang, W. Q., Ismail, F. and Golnaraghi, M. F., 2001, "Assessment of gear damage monitoring techniques using vibration measurements", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, No. 5, pp. 905-922.
- Wang, W., 2001, "Early detection of gear tooth cracking using resonance demodulation technique", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, No. 5, pp. 887-904.

ANEXO 1

Gráficos relativos à análise de sensibilidade para a metodologia de estimadores estatísticos aplicados às parcelas temporais da transformada Choi-Williams de sinais de engrenamento.

A.1) Análises para os sinais simulados de terceira marcha com mesmo nível de ruído.

a) Comportamento das kurtosis estimadas.



Figuras A.1.1 – Gráficos-caixas das kurtosis agrupadas segundo o mesmo fator de ruído em função do fator de amplitude (terceira marcha).

b) Comportamento das energias estimadas.

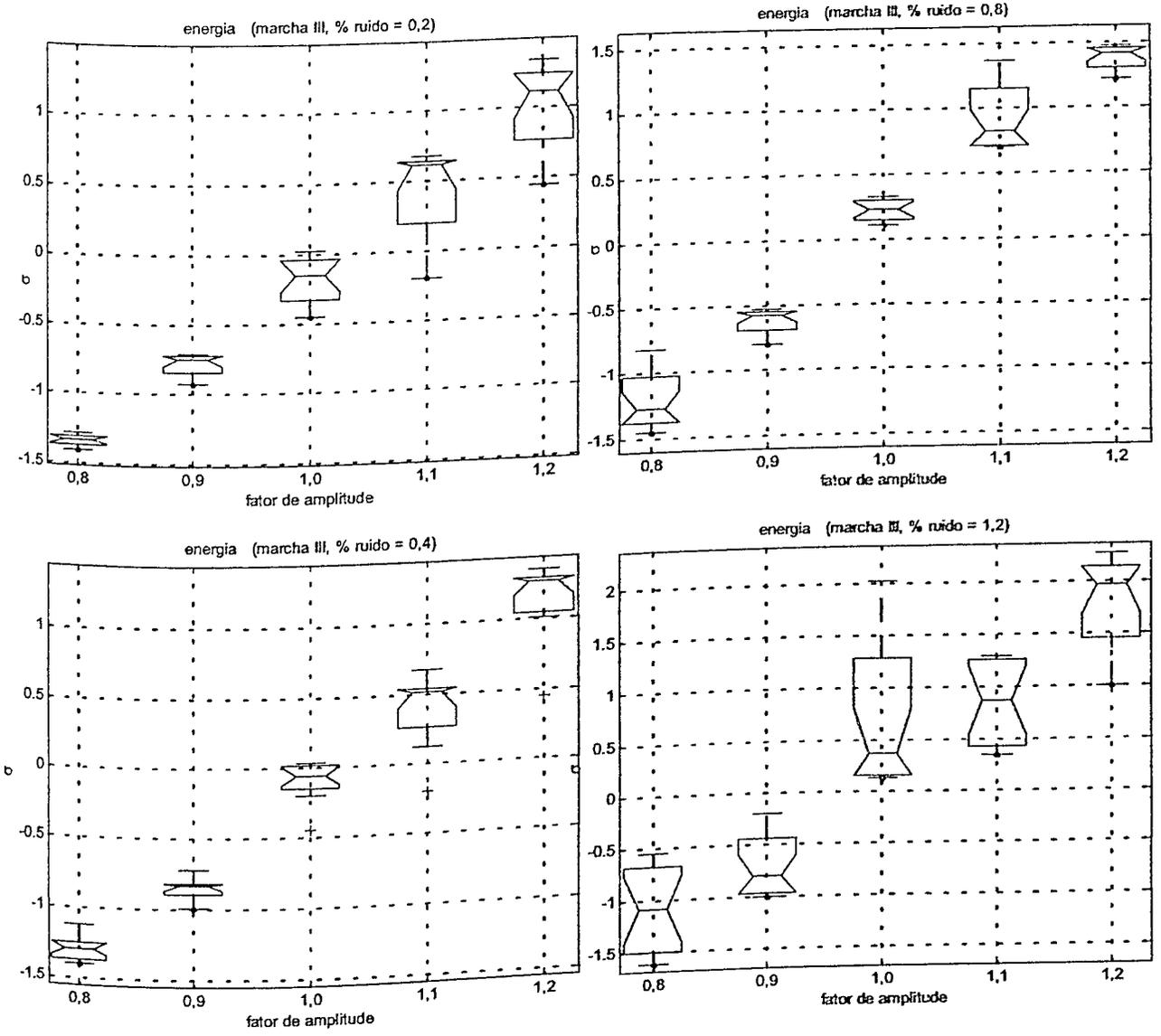


Figura A.1.2 – Gráficos-caixas das energias agrupadas segundo o fator de ruído versus fator de amplitude (sinais bons, terceira marcha)

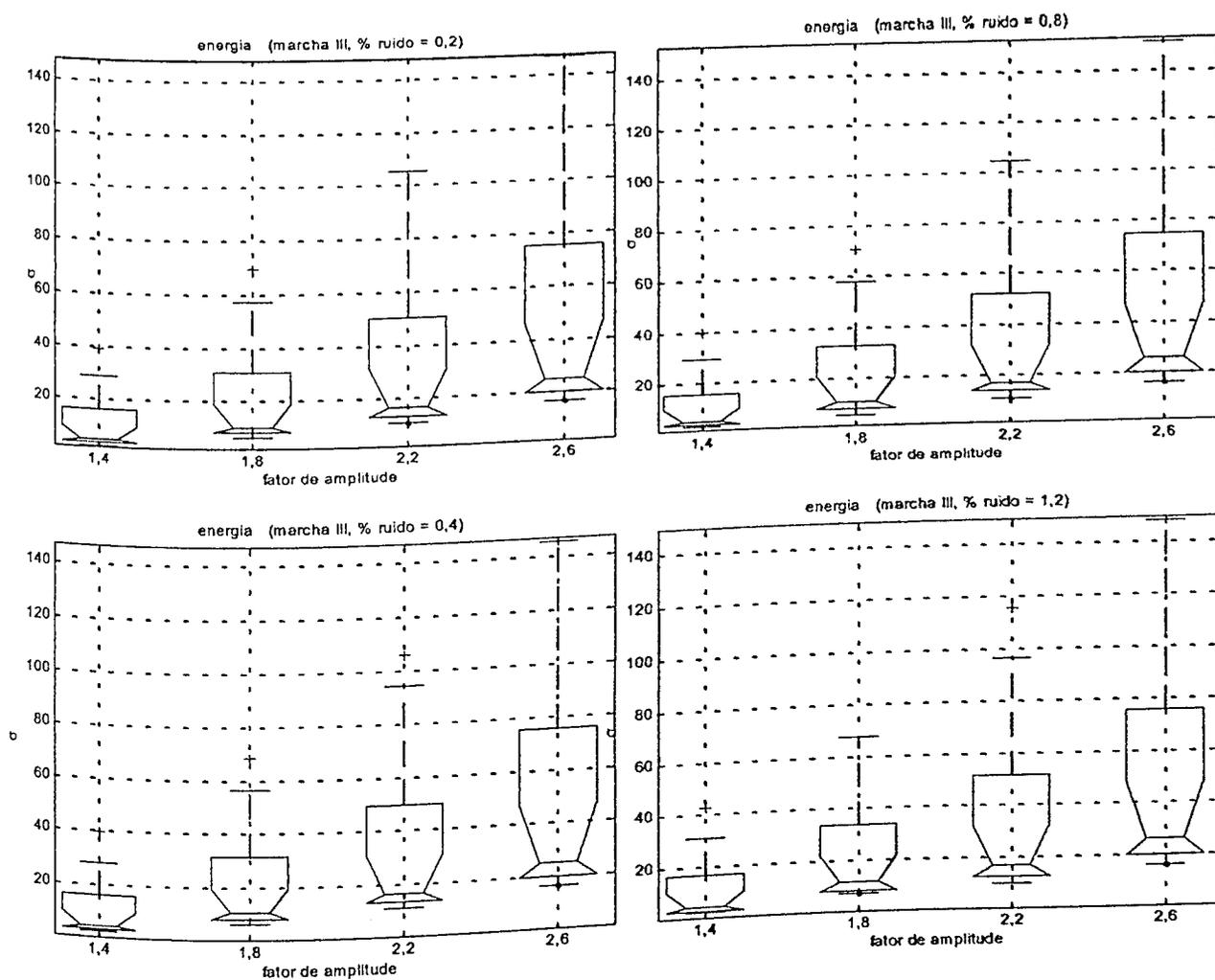


Figura A.1.3 – Gráficos-caixas das energias agrupadas segundo o fator de ruído versus fator de amplitude (sinais bons, terceira marcha).

A.2) Análise para os sinais simulados da quarta marcha com mesmo nível de ruído.

a) Comportamento das kurtosis estimadas.

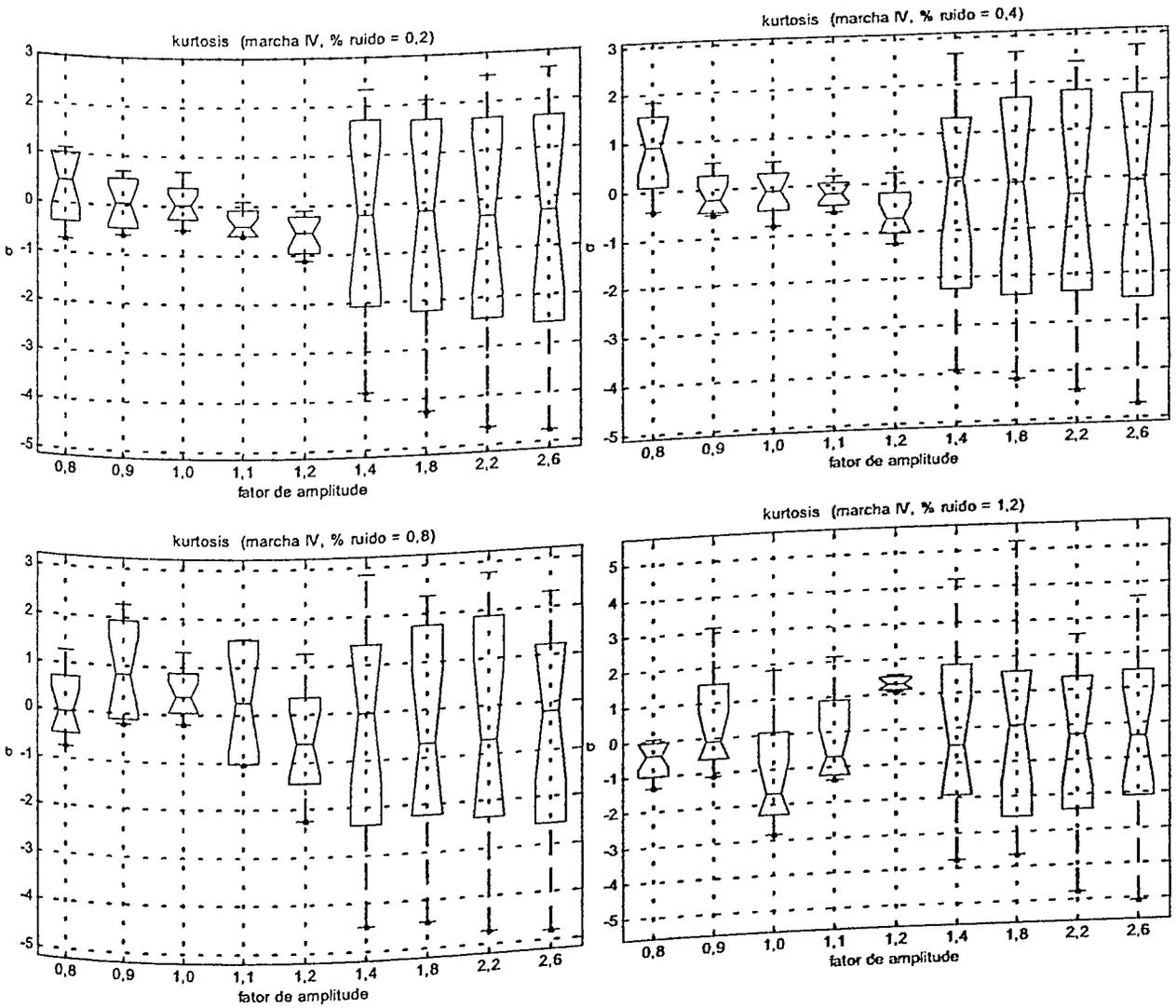


Figura A.1.4 – Gráficos-caixas da kurtosis agrupadas segundo o mesmo fator de ruído em função do fator de amplitude (quarta marcha).

b) Comportamento das energias estimadas.

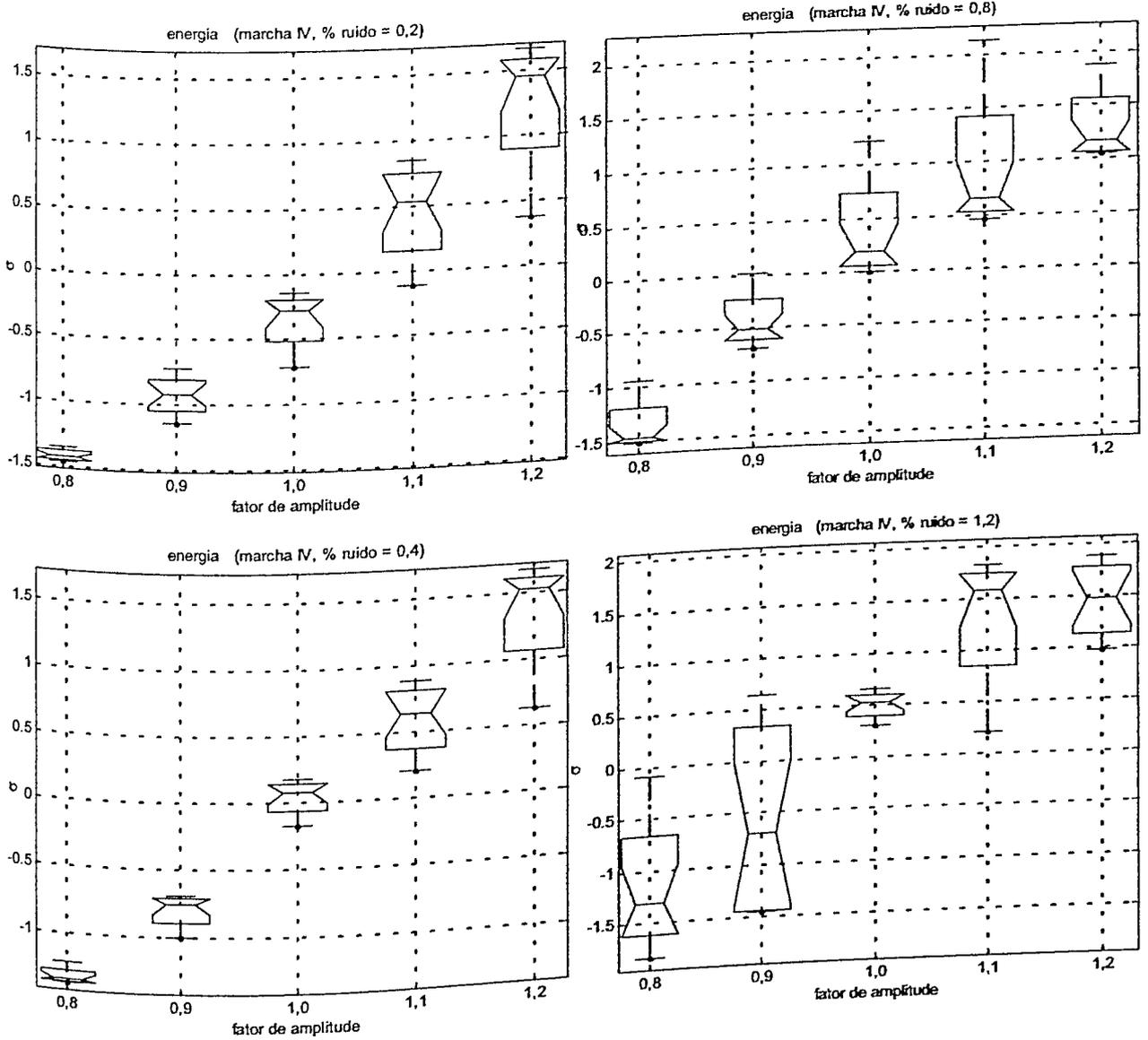


Figura A.1.5 – Gráficos-caixas das energias agrupadas segundo o fator de ruído versus fator de amplitude (sinais bons, quarta marcha).

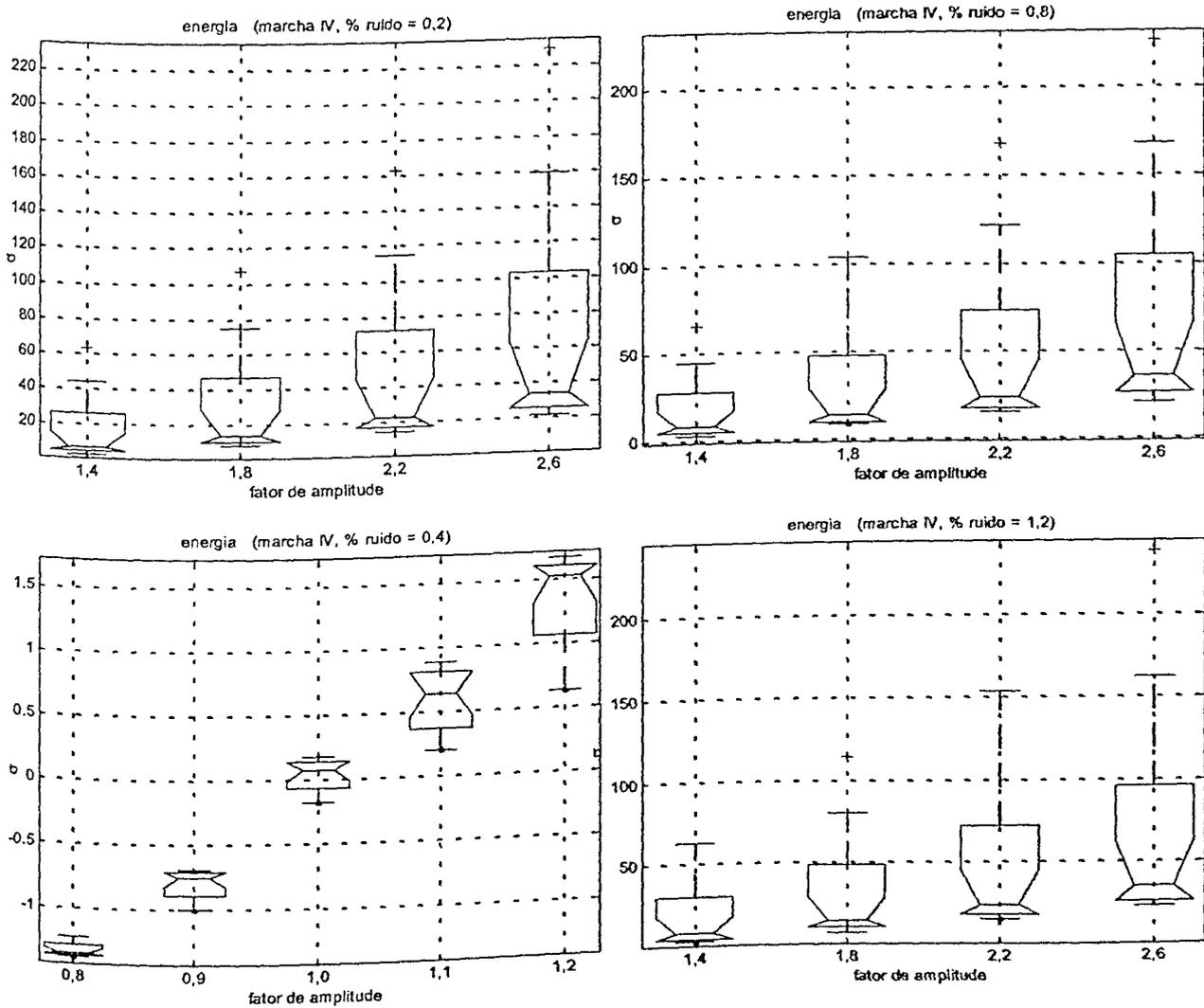


Figura A.1.6 – Gráficos-caixas das energias agrupadas segundo o fator de ruído *versus* fator de amplitude – (sinais defeituosos, quarta marcha).

A.3) Análise para os sinais simulados da terceira marcha mesmo fator de banda lateral.

a) Comportamento das kurtosis estimadas.

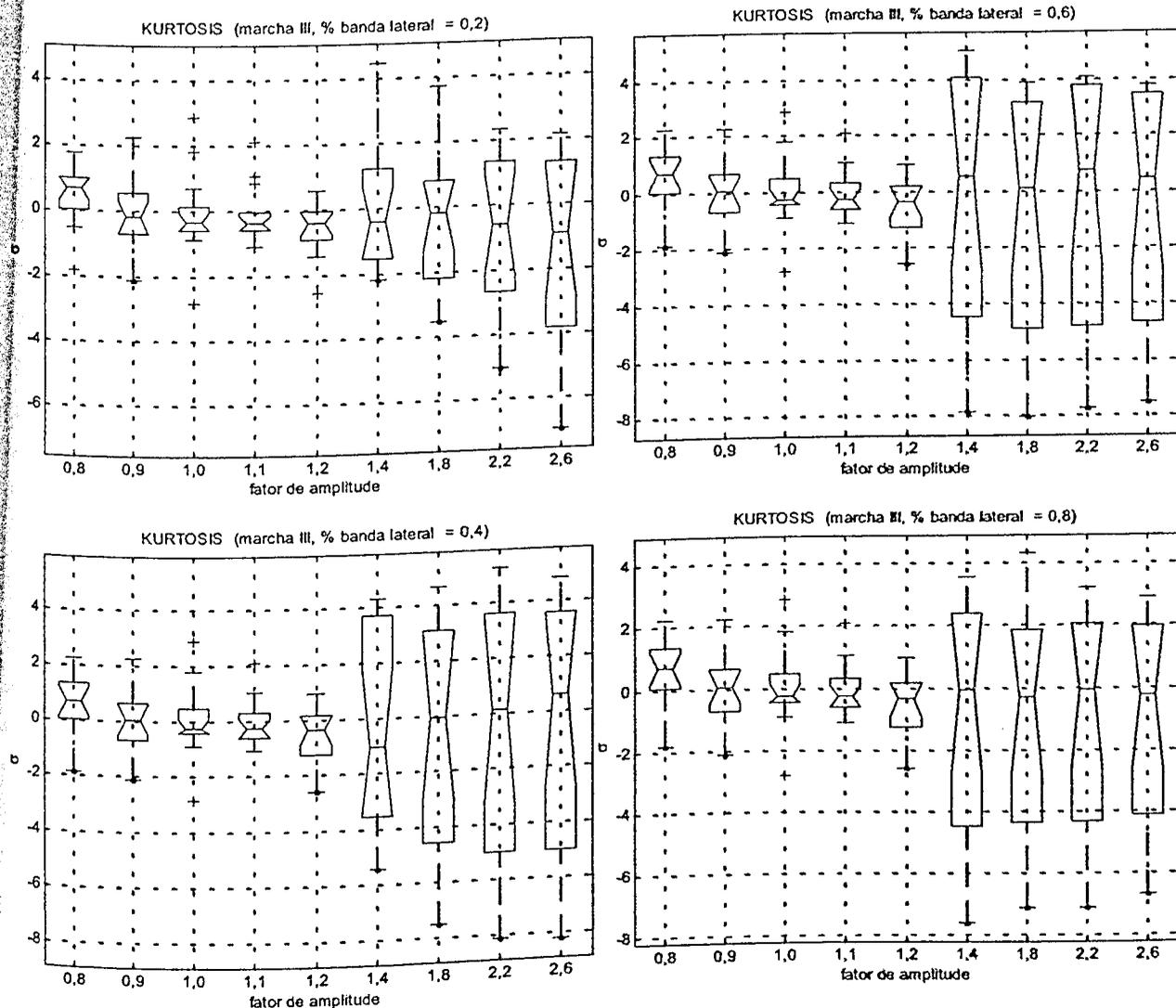


Figura A.1.7 – Gráficos-caixas das kurtosis agrupadas segundo o fator de modulação em função do fator de amplitude (terceira marcha).

b) Comportamento das energias estimadas.

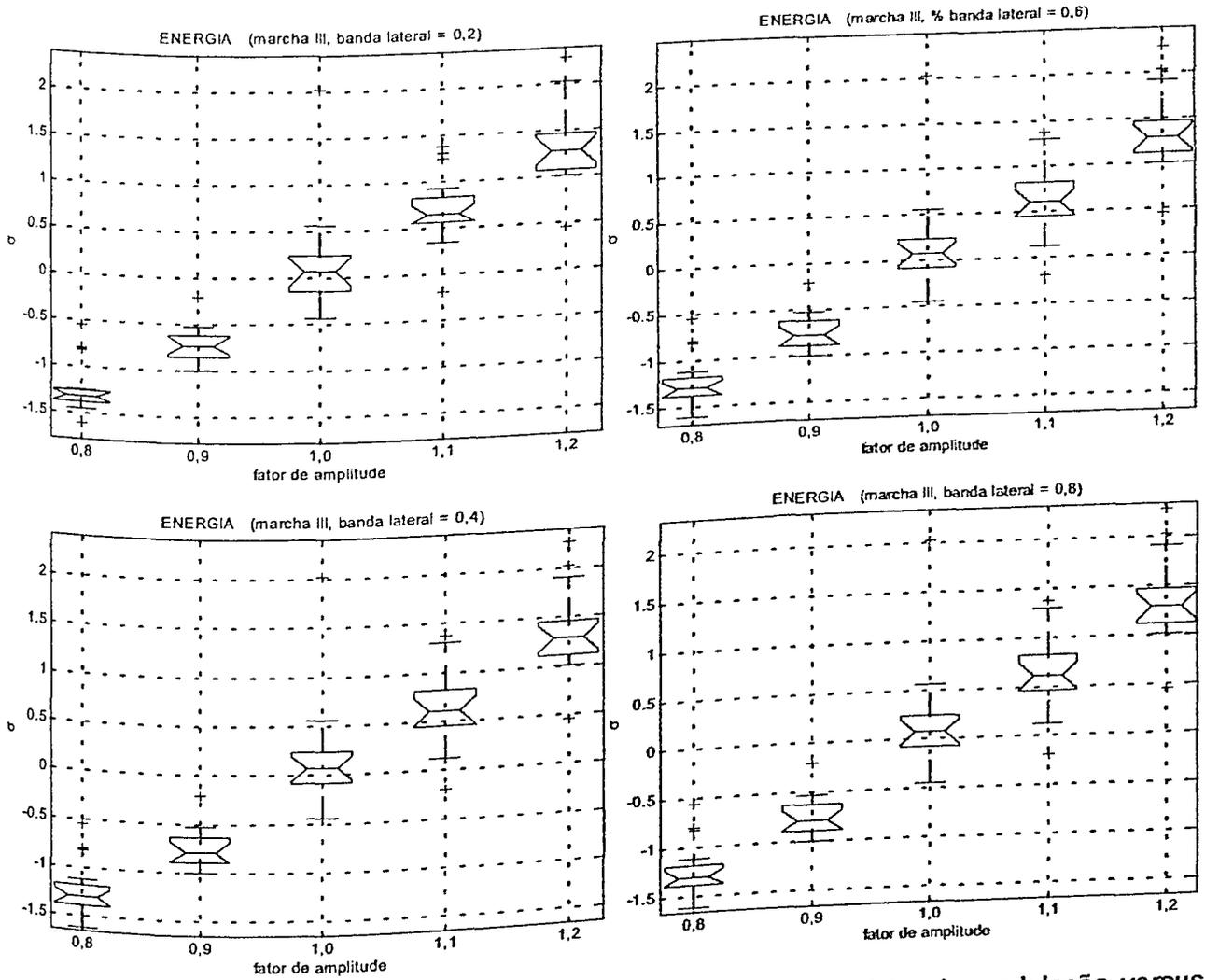


Figura A.1.8 – Gráficos-caixas das energias agrupadas segundo o fator de modulação versus fator de amplitude (sinais bons, terceira marcha).

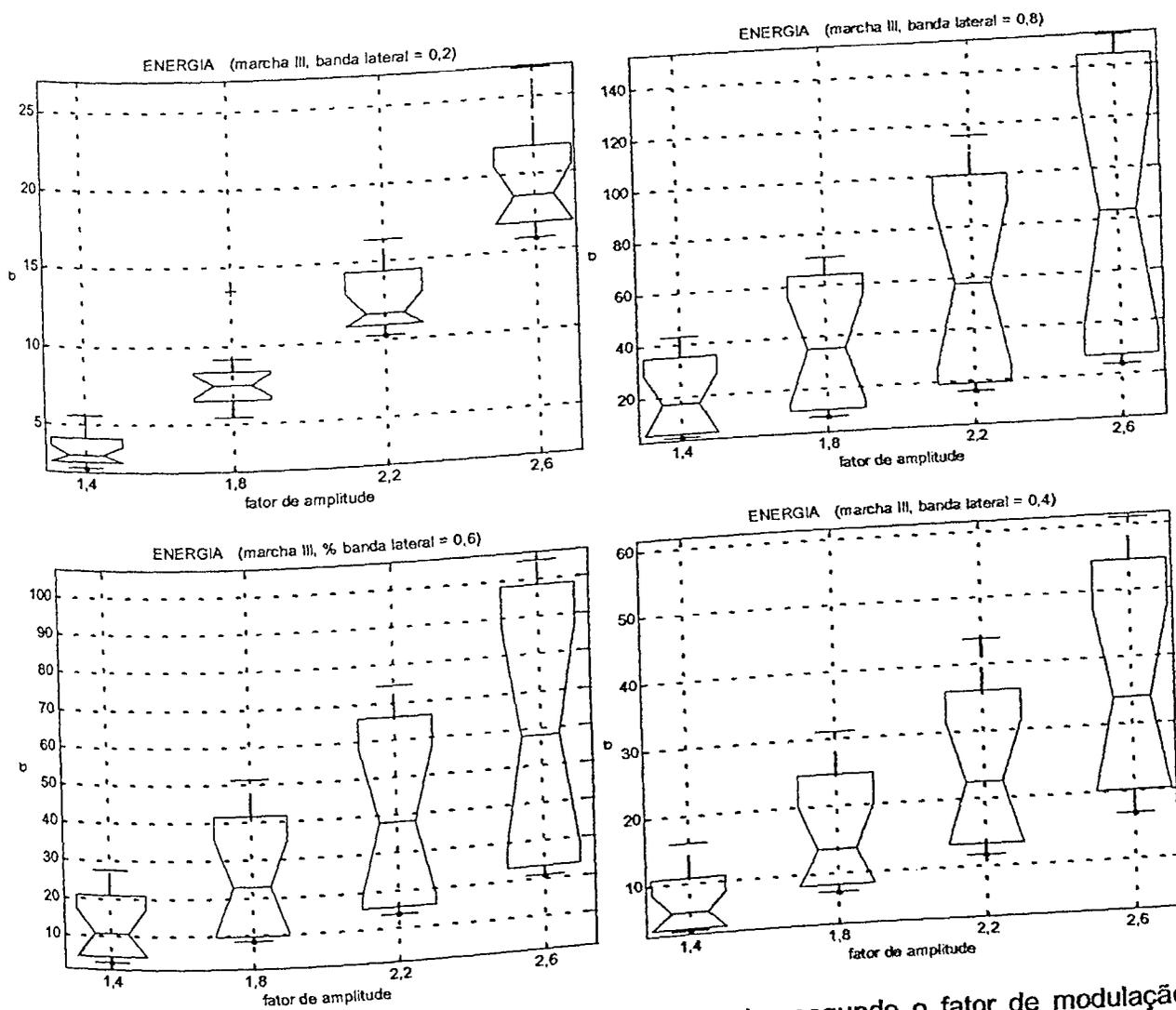


Figura A.1.9 – Gráficos-caixas das energias em agrupadas segundo o fator de modulação versus fator de amplitude (sinais defeituosos, terceira marcha).

A.4) Análise para os sinais simulados da quarta marcha mesmo fator de banda lateral.

a) Comportamento das kurtosis estimadas.

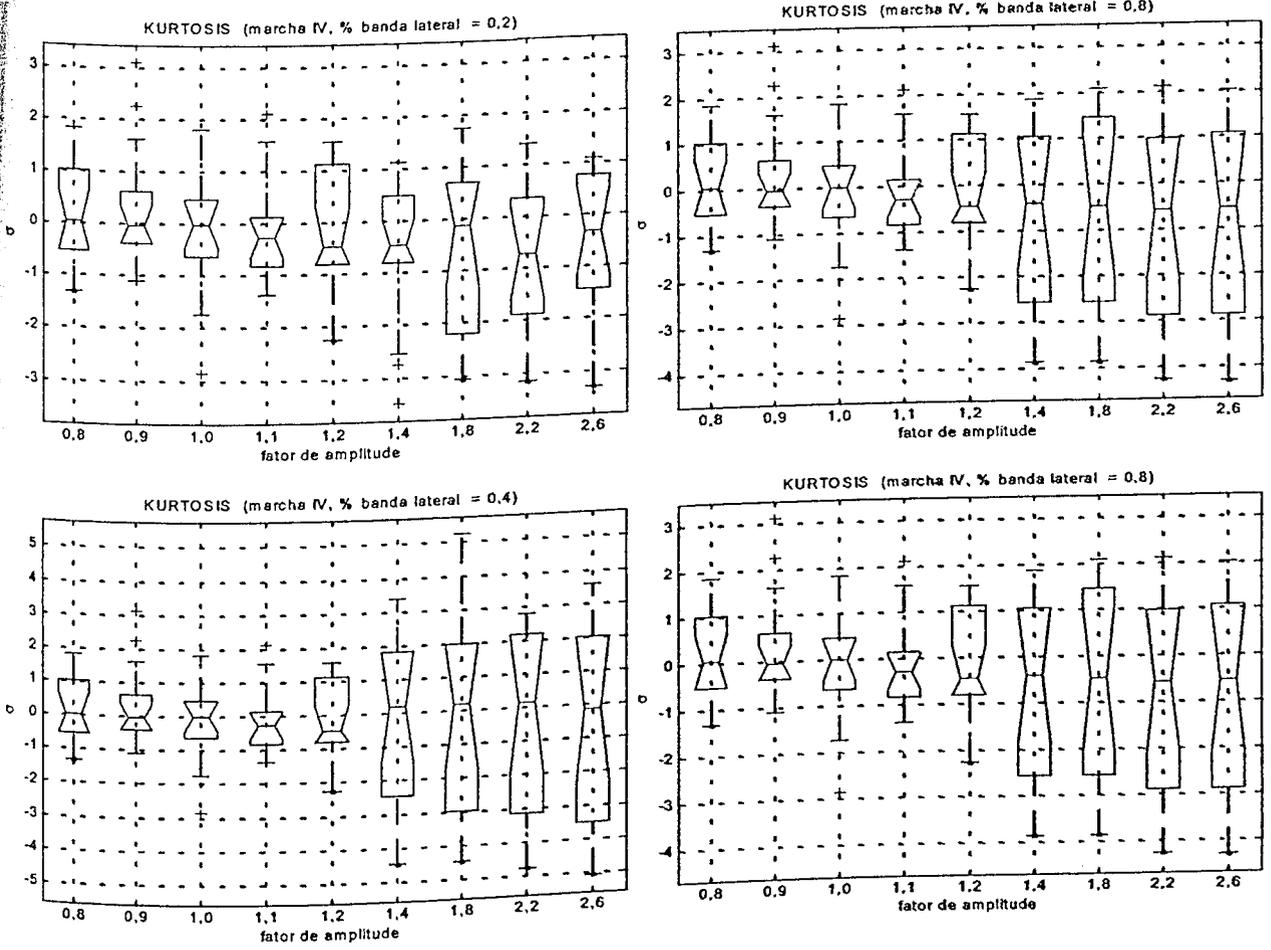


Figura A.1.10 – Gráficos-caixas das kurtosis agrupadas segundo o fator de modulação em função do fator de amplitude (quarta marcha).

b) Comportamento das energias estimadas para a quarta marcha.

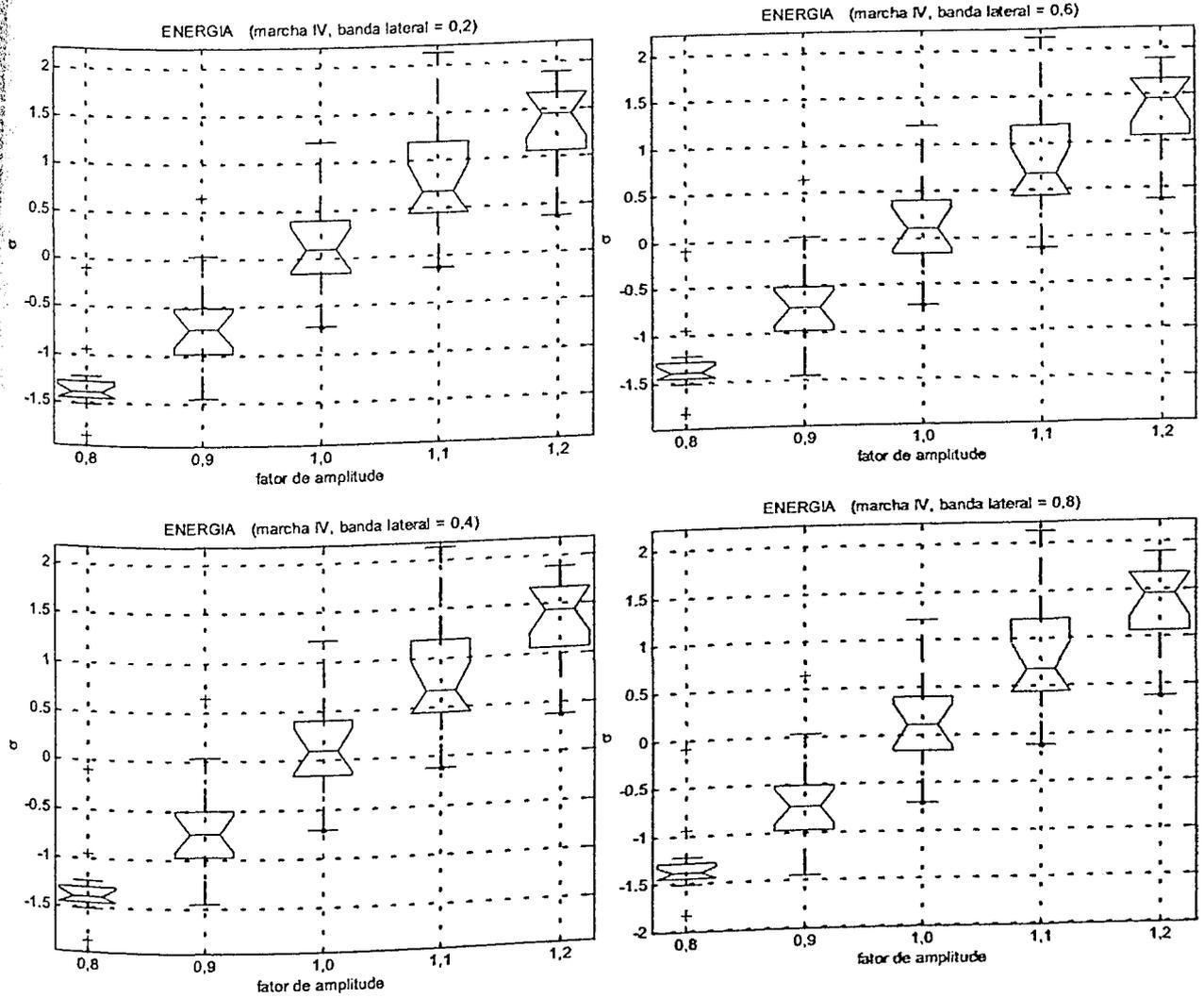


Figura A.1.11 – Gráficos-caixas das energias agrupadas segundo o fator de modulação versus fator de amplitude (sinais bons, quarta marcha).

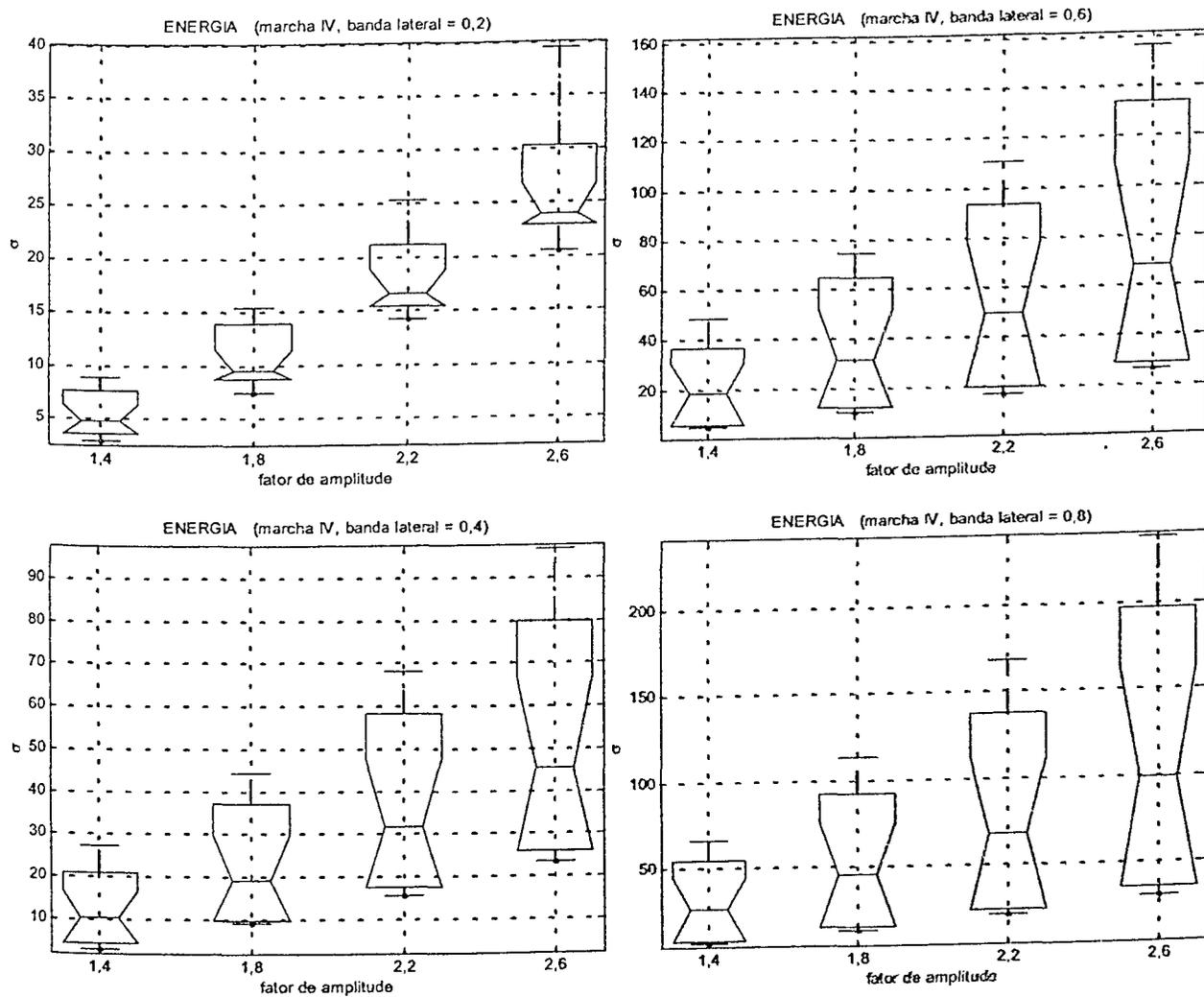


Figura A.1.12 – Gráficos-caixas das energias agrupadas segundo o fator de modulação versus fator de amplitude (sinais ruidosos, quarta marcha).

A.5) Análise para os sinais simulados da terceira marcha (avaliação conjunta).

a) Comportamento das kurtosis estimadas.

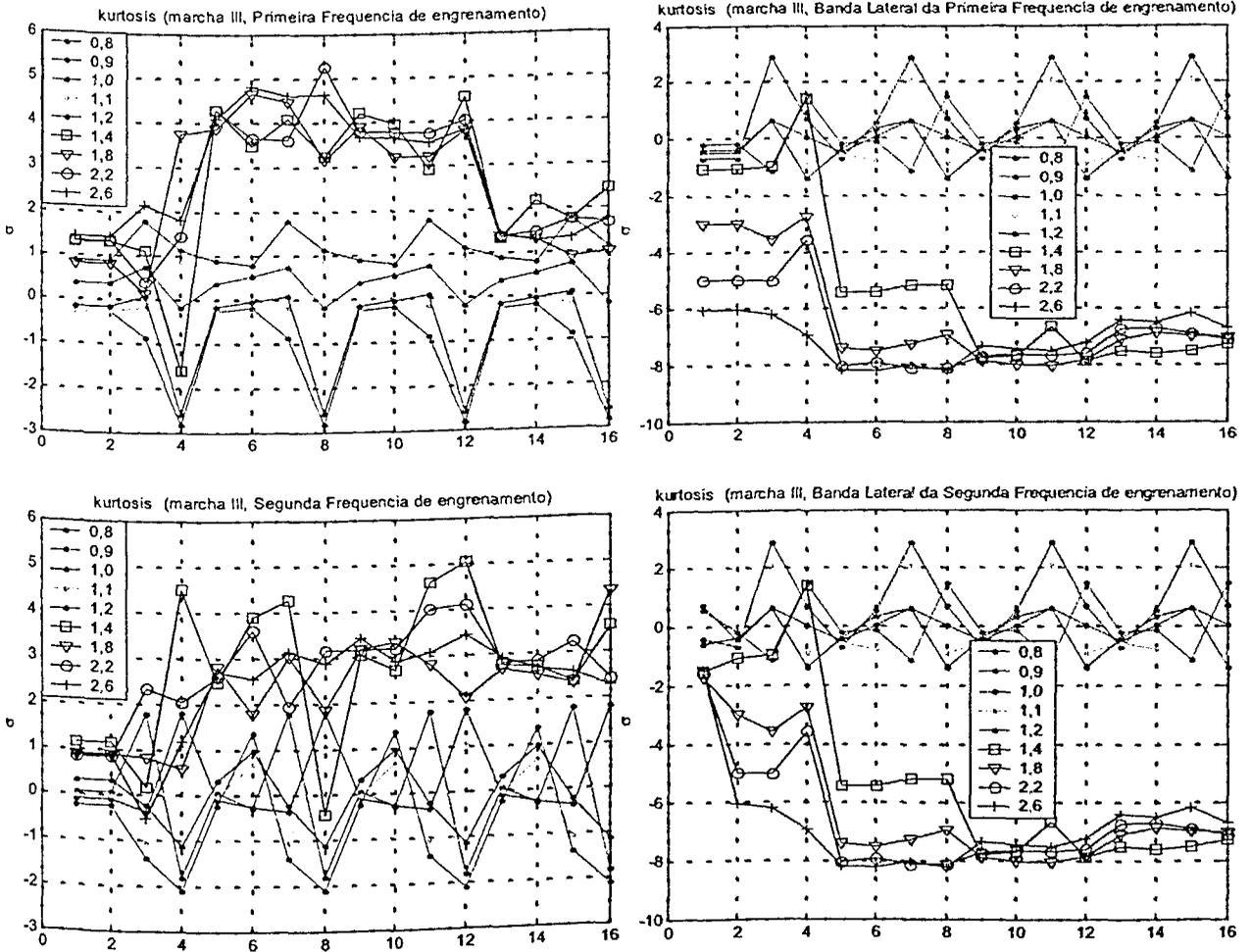


Fig. A.1.13 – Kurtosis em função das frequências de engrenamento e bandas laterais da terceira marcha.

b) Comportamento das energias estimadas.

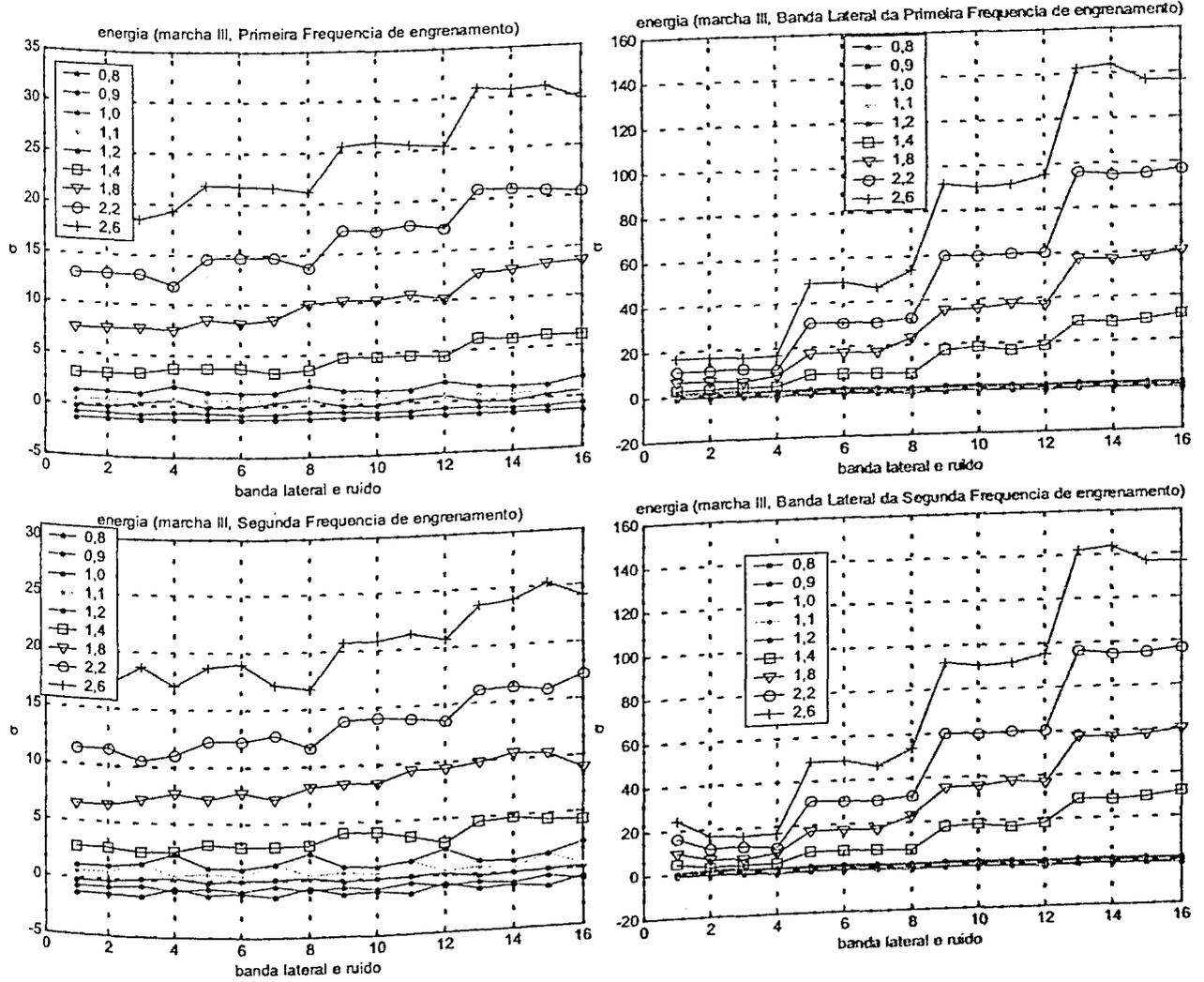


Figura A.1.14 – Energia em função das freqüências de engrenamento e bandas laterais da terceira marcha

A.6) Análise para os sinais simulados da quarta marcha.

a) Comportamento das kurtosis estimadas.

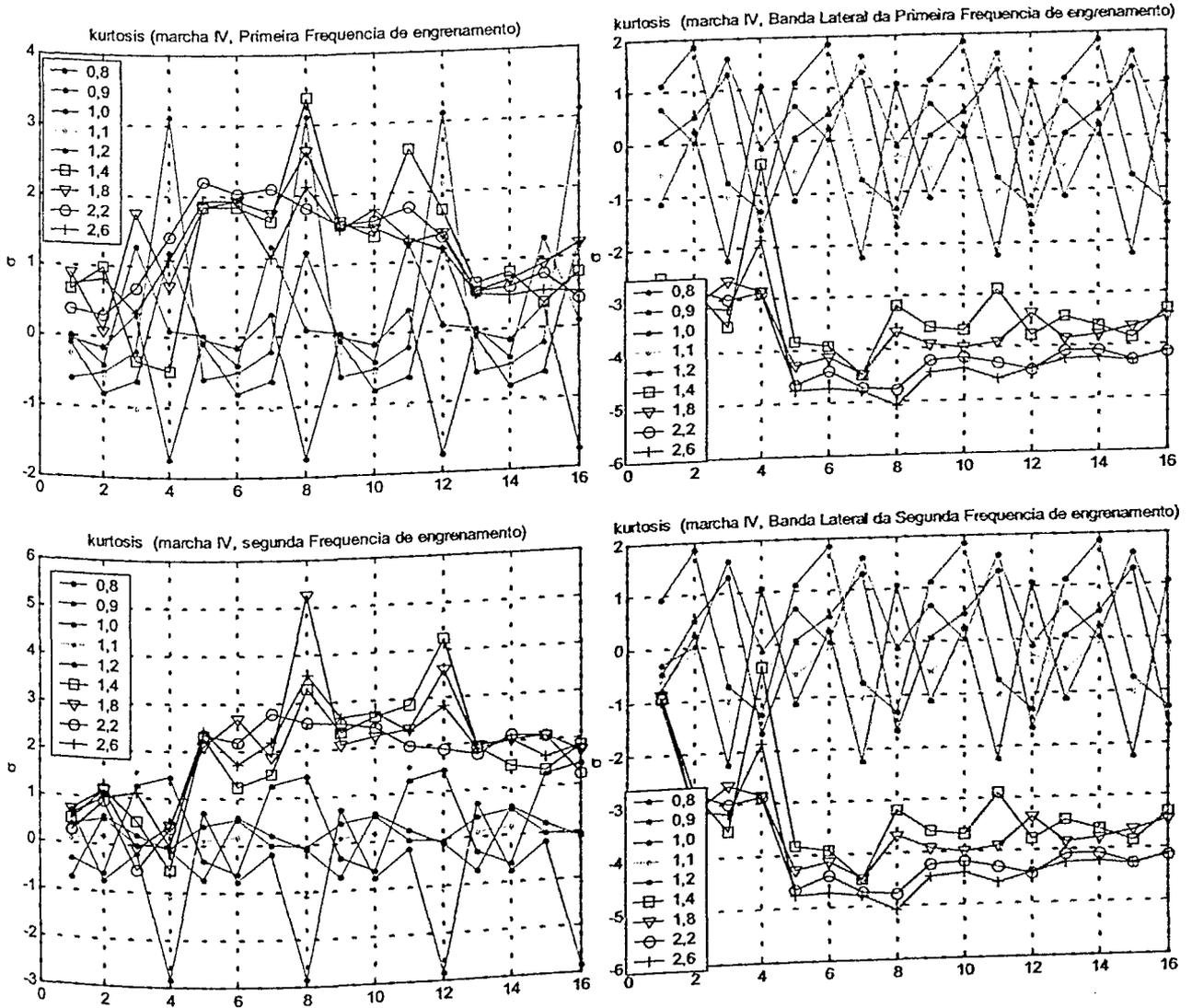


Figura A.1.15 – Kurtosis em função das frequências de engrenamento e bandas laterais da quarta marcha.

b) Comportamento das energias estimadas.

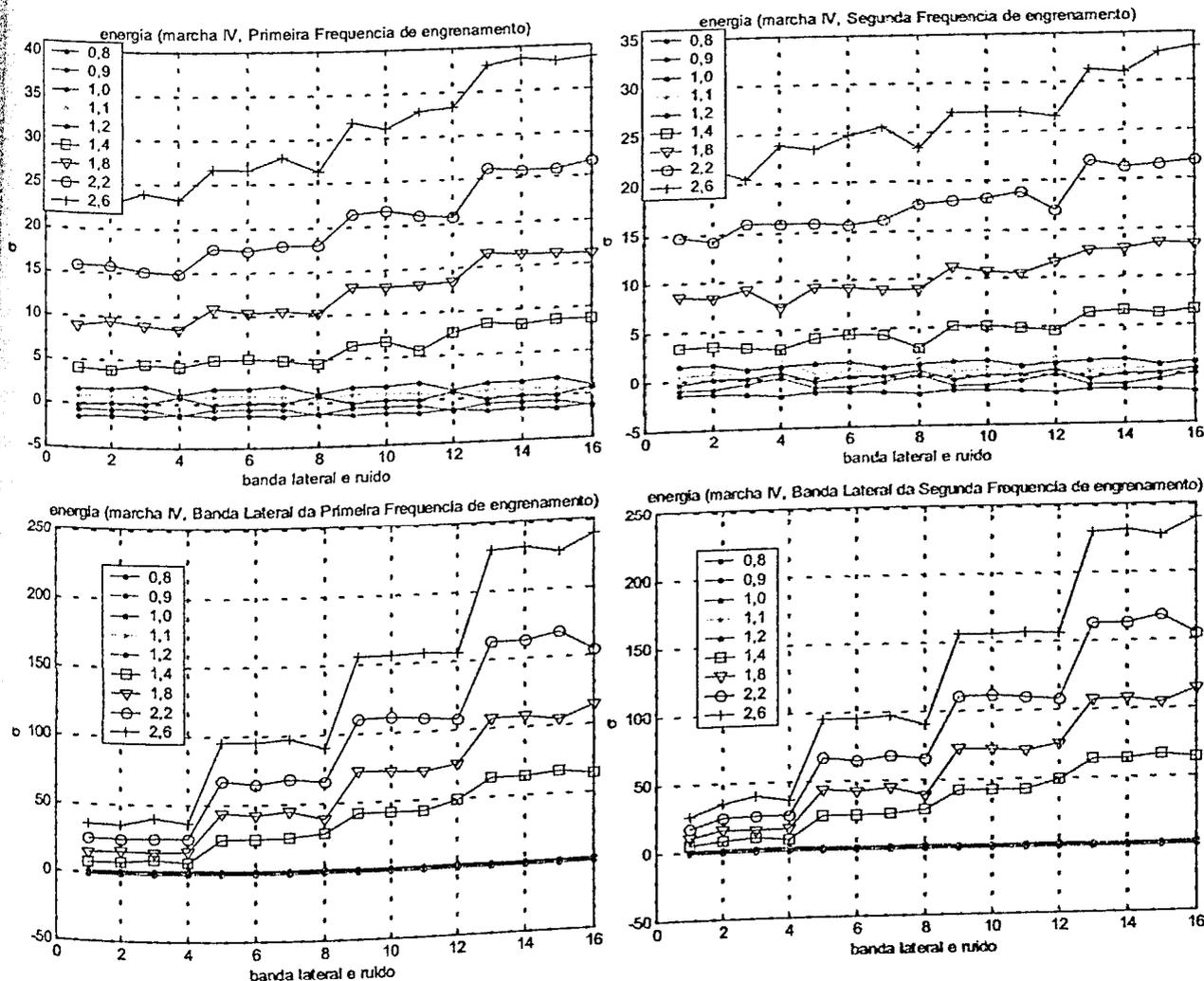


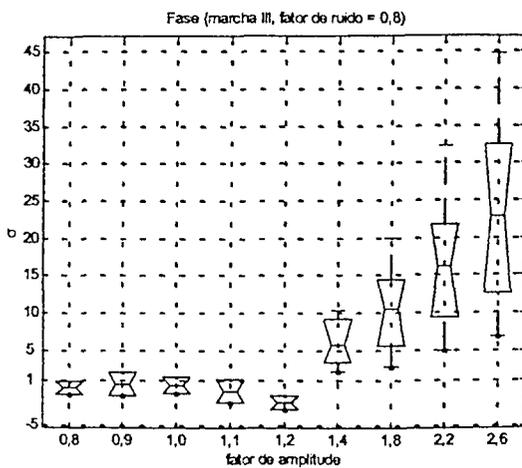
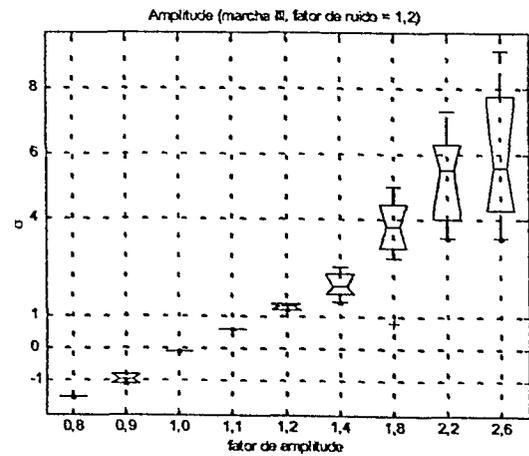
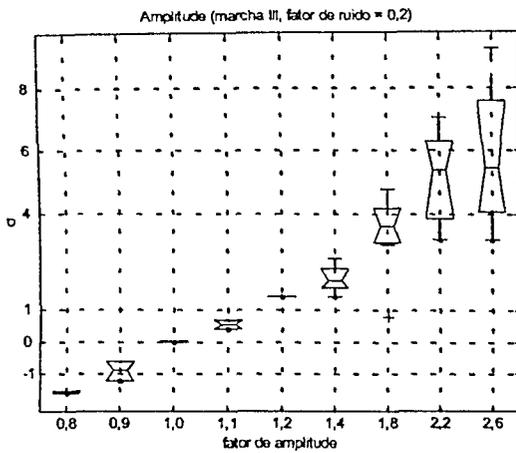
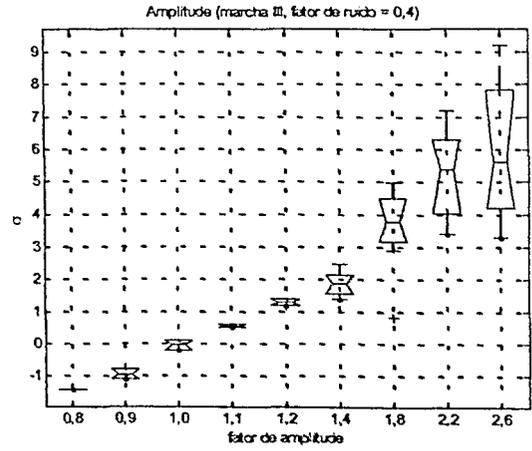
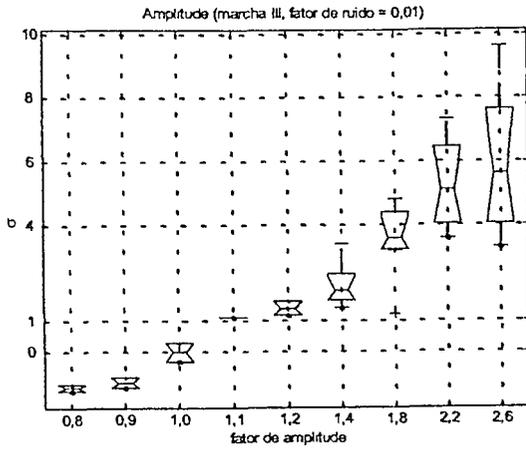
Figura A.1.16 – Energia em função das freqüências de engrenamento e bandas laterais da quarta marcha.

ANEXO 2

Gráficos relativos à análise de sensibilidade para os valores de amplitude e fase dos sinais simulados de engrenamento demodulados via procedimento de Mínimos Quadrados.

Avaliação da influência das amplitudes para os sinais simulados de terceira marcha com mesmo nível de ruído.

a) Comportamento das amplitudes estimadas.



Figuras A.2.1 – Gráficos-caixas das amplitudes agrupadas segundo o fator de ruído versus o fator de amplitude (terceira marcha).

b) Comportamento das fases estimadas.

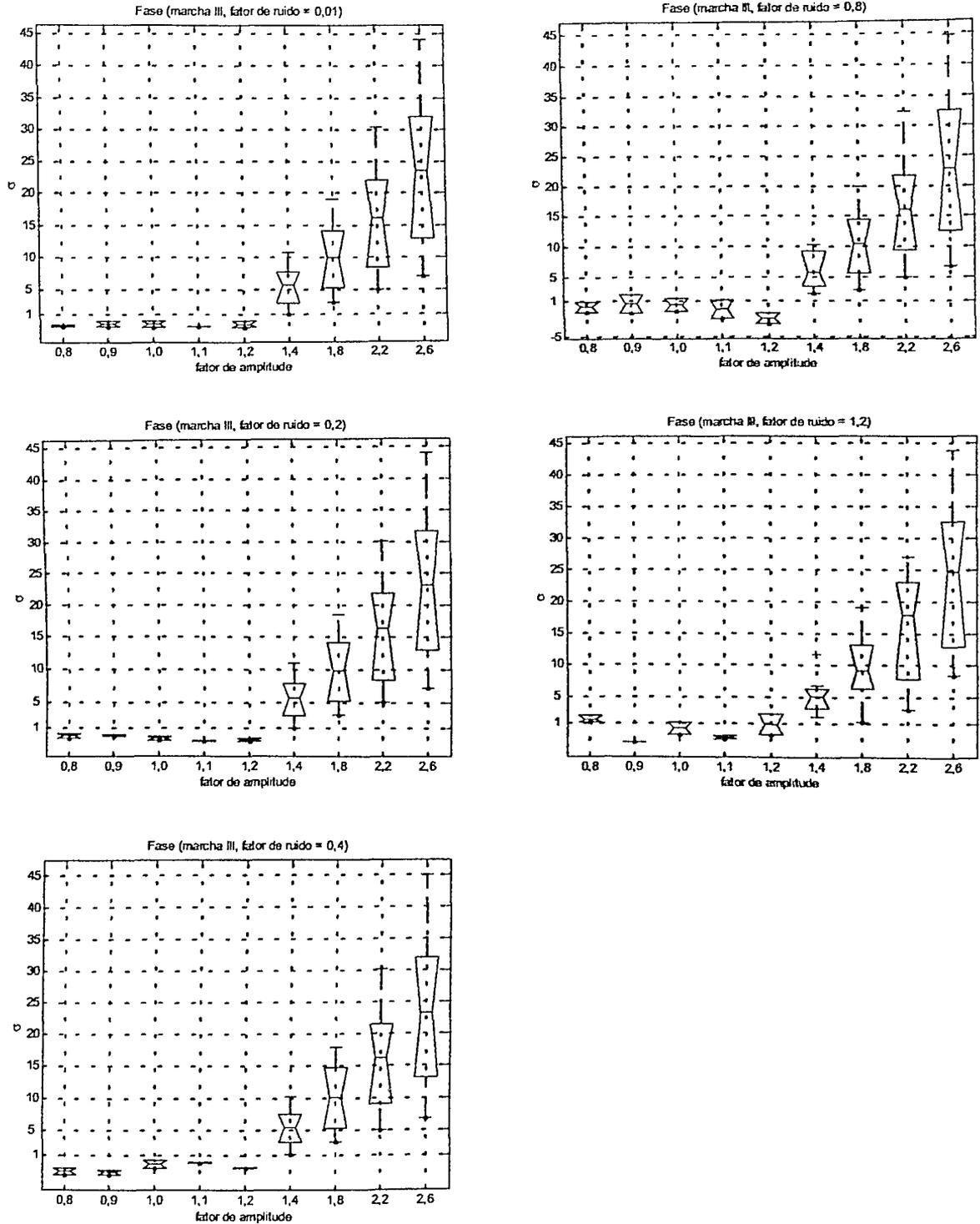


Figura A.2.2 – Gráficos-caixas das fases agrupadas segundo o fator de ruído versus fator de amplitude (terceira marcha)

Avaliação da influência das bandas laterais sobre os sinais simulados da terceira marcha com mesmo fator de banda lateral.

a) Comportamento das amplitudes estimadas.

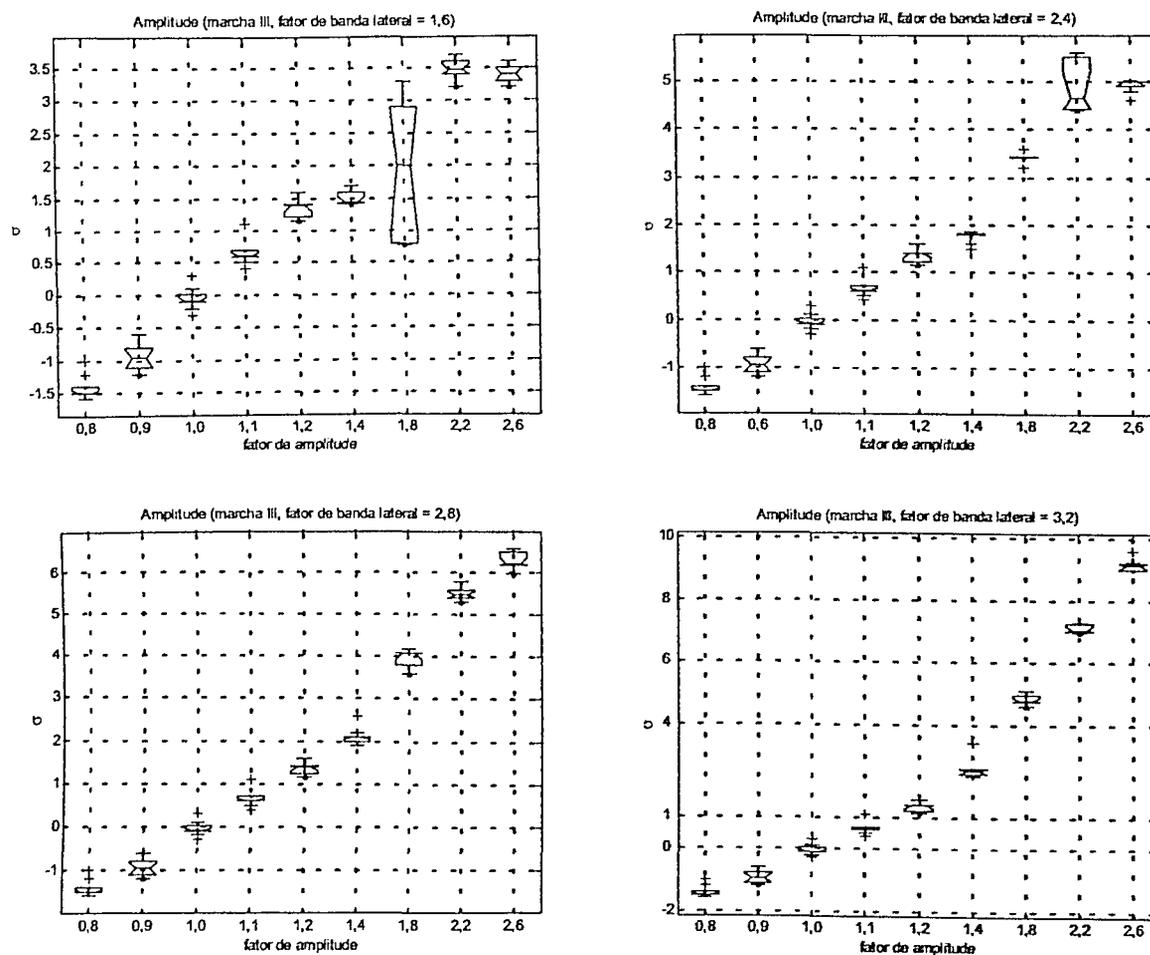


Figura A.2.3 – Gráficos-caixas para as amplitudes agrupadas segundo o fator de modulação versus o fator de amplitude (terceira marcha).

b) Comportamento das fases estimadas.

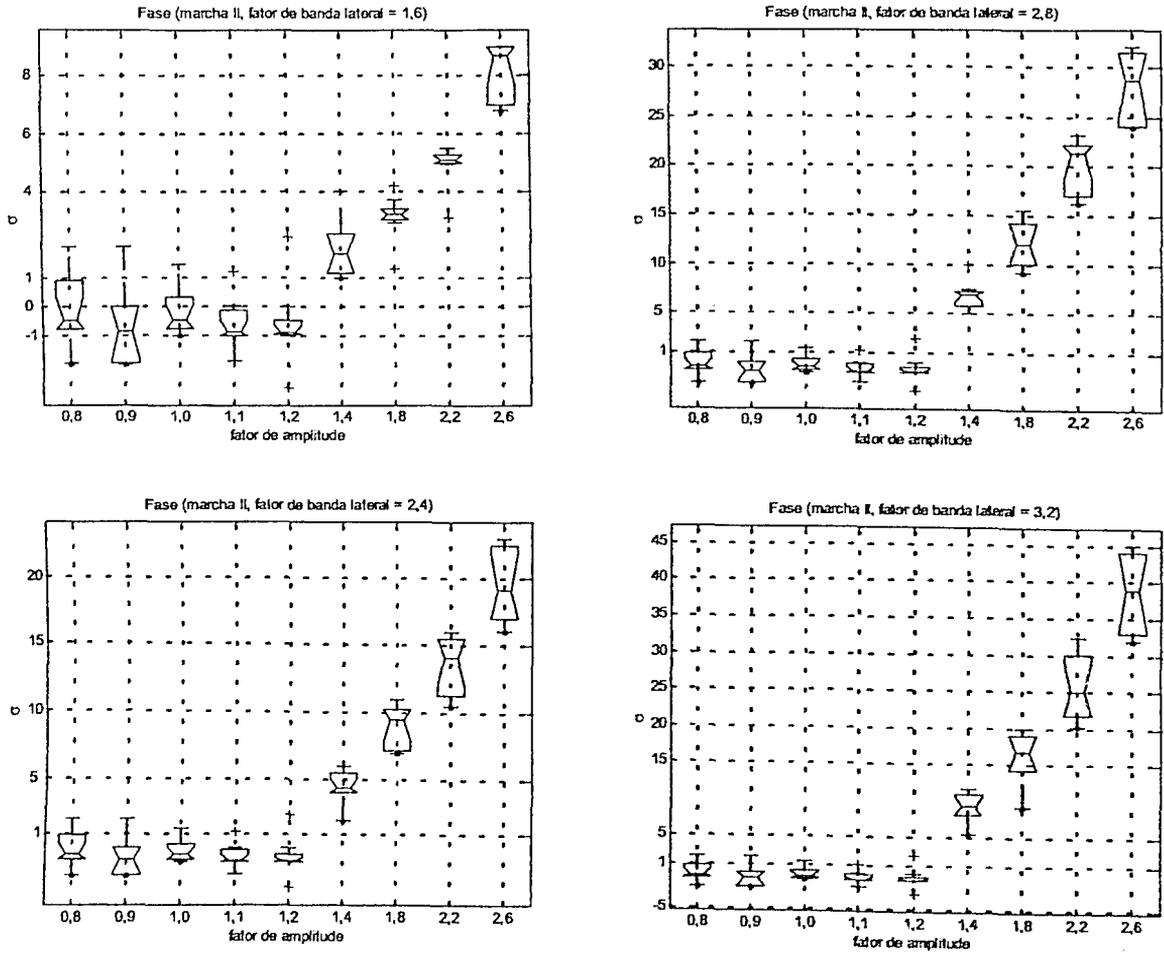


Figura A.2.4 – Gráficos-caixas das energias agrupadas segundo o fator de ruído versus fator de amplitude (sinais bons, quarta marcha).