

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

**Aplicação de Técnicas de *Order Tracking* para a
Análise de Máquinas e Componentes Rotativos**

Autor: Sérgio Junichi Idehara
Orientador: Prof. Dr. Milton Dias Junior

07/2003

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

Aplicação de Técnicas de *Order Tracking* para a Análise de Máquinas e Componentes Rotativos

**Autor: Sérgio Junichi Idehara
Orientador: Prof. Dr. Milton Dias Junior**

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

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

Campinas, 2003
SP – Brasil

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

Id2a Idehara, Sérgio Junichi
Aplicação de técnicas de *order tracking* para a
análise de máquinas e componentes rotativos / Sérgio
Junichi Idehara.--Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Milton Dias Junior
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Rotores. 2. Máquinas. 3. Kalman, Filtragem de.
Processamento de sinais. I. Dias Junior, Milton. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Aplicação de Técnicas de *Order Tracking* para a Análise de Máquinas e Componentes Rotativos

Autor: **Sérgio Junichi Idehara**
Orientador: **Prof. Dr. Milton Dias Junior**

Prof. Dr. Milton Dias Junior, Presidente
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Vicente Lopes Junior
Universidade Estadual Paulista/ Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. Janito Vaqueiro Ferreira
Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 31 de julho de 2003.

Dedicatória

Dedico esta dissertação a Hiroshi e Chieko Idehara, que investiram suas vidas em seus
filhos.

Agradecimentos

Ao contrário do texto que se segue nos capítulos, o qual é uma descrição puramente técnica, esta passagem representa uma difícil transposição do reconhecimento em palavras, contudo desejo tentar exprimir-lo da melhor forma possível.

O presente trabalho é o resultado da dedicação de muitas pessoas, entre elas desejo destacar o orientador, Prof. Dr. Milton Dias Junior, que mesmo antes de eu concluir a graduação tem me ajudado, não apenas na formação acadêmica, mas também em me auxiliar nos eventos fora dela. Outra pessoa de grande influência no trabalho, pelas idéias e sugestões, é o aluno de doutorado e companheiro, Alexandre L. A. Mesquita.

Agradeço aos amigos que dividem a mesma sina, Ubatan A. Miranda, Vinícius M. Guarenghi, Carlos A. A. Camargo, Alexandre C. Eduardo e Abdón T. Tadeu, pela solidariedade e apóio ao longo destes anos de estudo. Como também aos profissionais do Departamento de Projeto Mecânico e da Faculdade de Engenharia Mecânica (técnicos e pessoal associado) por seus esforços em atender às necessidades práticas do trabalho. A todas as pessoas que contribuíram diretamente ou indiretamente no desenvolvimento desta pesquisa, e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo auxílio financeiro.

<< À maneira de nuvens se começam

A descobrir os montes que enxergamos

.....>>

(Luís Vaz de Camões, Os Lusíadas, V 25)

Resumo

Idehara, Sérgio Junichi, *Aplicação de Técnicas de **Order Tracking** para a Análise de Máquinas e Componentes Rotativos*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003, 132 p., Dissertação (Mestrado)

A demanda crescente por máquinas e componentes mais seguros e silenciosos tem resultado numa necessidade cada vez maior de entender profundamente o comportamento dinâmico destes equipamentos, objetivando a redução de tempo no desenvolvimento de novos produtos ou a redução dos níveis de vibração/ruído de sistemas já existentes. Uma das formas de análise é através dos sinais provenientes da máquina ou componente em condição operacional. É neste contexto no qual se insere o presente trabalho, que visa estudar ferramentas para análise de sinais de vibração/ ruído provenientes de componentes rotativos operando em condições estacionárias ou não. Estas técnicas são classificadas de métodos seguidores de ordem, ou *order tracking*, e permitem expor qualquer componente (ordem) de um sinal dependente da velocidade de rotação. Analisa-se, comparativamente, três métodos: a *Order Tracking Computacional*, a Reamostragem Digital e a TVDFT, bem como a técnica da matriz de ortogonalidade, utilizada para corrigir a amplitude das ordens obtidas por este último método. Além disso, estudam-se os filtros adaptativos de Kalman e Vold-Kalman, utilizados para extrair as ordens de um sinal no domínio do tempo. Todos os procedimentos são analisados através de simulações numéricas e dados experimentais.

Palavra-Chave

- Máquinas e componentes rotativos, *Order Tracking*, Filtros de Kalman e Vold-Kalman

Abstract

Idehara, Sérgio Junichi, *Application of Order Tracking Techniques for Analysis of Rotating Machines and Components*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003, 132 p., Dissertação (Mestrado)

The increasing requirements for trustful, safe, and quiet machines and components, have resulted in the increasingly necessity to comprehend the dynamic behavior these equipments, in order to reduce the design time of new products or to control the vibration/noise levels of existent systems. One of the possible methodologies available to analyze such systems is the signal processing of the measurements of the machine or component while in operational condition. This work deals with these signal processing techniques, designed to handle data from rotating equipments running in stationary or non-stationary conditions. These methods are generally named Order Tracking Methods, and they are able to expose any component (order) presented in a rotation dependent signal. Three methods are comparatively analyzed in this dissertation: Computed Order Tracking Method, Digital Resampling Method, TVDFT based order tracking method. It is also implemented the Orthogonality Compensation Matrix technique, used to correct the order amplitudes estimated by the last method. Moreover, it is also studied the Kalman and Vold-Kalman adaptative filters, used to extract any order in time domain. All implemented algorithms are tested through numerical simulations and experimental data.

Key-Words

- Rotating machines and components, order tracking, Kalman and Vold-Kalman Filters

Índice

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	xiii
Nomenclatura	xiv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Processamento de Sinais	2
1.1.1. Motivação e Objetivo	6
1.1.2. Descrição dos Capítulos	7
Capítulo 2	9
Revisão Bibliográfica	9
2.1. Order Tracking	9
2.2. Filtragem Adaptativa	14
2.3. Order Tracking sem referência.....	15
Capítulo 3	17
Análise de sinais no domínio da ordem	17
3.1. Estimativa da velocidade de rotação	17
3.1.1. Análise do sinal do tacômetro	18
3.1.2. Determinação da frequência instantânea por tempo-frequência	23

3.2. Domínio da Ordem.....	27
3.3. Métodos de Order Tracking	28
3.3.1. Order Tracking Analógico	29
3.3.2. Order Tracking Computacional.....	30
3.3.3. Order Tracking por Reamostragem Digital.....	33
3.3.4. Time Variant Discrete Fourier Transform Order Tracking (TVDFFT)	34
Capítulo 4.....	39
Filtros Adaptativos	39
4.1. Order Tracking Baseado no Filtro de Kalman	40
4.2. Filtro Seguidor de Vold-Kalman.....	42
Capítulo 5.....	45
Implementação e Simulação.....	45
5.1. Simulação Numérica	46
5.1.1. Order Tracking Computacional (OTC).....	46
5.1.2. Reamostragem Digital.....	50
5.1.3. Order Tracking com Transformada de Fourier Discreta Variável no Tempo.....	54
Tempo de processamento	60
Erros de <i>aliasing</i>	60
5.2. Simulação de um rotor de Laval	64
5.2.1. Comprimento dos blocos.....	67
5.2.2. Efeito de Leakage.....	71
5.2.3. Variação de rotação em rotor anisotrópico	72
5.2.4. Análise de sinais de precessão direta e retrógrada	75
5.3. Filtragem Adaptativa.....	78

5.3.1. Filtro de Kalman e Vold-Kalman.....	78
Harmonic Confidence Factor (HCF).....	80
5.4. Rotor com Múltiplas Ordens.....	83
5.5. Rotor com Ordens Cruzadas.....	89
5.6. Conclusão.....	92
Capítulo 6.....	93
Análise Experimental.....	93
6.1. Medição de Vibração e Som em Sistema de Embreagem.....	94
6.1.1. Direção Radial.....	95
6.1.2. Direção Axial.....	100
6.1.3. Pressão sonora.....	103
6.2. Medição de Deformação em Tampa de Motor de Veículo Automotivo.....	105
6.3. Sistema de bombeamento de água.....	110
6.4. Motor a Combustão.....	113
6.5. Conclusão.....	120
Capítulo 7.....	123
Conclusão e Perspectivas Futuras.....	123
7.1. Conclusão e Comentários.....	123
7.2. Trabalhos Futuros.....	125
Referência Bibliográfica.....	127

Lista de Figuras

Figura 3.1: Pulso do tacômetro óptico.	19
Figura 3.2: Pulso do tacômetro magnético.....	19
Figura 3.3: Tempo de um nível na discretização do pulso de um tacômetro.....	20
Figura 3.4: Frequência instantânea, $f_s = 1000$ Hz. (a) sensor óptico e (b) sensor magnético.....	22
Figura 3.5: Frequência instantânea, $f_s = 2000$ Hz. (a) sensor óptico e (b) sensor magnético.....	22
Figura 3.6: Frequência instantânea, $f_s = 5000$ Hz. (a) sensor óptico e (b) sensor magnético.....	22
Figura 3.7: Frequência instantânea, $f_s = 10000$ Hz. (a) sensor óptico e (b) sensor magnético.....	22
Figura 3.8: Tempo-Frequência (Distribuição de Wigner direcional) de um seno com frequência constante e um chirp com frequência variando linearmente.	24
Figura 3.9: (a) Distribuição Smoothed Wigner Direcional de um chirp com variação quadrática de frequência e (b) pontos selecionados pelo usuário e interpolados.	25
Figura 3.10: Distribuição Smoothed Wigner direcional de um chirp com variação quadrática de frequência e os limites da busca.....	26
Figura 3.11: Estimativa da frequência instantânea de um chirp com variação quadrática de frequência.....	26
Figura 3.12: Exemplos de um diagrama de cascata (mapa espectral) e mapa de ordem.	27
Figura 3.13: Esquema de Order Tracking Analógico com amostragem externa.	31
Figura 3.14: Representação no domínio angular de um sinal.	31

Figura 5.1: Soma de quatro chirps (1-4) e um seno de frequência constante (5), resultando no sinal (6).....	47
Figura 5.2: (a) sinal simulado resultante e (b) rotação.....	47
Figura 5.3: Diagrama do algoritmo de Order Tracking Computacional.....	47
Figura 5.4: Mapa de ordem pelo método de Order Tracking Computacional com 400 pontos por bloco, overlap de 28% e janela Hanning.....	49
Figura 5.5: Amplitudes e fases das ordens obtidas pela OTC do sinal gerado.....	49
Figura 5.6: Diagrama do algoritmo de Reamostragem Digital.....	51
Figura 5.7: Representação da passagem de um sinal com taxa de amostragem constante para um incremento angular constante pela reamostragem.....	52
Figura 5.8: Mapa de ordem obtido por blocos do sinal de um transdutor.....	53
Figura 5.9: Diagrama de Cascata com 8000 pontos por bloco, overlap de 10% e janela Hanning.....	54
Figura 5.10: Mapa de ordem obtido pela reamostragem digital com blocos de 400 pontos, overlap de 29% e janela Hanning.....	54
Figura 5.11: Amplitudes e fases das ordens obtidas pela reamostragem digital do sinal gerado.....	54
Figura 5.12: Diagrama do algoritmo de TVDFT.....	55
Figura 5.13: Interpolação da rotação para a mesma taxa de amostragem do sinal do transdutor.....	56
Figura 5.14: Mapa de ordem obtido pelo método da TVDFT com blocos de 39 revoluções, overlap de 5% e janela Hanning.....	57
Figura 5.15: Amplitude e fase pela TVDFT.....	58
Figura 5.16: Amplitude e fase pela TVDFT/ OCM.....	58
Figura 5.17: Mapa de ordem pelo método da OTC.....	62
Figura 5.18: Mapa de ordem pelo método da reamostragem digital.....	62
Figura 5.19: Mapa de ordem pelo método da TVDFT.....	62

Figura 5.20: Mapa de ordem obtido pelo método da order tracking computacional com blocos de 400 pontos, overlap de 13%, janela Hanning e com filtro anti-aliasing.	63
Figura 5.21: Mapa de ordem obtido pelo método da reamostragem digital com blocos de 400 pontos, overlap de 13%, janela Hanning e filtro anti-aliasing.	63
Figura 5.22: Mapa de ordem obtido pelo método da OTC com blocos de 400 pontos, overlap de 60% e janela Hanning.	63
Figura 5.23: Mapa de ordem obtido pelo método da reamostragem digital com blocos de 400 pontos, overlap de 60% e janela Hanning.	63
Figura 5.24: Mapa de ordem pelo método da TVDFT com blocos de 49 revoluções, overlap de 29% e janela Hanning.	64
Figura 5.25: Resposta temporal do rotor isotrópico nas direções (a) x e (b) y com aceleração constante de 40 rad/s ² passando pela frequência natural de 23,87 Hz.	65
Figura 5.26: Diagrama de Cascata das direções (a) x e (b) y com blocos de 1024 pontos overlap de 20% e janela Hanning.....	66
Figura 5.27: Mapa de ordem da direção x pelo método da reamostragem digital com blocos de 400 pontos overlap de 80% janela Hanning e filtro anti-aliasing até a quinta ordem.....	68
Figura 5.28: Amplitude e fase da primeira ordem pela reamostragem digital do rotor isotrópico na direção x.	68
Figura 5.29: Mapa de ordem da direção y pelo método da reamostragem digital com blocos de 400 pontos overlap de 80% janela Hanning e filtro anti-aliasing até a quinta ordem.....	68
Figura 5.30: Amplitude e fase da primeira ordem pela reamostragem digital do rotor isotrópico na direção y.	68
Figura 5.31: Mapa de ordem da direção x pelo método de TVDFT com revolução de 13 voltas e janela Hanning.....	69
Figura 5.32: Amplitude e fase da primeira ordem por TVDFT do rotor isotrópico na direção x. .	69
Figura 5.33: Mapa de ordem da direção y pelo método de TVDFT com revolução de 13 voltas e janela Hanning.....	69

Figura 5.34: Amplitude e fase da primeira ordem por TVDFT do rotor isotrópico na direção y..	69
Figura 5.35: Amplitude e fase da primeira ordem, na direção x, com (a) 800 e (b) 1000 pontos por bloco.....	70
Figura 5.36: Amplitude e fase da primeira ordem obtida pela TVDFT, na direção x, com (a) 20, (b) 31 e (c) 41 revoluções.....	70
Figura 5.37: Amplitude e fase obtidas pela reamostragem digital e TVDFT (a) com janela Hanning e (b) sem janela.....	71
Figura 5.38: Resposta temporal do rotor anisotrópico com aceleração constante de 20 rad/s ² . (a) direção x – frequência natural = 23,87 Hz e (b) direção y – frequência natural = 10,06 Hz .	72
Figura 5.39: Diagrama em cascata nas direções (a) x e (b) y com blocos de 1024 pontos overlap de 30% e janela Hanning.....	73
Figura 5.40: (a) Mapa de ordem do rotor anisotrópico e (b) amplitude e fase da primeira ordem, na direção x, obtida pela reamostragem digital com blocos de 400 pontos overlap 25% e filtro anti-aliasing até a quinta ordem.	73
Figura 5.41: (a) Mapa de ordem do rotor anisotrópico e (b) amplitude e fase da primeira ordem, na direção x, obtida pela TVDFT com bloco de 25 voltas e overlap de 25% e janela Hanning.	73
Figura 5.42: (a) Mapa de ordem do rotor anisotrópico e (b) amplitude e fase da primeira ordem, na direção y, obtida pela reamostragem digital com blocos de 400 pontos overlap 25% e filtro anti-aliasing até a quinta ordem.	74
Figura 5.43: (a) Mapa de ordem do rotor anisotrópico e (b) amplitude e fase da primeira ordem, na direção y, obtida pela TVDFT com bloco de 25 voltas e overlap de 25% e janela Hanning.	74
Figura 5.44: (a) Mapa de ordem do rotor anisotrópico e (b) amplitude e fase da primeira ordem, do sinal complexo, obtida pela reamostragem digital com blocos de 500 pontos overlap 25% janela Hanning.....	77

Figura 5.45: (a) Mapa de ordem do rotor anisotrópico e (b) amplitude e fase da primeira ordem, do sinal complexo, obtida pela TVDFT com bloco de 25 revoluções, overlap de 25% e janela Hanning.....	78
Figura 5.46: Diagrama do algoritmo de filtro de Kalman.....	79
Figura 5.47: Diagrama do algoritmo de filtro de Vold-Kalman.....	79
Figura 5.48: Rotor isotrópico na direção x com aceleração constante de 200 rad/s ² passando pela frequência natural de 10,07 Hz. (a) resposta temporal e (b) mapa de ordem pelo método da TVDFT com 27 revoluções overlap de 25% e janela Hanning.....	81
Figura 5.49: Rotor isotrópico na direção x com aceleração constante de 200 rad/s ² passando pela frequência natural de 10,07 Hz pelo filtro de Vold-Kalman com HCF de 100 na primeira ordem. (a) resposta filtrada e (b) mapa de ordem pelo método da TVDFT com 27 revoluções overlap de 25% e janela Hanning.....	81
Figura 5.50: Rotor isotrópico na direção x pelo filtro de Vold-Kalman com HCF de 400 na primeira ordem. (a) resposta filtrada e (b) mapa de ordem pelo método da TVDFT.....	82
Figura 5.51: Rotor isotrópico na direção x pelo filtro de Vold-Kalman com HCF de 800 na primeira ordem. (a) resposta filtrada e (b) mapa de ordem pelo método da TVDFT.....	82
Figura 5.52: Rotor isotrópico na direção x pelo filtro de Vold-Kalman com HCF de 1200 na primeira ordem. (a) resposta filtrada e (b) mapa de ordem pelo método da TVDFT.....	82
Figura 5.53: Diagrama de Cascata da direção x com blocos de 1000 pontos overlap de 20% e janela Hanning.....	84
Figura 5.54: Mapa de ordem do rotor isotrópico de três ordens na direção x (a) pelo método da Reamostragem Digital com 1000 pontos overlap de 29% e janela Hanning e (b) pelo método da TVDFT com 115 revoluções overlap de 11% e janela Hanning.....	84
Figura 5.55: Amplitude/ fase pelos métodos da Reamostragem Digital e TVDFT/ OCM (a) da primeira ordem, (b) ordem 1,2 e (c) segunda ordem.....	85
Figura 5.56: Resposta filtrada do rotor por Vold-Kalman com HCF de 100 na ordem (a) 1, (b) 1,2 e (c) 2.....	87

Figura 5.57: Mapa de ordem pelo método da TVDFT filtrado com Vold-Kalman na ordem (a) 1, (b) 1,2 e (c) 2.	87
Figura 5.58: Amplitude e fase das ordens por TVDFT/ OCM na direção x do rotor isotrópico (a) sem filtragem e (b) todas as ordens filtradas.	88
Figura 5.59: Resposta filtrada do rotor por Kalman com HCF de 10 na primeira ordem.	88
Figura 5.60: Rotor isotrópico na direção x com aceleração constante de 20 rad/s ² passando pela frequência natural de 50 Hz. (a) resposta temporal e (b) diagrama de cascata com blocos de 1000 pontos, overlap de 20% e janela Hanning.	90
Figura 5.61: Amplitude/ fase da ordem 1 pela Reamostragem Digital e TVDFT/ OCM.	90
Figura 5.62: Mapa de ordem pelo método da TVDFT com 115 revoluções por bloco e overlap de 11%, (a) sem filtro, (b) filtro de Vold-Kalman e (c) filtro de Kalman.	91
Figura 5.63: Amplitude/ fase da primeira ordem por TVDFT/ OCM (a) sem filtro, (b) após filtragem por Vold-Kalman (HCF 100) e (c) após filtragem por Kalman (HCF 2).	91
Figura 6.1: Esquema da posição dos sensores no sistema de embreagem, (1) LVDT radial do CSC, (2) LVDT axial do platô, (3) microfone e (4) LVDT no volante do motor.	95
Figura 6.2: Sinal do volante do motor e estimativa da rotação.	96
Figura 6.3: Deslocamento temporal na direção radial sem acionamento do pedal da embreagem.	97
Figura 6.4: Diagrama em cascata da direção radial sem defeito de 8.192 pontos por bloco, overlap de 50% e janela Hanning.	98
Figura 6.5: Mapas de ordem obtidos pelo método (a) da reamostragem digital com blocos de 5000 pontos, overlap de 70% e (b) da TVDFT com blocos de 204 revoluções, overlap de 50%.	98
Figura 6.6: Amplitude e fase obtida pela Reamostragem Digital na direção radial. (a) ordem 1 e (b) ordem 2.	99
Figura 6.7: Amplitude e fase obtida pela TVDFT na direção radial. (a) ordem 1 e (b) ordem 2.	99

Figura 6.8: Amplitude e fase obtida pela TVDFT, com OCM, na direção radial. (a) ordem 1 e (b) ordem 2.....	99
Figura 6.9: Deslocamento axial do platô da embreagem sem acionamento (a) sem desalinhamento e (b) com desalinhamento.	100
Figura 6.10: Estimativa da rotação e sinal do volante da direção axial (a) sem desalinhamento e (b) com desalinhamento.	101
Figura 6.11: Diagrama em cascata da direção axial (a) sem e (b) com desalinhamento e gerado com 4.096 pontos por bloco, overlap de 20% e janela Hanning.....	102
Figura 6.12: Mapa de ordem da direção axial (a) sem e (b) com desalinhamento obtido pelo método da reamostragem digital com blocos de 1000 pontos, overlap de 20% e janela Hanning.....	102
Figura 6.13: Mapa de ordem na direção axial (a) sem e (b) com desalinhamento obtido pelo método da TVDFT com blocos de 60 revoluções, overlap de 20% e janela Hanning.....	102
Figura 6.14: Registro temporal da pressão sonora medida no interior da caixa seca com taxa de amostragem de 5000 Hz.....	103
Figura 6.15: Diagrama em cascata da pressão sonora de 8.192 pontos por bloco, overlap de 70% e janela Hanning.....	103
Figura 6.16: Mapa de ordem da pressão sonora obtida pelo método (a) da reamostragem digital com blocos de 5000 pontos e (b) da TVDFT com blocos de 204 revoluções, ambos com overlap de 70% e janela Hanning.....	103
Figura 6.17: Sinal temporal original e ordem extraída por Vold-Kalman. (a) segunda ordem e(b) terceira ordem.....	105
Figura 6.18: Mapa de ordem da pressão sonora obtida pelo método da TVDFT com blocos de 163 revoluções, overlap de 50% e janela Hanning, filtradas as ordens (a) 2 e (b) 2 e 3.....	105
Figura 6.19: Tampa do motor de ônibus analisada e localização dos sensores.	106
Figura 6.20: Velocidade de rotação do motor.....	107
Figura 6.21: Sinal temporal da deformação na tampa do motor nos 4 pontos de medição.....	107

Figura 6.22: Mapas de ordem das tensões obtidas pelo método da TVDFT com blocos de 84 revoluções, overlap de 50% e janela Hanning.	108
Figura 6.23: Amplitudes da primeira e segunda ordens dos pontos 1 a 4.	109
Figura 6.24: Bomba hidráulica analisada e vista geral da instrumentação utilizada nas medições.	110
Figura 6.25: Esquema do sistema de bombeamento de água e posicionamento dos sensores.	111
Figura 6.26: Sinal do tacômetro e estimativa da velocidade de rotação durante a (a) partida e (b) parada da bomba B.	112
Figura 6.27: Pressões dinâmicas de sucção e descarga medidas na partida e parada da bomba B.	112
Figura 6.28: Mapa de ordem da pressão na (a) sucção e (b) descarga na partida da bomba B obtida pelo método da TVDFT com blocos de 120 revoluções, sem overlap e janela Hanning.	114
Figura 6.29: Mapa de ordem da pressão na (a) sucção e (b) descarga na parada da bomba B obtida pelo método da TVDFT com blocos de 241 revoluções, sem overlap e janela Hanning. ...	114
Figura 6.30: Carro utilizado no experimento com indicação dos eixos x (longitudinal), y (transversal) e z (vertical) e posição do acelerômetro triaxial fixado no cabeçote motor.	115
Figura 6.31: Esquema de uma aquisição da vibração do motor via placa de aquisição.	115
Figura 6.32: Mapas tempo-freqüência, utilizando os sinais de vibração nas direções vertical e longitudinal, gerados pela distribuição (a) Wigner Direcional e (b) Smoothed Wigner Direcional.	116
Figura 6.33: Estimativa da rotação instantânea a partir da distribuição Smoothed Wigner Direcional.	117
Figura 6.34: Vibração do veículo em cada direção, estimativa da rotação e respectivo diagrama em cascata gerada com 512 pontos por bloco, overlap de 30% e janela Hanning.	118

Figura 6.35: Mapas de ordem obtidos pelos métodos da reamostragem digital com blocos de 800 pontos, e TVDFT com blocos de 109 revoluções, ambos com overlap de 25% e janela Hanning 119

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Métodos sugeridos na literatura para análise de sinais sonoros e de vibração não estacionários, Van der Auweraer (1994).....	4
Tabela 1.2: Exemplos de tipos de defeitos e forças que excitam os múltiplos da rotação, Goldman (1999).	6
Tabela 5.1: Tempo de processamento dos métodos de Order Tracking para uma determinada resolução em ordem.	60
Tabela 5.2: Tempo de processamento para filtrar as ordens nos métodos de filtragem por Kalman e Vold-Kalman.	88

Nomenclatura

Letras Latinas

F	flutuação da força	
N	número de pontos	
o	ordem analisada	
R	número total de revoluções	
$r(n)$	razão de desvios padrões	
Rpm	rotação instantânea da máquina	rpm
t	tempo	segundo
T	tempo de aquisição	segundo
x	sinal de vibração	
$\tilde{x}(t)$	sinal remodulado	
y	sinal estimado com ruído e ordens fora da análise	
$X(o_m)$	amplitude da ordem m	
z	composição complexa de duas direções ortogonais	
Z	amplitude da composição complexa em ordem	

Letras Gregas

α	aceleração angular constante	rad/s ²
$\delta_\eta(n)$	desvio padrão	
Δf	variação de frequência	Hz
Δt	variação de tempo	segundo
$\Delta\theta$	variação angular	radiano
Δo	variação da ordem	
Φ	posição angular	°
$\Delta\Phi$	variação angular entre dois pulsos consecutivos do tacômetro	radiano
ε	termo não homogêneo	
μ	constante relativo ao termo de amplitude da excitação	
η	componente <i>Nuisance</i>	
ω_{Hz}	velocidade de rotação	Hz
ω	velocidade angular	rad/s

Subscritos

a_m, b_m	coeficientes de Fourier	
b_i	coeficientes da equação de segundo grau	
e_{ij}	termo da matriz ortogonal de compensação	
$F_{Nyquist}$	frequência de Nyquist	Hz
$F_{amostragem}$	frequência de amostragem	Hz
F_s		
m_e	massa de desbalanceamento	kg
N_{pulso}	número de pulsos do tacômetro por revolução	

O_{Max}	ordem máxima	
$t_i t_j$	instantes de tempo de pulsos consecutivos do tacômetro	segundo
t_{pulso}	instante de tempo de um pulso do tacômetro	segundo
$t_{nível}$	instante de cruzamento do nível com um pulso do tacômetro	segundo

Abreviações

det determinante

Re parte real

OTC *Order Tracking Computacional*

TVDF *Time Variant Discrete Fourier Transform*

OCM *Orthogonality Compensation Matrix*

Capítulo 1

Introdução

A demanda crescente por máquinas e componentes mais confiáveis, seguros e silenciosos tem resultado numa necessidade cada vez maior de entender profundamente o comportamento dinâmico destes equipamentos objetivando a redução de tempo para o desenvolvimento de novos produtos ou a redução dos níveis de vibração e ruído de sistemas já existentes. Além disso, à medida que os processos industriais como controle e manutenção de equipamentos estão se tornando cada vez mais automatizados, torna-se necessário a utilização de ferramentas de análise de dados, visando a tomada rápida e confiável de decisões para não comprometer o ritmo da produção.

Duas abordagens são usualmente utilizadas na análise de sistemas dinâmicos. A primeira prevê a construção de modelos matemáticos através dos quais pode-se extrair, a partir de simulações computacionais, informações importantes sobre o comportamento vibratório e acústico do sistema. As vantagens desta abordagem é que se pode aplicá-la na fase de desenvolvimento do produto, reduzindo os custos e tempo de projeto, e também verificar o comportamento da máquina ou componente em situações extremas de operação, sem ter que submeter o equipamento a este tipo de teste. No entanto, esta abordagem apresenta restrições na análise de sistemas não lineares, quando os parâmetros físicos ou de excitação são desconhecidos ou quando o componente opera em condições não estacionárias.

Uma outra alternativa para se proceder à análise de sistemas dinâmicos é através dos sinais provenientes da máquina ou componente operando em condições reais. Apesar de não fornecer

informações que possam ser utilizadas para a construção de modelos matemáticos, esta abordagem pode ser aplicada a qualquer equipamento existente, operando em qualquer condição. Este é o contexto no qual insere-se o presente trabalho que visa estudar ferramentas para análise de sinais de ruído, vibração, tensão, entre outros, provenientes especificamente de máquinas e componentes rotativos operando em condições estacionárias ou não. Estas técnicas, largamente utilizadas pela indústria, são classificadas sob o nome geral de métodos seguidores de ordem, ou *Order Tracking*¹, e permitem expor qualquer componente (ordem) de um sinal dependente da velocidade de rotação, qualquer que seja a forma de variação da rotação no tempo.

1.1. Processamento de Sinais

O processamento de sinais abrange inúmeros campos de aplicação, dentre os quais se destacam, além do estudo de sistemas mecânicos, as análises da fala humana, comunicação de dados, engenharia biomédica, acústica, radar, instrumentação, robótica, etc. Em geral, processar significa encontrar uma forma de representar, transformar ou manipular as informações contidas em um sinal, permitindo ao usuário determinar detalhes do sistema e estados não facilmente observáveis. Portanto, é uma matéria de relevante importância que vem sendo estudada e desenvolvida por estas áreas, comumente ocorrendo o intercâmbio da teoria e métodos implementados entre as diversas disciplinas, como se verifica inclusive dentro do presente trabalho.

Os primórdios do processamento de sinais datam do século 17, vindo do desenvolvimento de modelos que tentavam representar os fenômenos físicos a partir de variáveis contínuas e equações diferenciais. A análise puramente matemática segue até a origem de transistores e outros componentes que permitiram a fabricação de equipamentos analógicos, isto é, processamento exclusivamente contínuo e analógico, caracterizado por serem caros e de capacidade limitada. Nos anos posteriores à década de 60, quando surgiram os computadores e

¹ Serão utilizados diversos termos em inglês ao longo do texto pois algumas das palavras não têm tradução exata para a língua portuguesa e outras são termos conhecidos e usados normalmente por pessoas que trabalham nesta área.

microprocessadores, um novo patamar tecnológico permitiu o avanço para o processamento digital de sinais.

As diversas formas de análise digital existentes estão concentradas em algoritmos e *hardwares* (unidades físicas) que abrangem desde sistemas militares especializados a aplicações industriais de baixo custo e eletrônica de alta produção (televisão, rádio, brinquedos, síntese de fala em sistemas automáticos de resposta vocal, etc). O uso na indústria mecânica é feito por uma série de ferramentas tais como os analisadores usados para processar sinais de vibração ou som.

Ao longo da evolução da tecnologia computacional mais e mais ferramentas estão sendo desenvolvidas. Isto ocorre principalmente por causa da proximidade que existe entre a teoria, aplicação e a tecnologia envolvida na implementação dos processadores. Em outras palavras, existe uma teoria já desenvolvida que pode ser usada em algoritmos numéricos nos processadores de alta performance e atuam diretamente na necessidade dos engenheiros. Muitas das necessidades surgem no objetivo de compreender determinados fenômenos, que os métodos tradicionais de análise, como a transformada de Fourier, não fornecem bons resultados. Várias das ferramentas de análise de sinais estão em constante progresso como alternativas às técnicas usuais ou mesmo para complementar as existentes. É dentro deste contexto que este trabalho se encontra, apresentando uma alternativa de visualizar, sob outro ponto de vista, sinais provenientes de máquinas trabalhando em condições normais.

Atualmente, muitas das ferramentas usadas na engenharia mecânica, mais especificamente na área da mecânica dos sólidos e projeto mecânico, estão relacionadas à obtenção das componentes em frequência de um sinal. Esta decomposição facilita em muito na identificação de cada componente e da origem desta dentre as partes constituintes da máquina o que, por sua vez, auxilia na solução e estabelecimento do momento em que ocorre um problema mecânico. Como os sinais proveniente de uma máquina ou componente podem ser do tipo estacionário, não estacionário, transiente ou de banda larga em frequência (*broadband signal*), diferentes métodos para análise foram desenvolvidos para atender a cada destas situações. A Tabela 1.1 mostra algumas das técnicas sugeridas na literatura (Van der Auweraer, 1994).

As duas primeiras colunas da Tabela 1.1 referem-se a sinais que possuam alguma componente fundamental que pode ser tanto estacionária como não estacionária. Já o transiente, geralmente de curta duração, apresenta grande variação quanto a sua natureza. Exemplos de

sinais transientes são: a resposta acústica do fechamento de uma porta, o engate de uma embreagem, as irregularidades no motor diesel dentro de um ciclo de combustão, entre outros. O sinal de banda larga caracteriza-se por ter um espectro espalhado por uma grande faixa de frequências, o ruído causado pelo contato estrada/ roda ou pelo vento são alguns exemplos.

Tabela 1.1: Métodos sugeridos na literatura para análise de sinais sonoros e de vibração não estacionários, Van der Auweraer (1994).²

Harmônico com frequência fundamental conhecida	Harmônico com frequência fundamental desconhecida	Transiente	Banda Larga
<i>Order Tracking</i> (reamostragem)	Método de Prony	Distribuição de <i>Wavelet</i> e Wigner-Ville	Modelo auto-regressivo e Análise Espectral de Máxima Entropia
Filtro de Kalman	Distribuição de <i>Wavelet</i> e Wigner-Ville	Modelo auto-regressivo e Análise Espectral de Máxima Entropia	Distribuição de <i>Wavelet</i> e Wigner-Ville

Os sinais não estacionários provenientes das medições durante a variação das condições de operação da máquina contêm uma grande quantidade de informações sobre o comportamento dinâmico do equipamento. Alguns fenômenos, que normalmente não são notados com clareza quando a máquina opera em velocidade constante, podem ser percebidos facilmente na condição de rotação variável. Por exemplo: pode-se identificar com mais clareza as frequências naturais do sistema durante a partida ou parada da máquina; é possível também verificar as componentes harmônicas dependentes da rotação (*engine orders* – ordem de motor, efeitos de *stress stiffening*); etc.

Por estes motivos, a análise de vibrações em máquinas durante a variação das suas condições de operação tem atraído a atenção de muitos pesquisadores e engenheiros. E, apesar de

² Vale ressaltar que, no referido trabalho (Van der Auweraer, 1994), os autores denominam como harmônicos os sinais formados pela soma de diversas componentes senoidais mesmo que estas apresentem variação das suas frequências com o tempo (*chirp*). Apesar da imprecisão do termo, este foi mantido por se tratar da nomenclatura utilizada na referência.

ter-se obtido bastante progresso, estas técnicas ainda apresentam muitas dificuldades de ordem teórica, numérica e prática.

Como se pode perceber da Tabela 1.1, a aplicação dos métodos de análise espectral para sinais não estacionários depende fortemente das características do sistema e do tipo de análise que se deseja realizar, por exemplo: em sinais de pequenas variações tanto em frequência como em amplitude pode-se utilizar a *Short-Time Fourier Transformation* (STFT) – Transformada de Fourier de curta duração. Neste caso, o sinal não estacionário adquirido é dividido em registros menores no qual pode-se assumir a estacionariedade. Assim, as técnicas convencionais de análise de sinais podem ser aplicadas para cada registro.

Para se obter um espectro variando continuamente, técnicas como a distribuição de Wigner-Ville e as *Wavelets* podem ser aplicadas. Contudo, o esforço computacional destes métodos é bastante grande e, portanto, estes não podem ser usados para análise em tempo real.

A STFT, Wigner-Ville e *Wavelets* são exemplos de técnicas de tempo-frequência discutidos com maior detalhe em Cohen, 1995.

As técnicas de análise no domínio angular e de *Order Tracking* são baseados na conversão dos sinais não estacionários em estacionários, utilizando-se a própria rotação da máquina para definir a taxa de amostragem dos sinais (amostragem síncrona). Assim, os métodos tradicionais de análise de sinais podem ser utilizados no sinal resultante.

Este trabalho insere-se na área da análise de sinais que trata do processamento de sinais (conforme a nomenclatura de Van der Auweraer, 1994) harmônicos com frequência fundamental conhecida, ou seja, enfoca os métodos de *Order Tracking* e filtragem adaptativa de Kalman. Um grupo muito específico de sistemas que podem ser eficientemente estudados com o auxílio destas ferramentas são as máquinas e componentes rotativos. Neste caso, a frequência fundamental (supostamente) conhecida é a rotação da máquina.

As técnicas de *Order Tracking* têm uma forte relação com a transformada de Fourier mas, ao invés de transformar o sinal do domínio do tempo para o da frequência, elas apresentam os sinais no domínio da ordem (ou múltiplos da velocidade de rotação). A partir das ordens é possível determinar as componentes que estão relacionadas diretamente com a frequência fundamental. Isto se torna muito útil no estudo da dinâmica de máquinas rotativas porquê mapeia

as componentes dependentes da velocidade de rotação e pode auxiliar na identificação de algum defeito ou alguma excitação estranha ao sistema, como ilustrado na Tabela 1.2.

Tabela 1.2: Exemplos de tipos de defeitos e forças que excitam os múltiplos da rotação, Goldman (1999).

Tipo de defeito ou excitação do sistema	Desbalanço (rotor)	Desalinhamento (rotor)	Carga Radial Unidirecional	Fissura, Trinca no rotor ou eixo	Engrenagem	Motor a explosão
Múltiplo da rotação	1x	2x	1x, 2x	1x, 2x	Número de dentes	Número de explosões por ciclo

1.1.1. Motivação e Objetivo

Como já foi dito, as técnicas de *Order Tracking* podem ser utilizadas em diversos campos pela capacidade de identificar diversos tipos de problemas em máquinas rotativas ou, pelo menos, indicar as componentes que estão presentes em um sinal. Por isso, muitas empresas de instrumentação e analisadores de sinais desenvolveram programas e equipamentos destinados a determinar as componentes de ordens de um sinal. O desafio que se apresenta para aqueles que desejam desenvolver pesquisas nesta área é que estas técnicas de análise de ordem, apesar de muitas delas já existirem em produtos comerciais, são protegidas por patentes (Hewlett Packward Company, 1990), são pouco divulgadas quanto à metodologia e estrutura dos algoritmos e suas formulações e implementação não são triviais. Muitos dos artigos sobre o assunto fazem rápidas descrições do funcionamento do método, priorizando suas potencialidades como propaganda de seus produtos (Potter, 1990, Bandhopadhyay, 1995, Vold, 1988).

Quando se considera apenas o Brasil, a literatura a respeito do assunto torna-se ainda mais vaga. Poucos são os pesquisadores que se dedicam a estudar profundamente o domínio da ordem, embora isto contraste com a realidade na indústria, onde a análise de ordem está bem difundida, mas sem que haja, contudo, um embasamento teórico que permita uma utilização adequada e

aprofundada desta tecnologia. Estas técnicas de *Order Tracking* são utilizadas principalmente no setor automobilístico para assegurar o funcionamento correto de componentes ou como um parâmetro de controle e projeto na fase de desenvolvimento de produto (Potter, 1990, Bandhopadhyay, 1995).

De um modo geral, a motivação para o estudo destas técnicas origina-se nesta falta de publicações e visa fornecer uma base sólida para aqueles que estão começando na área e também a aqueles que desejam compreender melhor os algoritmos por trás dos produtos comerciais que, em determinados momentos, podem se mostrar inconvenientes por sua estrutura fechada, sem acesso à listagem do programa. Além disso, as ferramentas desenvolvidas e implementadas neste trabalho servirão de base para estudos mais aprofundados nas áreas de psicoacústica, identificação de sistemas rotativos, análise torcional de sistemas girantes, entre outros, conforme apresentados no Capítulo 7 que trata das conclusões do trabalho e perspectivas futuras.

Neste trabalho, analisam-se três métodos: a *Order Tracking Computacional*, a Reamostragem Digital e a Transformada de Fourier Discreta Variante no Tempo (os dois primeiros já podem ser encontrados em pacotes comerciais). Ao longo do trabalho, os métodos são comparados quanto ao seu desempenho a partir de simulações numéricas e medições experimentais. Uma metodologia alternativa para a obtenção da velocidade instantânea da máquina baseada nas distribuições tempo-freqüência (ao invés da utilização do sinal do tacômetro) é proposta nesta dissertação. Além disso, introduz-se a análise de ordem direcional, baseada na formulação complexa aplicada a rotores, e verifica-se sua utilidade na detecção de falhas em sistemas rotativos.

Além da análise de ordem, estuda-se um filtro adaptativo aplicado à extração de componentes que variam com a rotação, o filtro de Kalman. Neste trabalho, implementa-se também o filtro de Vold-Kalman, que apresenta melhores resultados na separação de componentes próximas e cruzadas, contudo, a um custo computacional muito maior (Vold, 1997a e 1997b).

1.1.2. Descrição dos Capítulos

O presente trabalho está dividido em sete capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma detalhada revisão bibliográfica sobre os temas abordados na dissertação. Vale ressaltar, como já foi

mencionado, que são poucas as referências que apresentam detalhes sobre a formulação ou implementação das técnicas de *Order Tracking* ou filtragem de Kalman. Os trabalhos, em geral, visam fazer propagandas de programas comerciais. Sendo assim, as referências indicadas neste capítulo (e em outros) não necessariamente são usadas diretamente na implementação e análise dos métodos avaliados, servindo somente de consulta sobre detalhes não colocados no trabalho.

No terceiro capítulo apresenta-se os procedimentos para a obtenção velocidade de rotação da máquina através dos dados de tacômetro ou por intermédio da aplicação das distribuições tempo-frequência em algum dos sinais de vibração ou som medidos. Em seguida, discute-se os métodos de análise de ordem – *Order Tracking Computacional*, Reamostragem Digital e a *Time Variant Discrete Fourier Transform Order Tracking* (TVDFOT) – quanto a sua teoria e restrições.

O Capítulo 4 discute a formulação teórica dos métodos de filtragem adaptativa por Kalman e Vold-Kalman.

No Capítulo 5 são apresentadas as simulações numéricas e testados os algoritmos de *Order Tracking*. São discutidas questões como: tempo de processamento, precisão dos resultados, utilização de janelas de observação, *leakage*, *aliasing*, entre outras. Também são apresentados os resultados da comparação dos filtros de Kalman e Vold-Kalman.

No sexto capítulo aplicam-se os algoritmos seguidores de ordem e filtragem adaptativa implementados em casos reais: sinais de vibração e som de um sistema de embreagem, vibração da partida de uma bomba de injeção de água, medição de deformação de uma tampa de motor e vibração do bloco do motor de um veículo automotivo.

As conclusões, considerações finais e propostas para trabalhos futuros estão incluídas no Capítulo 7. Por último, apresenta-se uma lista das referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento desta dissertação.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

O presente capítulo tem por objetivo apresentar uma detalhada revisão bibliográfica sobre os temas abordados na dissertação. Contudo, vale ressaltar que são poucas as referências que apresentam detalhes sobre a formulação ou implementação das técnicas de *Order Tracking* ou filtragem de Kalman. Os trabalhos, em geral, visam fazer propagandas de programas comerciais. Sendo assim, as referências indicadas neste capítulo (e em outros) não necessariamente são usadas diretamente na implementação e análise dos métodos avaliados, servindo somente de consulta sobre detalhes não colocados no trabalho. Este capítulo é dividido em três partes que possuem uma grande inter-relação entre si: a primeira trata dos métodos de *Order Tracking*, a segunda, dos algoritmos de filtragem adaptativa de Kalman e Vold-Kalman e a terceira, dos métodos seguidores de ordem que não utilizam sinais do tacômetro para obtenção da velocidade instantânea do componente.

2.1. *Order Tracking*

Existem alguns trabalhos na literatura que não enfocam os métodos seguidores de ordem propriamente ditos mas fazem comparações destas ferramentas com outras técnicas de processamento de sinais estacionários e não estacionários. O trabalho de Van der Auweraer (1989) compara a análise de sinais harmônicos pela DFT (*Discrete Fourier Transform* – Transformada de Fourier Discreta) e os algoritmos de *Order Tracking*, sem, contudo, entrar em detalhes sobre os métodos. O artigo apresenta uma interessante revisão sobre os equipamentos, a aquisição de dados e os princípios de processamento de sinais necessários a este tipo de medição.

Inclui ainda comentários a respeito do tipo de amostragem (relativa/síncrona ou absoluta/fixa) e condicionamentos possíveis, filtragem com filtro fixo ou seguidor (frequência de corte variável com a velocidade de rotação).

O mesmo grupo de pesquisadores publicou um trabalho (Van de Ponsele, 1989) comparando, com maiores detalhes, os métodos de processamento usando a FFT (*Fast Fourier Transform* – Transformada Rápida de Fourier) e *Order Tracking* baseado em *hardware* (unidade física). Enfoca o grande avanço da aquisição de sinais e a possibilidade de processamentos e pós-processamento em tempo real, além da possibilidade de visualizar os resultados em gráficos 3D (*waterfall* – diagrama de cascata), com alta resolução de cores e diagramas de Campbell.

Em Leuridan (1994), os métodos seguidores de ordem bem como os filtros adaptativos de ordem são comparados com outras técnicas de análise de sinais harmônicos não estacionários, como a distribuição de Wigner-Ville, em sinais de espectro com banda larga (*broadband signal*), ou os modelos auto-regressivos e as *Wavelets*, em sinais transientes. Uma vez que o êxito da análise de um problema pode depender da escolha correta da ferramenta pelo usuário, o conhecimento dos benefícios e limitações dos métodos torna-se essencial.

No trabalho de McDonald (1991) é feita uma comparação entre as técnicas analógica e digital (Reamostragem Digital) de *Order Tracking*. O autor ressalta que no ensaio analógico são necessários diversos equipamentos auxiliares – amostradores externos (*external sampler*), multiplicador/ divisor de frequências (*order ratio syntherizers*) e filtros seguidores (*tracking filters*) – que tornam a medição trabalhosa e restringem a taxa de variação da velocidade de rotação da máquina e a ordem máxima mapeada. Alguns comentários ainda serão feitos sobre o método de *Order Tracking* analógico no Capítulo 3, mas como o objetivo deste trabalho é estudar os métodos mais modernos de *Order Tracking* digital, o procedimento analógico não será abordado nesta revisão bibliográfica.

Com o crescente aumento na capacidade dos microprocessadores, diversos métodos de *Order Tracking* digital foram implementados ao longo da última década. No entanto, a maioria destes foram concebidos e desenvolvidos por empresas que os protegem através de patentes. Por isso, a maioria dos trabalhos faz uma rápida referência ao método usado, destacando principalmente vários exemplos de aplicação e da potencialidade de seus produtos.

Um dos primeiros trabalhos publicados sobre *Order Tracking* digital foi o resultado de um produto desenvolvido por Potter (1989) para a Hewlett-Packard Co. e patenteado em Hewlett-Packard (1990). O método denominado de *Order Tracking Computacional* trabalha com uma taxa de amostragem fixa a qualquer rotação, cuja idéia central está em obter um sinal reamostrado, de incrementos angulares constantes do eixo, através de interpolações lineares. A técnica, não apenas elimina a necessidade do multiplicador/ divisor de frequências, para gerar o conjunto de pulsos constantes no ângulo, como substitui o filtro seguidor (cuja frequência de corte varia em função da rotação) por um filtro *anti-aliasing* de frequência de corte constante. Por outro lado, torna-se essencial uma grande quantidade de memória para armazenar todos os dados e um processador rápido para efetuar os cálculos de interpolação. O trabalho ainda apresenta o procedimento necessário para determinar os tempos de reamostragem, que é usado na interpolação do sinal dos transdutores, através de três pulsos de uma referência (tacômetro). Desta forma, são necessários dois sinais para traçar os mapas de ordem, um que é o sinal a ser analisado e outra que fornece a velocidade de rotação. Para visualizar uma comparação da técnica computacional com o método analógico tradicional, Potter simula os dados de uma máquina girante com um gerador de sinais (HP 3326A) em três casos: dois com variação linear de velocidade e uma com rotação constante. O autor verifica que em todos os casos há problemas de estimativa da amplitude de ordens elevadas nas baixas rotações pelo método analógico, o que não acontece nos resultados da *Order Tracking Computacional*. O mesmo resultado ocorre nas ordens elevadas da simulação com rotação constante. O erro é consequência da inabilidade do sintetizador em seguir elevadas ordens do sinal do tacômetro.

Em Fyfe (1997) a metodologia descrita por Potter é melhor detalhada, com simulações passo a passo até a curva do mapa de ordem. Discute-se no trabalho a importância do sinal do tacômetro, tal como o número de pulsos por revolução a ser usado e a frequência de corte do filtro digital. O artigo explora ainda vários tipos de interpolação, como polinômios de ordens elevadas, *piecewise cubic* e *block cubic*, esta última com maior precisão na estimativa e menor ruído.

Prosseguindo na demonstração da potencialidade do método de *Order Tracking Computacional*, Potter (1990) publica na *Sound Vibration Magazine* os resultados experimentais da vibração de um motor à explosão quatro cilindros. Apesar de repetir do artigo anterior as principais características e vantagens do método, ainda destaca o lançamento do HP 3566A/

3567A, um novo produto da Hewlett-Packard Co. em que foi implementado a técnica de *Order Tracking* baseado em PC disponível comercialmente.

Uma comparação dos métodos de *Order Tracking Computacional* e analógico, que têm amostragem síncrona e taxa de amostragem fixa (assíncrona), respectivamente, é feito no trabalho de Bandhopadhyay (1995) da Ford Motor Co. Os principais problemas são enumerados no artigo, como o erro por *leakage* (queda de amplitude por perda de energia para as linhas de ordens vizinhas) e *smearing* (redução da amplitude por espalhamento da energia nas linhas de frequência). O resultado apresentado é genericamente similar para todos os métodos; no entanto, na amostragem fixa o erro por *smearing* é maior, enquanto que na amostragem síncrona, é necessário um maior número de pulsos por volta (sinal do tacômetro) para as ordens mais elevadas.

Bossley (1999) propõe uma metodologia para aumentar a eficiência dos métodos síncronos analógicos em sistemas com alta variação de velocidade, cujos sintetizadores (multiplicador/divisor de frequências) não conseguem acompanhar a mudança de velocidade. A técnica denominada de *Order Tracking Computacional Híbrido*, utiliza a análise digital do sinal do tacômetro da *Order Tracking Computacional*. O sinal é amostrado a uma elevada taxa, determinando com precisão o pulso de referência, e este usado no sintetizador para uma amostragem síncrona. Os resultados no artigo mostram uma melhor estimativa das ordens pelo método híbrido, que os obtido pela *Order Tracking Computacional* e método analógico.

Em resultado da pesquisa realizada na Universidade de Cincinnati (Blough, 1996 e 1997), um novo método de *Order Tracking*, baseado na técnica de reamostragem digital e propriedades da FFT, foi gerado juntamente com a Vold Solutions; empresa de consultoria na área de vibrações e processamento de sinais. A técnica é denominada de *Order Tracking with Time Variant Discrete Fourier Transform (TVDFFT) – Order Tracking* com Transformada Discreta Variante no Tempo. O método utiliza a FFT, sendo que a frequência do núcleo (*kernel*) varia com a mudança na velocidade de rotação, como um caso especial da transformada *chirp-z*, Rabiner (1994). A estimativa da rotação é usada para determinar por meio de integração numérica a posição angular do eixo a cada instante de tempo do sinal. O artigo aplica o método em vários casos simulados, em que compara as ordens estimadas pela TVDFFT com os métodos de Reamostragem Digital e *Order Tracking* baseado na FFT. Os resultados da estimativa

aproximam-se dos obtidos pela Reamostragem Digital, contudo cita a eficiência do método quanto a menor demanda computacional em relação a reamostragem.

Um pós-processamento do mapa da TVDFT pode ser realizado para melhorar a capacidade de seguir as ordens, principalmente nos cruzamentos ou ordens muito próximas uma das outras. O artigo de Blough (1997) apresenta o método da *Orthogonality Compensation Matrix* (OCM) – Matriz de Compensação Ortogonal, que visa reduzir o erro na estimativa de uma determinada ordem devido a influência das outras componentes presentes no sinal.

Vários trabalhos têm surgido recentemente discutindo a aplicação das ferramentas de *Order Tracking* na solução de problemas de ruído e vibração. Em artigos do IMAC e SAE, Blough (1998 e 1999a) desenvolve uma metodologia para reduzir a grande quantidade de dados gerados pela *Order Tracking*, usando ferramentas com origem na análise modal, como o algoritmo de estimativa de parâmetros modais CMIF e SVD (*Singular Value Decomposition* – Decomposição por Valor Singular) para decompor o conjunto de modos operacionais para cada valor de rotação em modos linearmente independentes, os quais são próximos dos modos reais do sistema. A partir da curva do SVD pode-se dizer o número de modos excitados para esta rotação, verificando a quantidades de picos presentes. Um outro conceito no domínio da ordem introduzido pelo Blough é o MEOT (*Mode Enhanced Order Track*), que é soma da energia de uma ordem presente numa determinada rotação. Por este, conhece-se qual a rotação que está excitando um modo específico.

Além dos métodos citados, ainda é possível destacar a separação de ordens próximas ou cruzadas não no domínio da ordem, mas na frequência, como apresentado em Blough (1999b e 1999c). O trabalho desenvolve um método de *Order Tracking* baseado em múltiplas entradas H1 (*FRF Based Order Tracking*), comentando as desvantagens e vantagens do método e suas variações. O algoritmo implementado nos trabalhos anteriores (TVDFT) serve de base para comparar os resultados simulados desta técnica, assim como os relaciona quanto à teoria. Entretanto, verifica-se neste uma maior complexidade computacional. A múltipla entrada é necessária por causa de médias requeridas no processo de estimação, essencial na separação de ordens muito próximas, mostrada em exemplos simulados. Nestes mesmos exemplos com ordens cruzadas, o método baseado na FRF não forneceu uma boa estimativa.

2.2. Filtragem Adaptativa

Os métodos de *Order Tracking* permitem ao usuário visualizar as ordens e frequências naturais do sistema analisado, todos ao mesmo tempo em uma única curva 3D (mapa de ordem). Porém, nem sempre esta é a melhor abordagem de um problema, pois o interesse pode estar em realizar a análise temporal de uma determinada ordem ou de um sinal temporal excluindo-se esta ordem. Assim, existe uma classe de métodos que permitem extrair uma única componente de ordem para ser analisada separadamente ou subtraí-la do sinal original, segundo a teoria de filtragem adaptativa.

O estudo da filtragem de componentes no domínio da ordem da formulação original de Kalman (1960, 1961) iniciou-se nos anos 90, desenvolvido por Vold (1993) e Leuridan (1995); apresentado nos artigos da SAE. Nestes trabalhos os autores citam as diversas aplicações do filtro de Kalman desenvolvido a partir dos anos 60. Estas abrangem as áreas de controle e sistema de localização, focada principalmente na aviação e navegação. Por este motivo é uma ferramenta conhecida e aplicada com sucesso há vários anos, como a filtragem de um sinal específico através de uma resposta com ruído e outras componentes de diferentes fontes.

O filtro de Kalman apresentado por Leuridan é um procedimento computacional para seguir um sinal não estacionário, ou as variáveis de estado de um sistema dinâmico de medições com ruído. Esta abordagem permite filtrar formas senoidais com taxa de amostragem constante no tempo, como alternativa dos métodos tradicionais usando técnicas analógicas. O trabalho ainda enfatiza a importância do conhecimento exato da frequência instantânea, isto é, da velocidade de rotação da máquina para obter uma extração da ordem de boa qualidade.

Vold (1997a) e Blough publicaram também na SAE o desenvolvimento da segunda geração deste tipo de filtro, denominado de filtro de Vold-Kalman. Este algoritmo implementa melhorias sobre a formulação anterior, capacitando-a de estimar eficientemente múltiplas ordens e desacoplar ordens muito próximas ou cruzadas sem gerar batimento artificial no resultado filtrado.

O algoritmo original do filtro de Kalman está restrito a uma única referência, de modo que a extração de ordens cruzadas não resultava em uma boa estimativa. Em um outro artigo do Vold (1997b), exemplifica a melhoria do resultado filtrado com a simulação de três eixos

independentes, cujas velocidades de cada uma variam diferentemente (uma constante e duas com grande taxa de variação na rotação). Neste, mostra-se a forte interação das ordens, principalmente a baixas frequências, como ocorreria em sistemas automotivos reais. O trabalho apresenta a comparação de uma filtragem com uma referência e com o uso de três tacômetros, com sensível melhora no segundo caso (3 referências). Outra limitação suprida pelo novo método, está na determinação da amplitude de uma resposta com variação rápida de velocidade, sem que haja aumento de ruído, o que influencia na estimativa da amplitude da ordem.

A necessidade deste tipo de ferramenta surge fundamentalmente por causa das aplicações de qualidade sonoras, em que são necessárias operações de sintetize com filtros sem defasagem temporal da estimativa e maior controle sobre as bandas de filtragem. Artigos como Vold (1997c) e Allman-Ward (2002) descrevem o uso na acústica, voltado principalmente para a área automobilística. Neste primeiro trabalho, Vold mostra a utilização do filtro sobre o sinal sonoro de um motor V-8 na passagem da segunda para a terceira marcha, extraindo a amplitude da quarta ordem em função do tempo (uma das ordens representativas do sistema). Outras aplicações são discutidas como a extração das ordens do *driveline* que interagem com as ordens da roda, desacoplando-as para permitir uma melhor identificação das fontes dos sinais.

Maiores detalhes sobre o filtro podem ser encontrados no trabalho de Herlufsen (1999). Neste é comentada as características do filtro, como a sua resposta em frequência e temporal, além de descrever as características da banda de filtragem.

2.3. Order Tracking sem referência

Em todos os métodos citados anteriormente, o conhecimento da velocidade de rotação ou a presença de um sinal de referência é indispensável para a análise. Isto onera as técnicas de *Order Tracking*, quanto à necessária qualidade da aquisição e tratamento da resposta do tacômetro, cuja digitalização requer elevadas taxas de amostragem. Ao lado que a impossibilidade de instalar tal sensor impede de traçar as ordens, como pode ocorrer em alguns casos.

Um grupo de pesquisadores da empresa Volvo, Suécia, publicou um artigo sobre *Order Tracking* sem a necessidade de um tacômetro específico, Håkansson (1994). Este método foi desenvolvido para testar os carros produzidos em uma linha de produção, visto que a instalação e calibração de um tacômetro consomem tempo e cria diversas dificuldades. A técnica serve para

monitorar a performance dos carros, com rápida instalação dos sensores e boa confiabilidade dos dados. A estimativa da velocidade de rotação baseia-se nos cálculos da densidade de potência de um transdutor qualquer, que esteja monitorando o motor, sendo que neste caso utiliza-se um microfone. O trabalho não apresenta maiores detalhes sobre a estimativa, uma vez que a metodologia é patente da empresa (911219 – *Method to calculate true rpm for engine/ shafts/ wheels using one or two microphones sample by sample*). O artigo ainda cita a dificuldade em analisar as baixas rotações com altas cargas (elevado número de ordens), sendo a densidade de potência da transformada Cepstrum aplicável com melhores resultados para separar diferentes ordens.

Em uma outra abordagem de tornar os métodos de *Order Tracking* independentes do tacômetro ou dos pulsos do *encoder*, Han (1999) propõe o uso das técnicas de tempo-frequência para estimar a velocidade de rotação do sistema. O artigo demonstra que com o próprio sinal do transdutor é possível determinar a rotação, usando a Distribuição Smoothed Wigner Direcional. A metodologia é exemplificada com sucesso em simulações e resultados experimentais, este de um motor a explosão de quatro cilindros. Entretanto, por se tratar de uma distribuição direcional, são necessárias medições em duas direções ortogonais. O método pode ser aplicado a outras distribuições que são unidirecionais, citado o espectrograma, mapa harmônico de *Wavelet*, etc, mas com presença de fortes termos de interferência (sinais que surgem entre duas ordens).

Capítulo 3

Análise de sinais no domínio da ordem

Neste capítulo são apresentados os conceitos mais importantes dos métodos de *Order Tracking*. Uma vez que a qualidade do sinal dos métodos seguidores de ordem é diretamente influenciada pela precisão na estimação da velocidade instantânea do componente rotativo, analisa-se, inicialmente, as técnicas de obtenção da velocidade de rotação, com e sem a utilização do sinal do tacômetro. A seguir, apresenta-se uma descrição da análise de ordem e a teoria dos métodos implementados nos capítulos subseqüentes, ou seja, *Order Tracking Computacional*, Reamostragem Digital e TVDFT.

3.1. Estimativa da velocidade de rotação

Como já foi mencionada anteriormente, a identificação precisa da velocidade de rotação é de suma importância para boa performance dos métodos de *Order Tracking*, ou mesmo dos filtros de Kalman. Considerando esta necessidade, analisa-se, a seguir, sinais provenientes de dois tipos de tacômetros comumente utilizados na prática: óptico e magnético. Posteriormente, apresenta-se uma metodologia para estimar a velocidade a partir de métodos de tempo-frequência. A vantagem desta implementação é a obtenção da frequência instantânea sem necessidade de qualquer sinal de referência (tacômetro). Entretanto, o custo computacional de análise aumenta consideravelmente.

3.1.1. Análise do sinal do tacômetro

A parte mais importante da análise de *Order Tracking* é o processamento do sinal do tacômetro. Pode-se dizer até que os resultados obtidos desta análise são tão precisos quanto os sinais do tacômetro que foi usado para estimar a frequência instantânea das ordens. O canal em que se mede o sinal do tacômetro é sempre aquele que deve merecer mais atenção, pois, se a qualidade deste sinal for pobre, os resultados de toda a análise serão muito ruins ou, num caso extremo, totalmente inconsistente.

Para estudar esta questão, foram analisados os sinais provenientes de dois tipos de tacômetros: óptico e magnético. Desejava-se observar a qualidade do sinal de cada uma delas, ou seja, aquele que forneceria o melhor resultado na obtenção da frequência instantânea. O sensor óptico utilizado é foto-acionado de fabricação própria do departamento, sendo que o sinal é condicionado a partir de um quadrador com saída TTL (*Transistor Transistor Logic*). Já o sensor magnético da BENTLY NEVADA, é um sensor padrão para medição de deslocamento.

Os dados experimentais foram obtidos da partida de um motor elétrico de corrente alternada, sem carga, que foi acelerado até 3600 rpm (60 Hz) e, em seguida, foi reduzida sua velocidade de rotação até a parada completa. A variação da velocidade foi controlada por um inversor de frequência. A aquisição foi feita em um gravador de sinais analógico (16 canais) – *Instrumentation Video Cassete Data Recorder* RTP-610 tipo B da Kyowa, e posteriormente reproduzida em uma placa de aquisição (National Instrument MIO-16/LPM-16), controlada pelo Matlab v. 5.1. Os arquivos foram gravados com frequência de amostragem de 1000, 2000, 5000 e 10.000 Hz, para verificar a influencia deste parâmetro na estimação da velocidade de rotação. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram as formas dos pulsos do sensor óptico – retangular devido à presença do quadrador – e do sensor magnético, respectivamente.

O cálculo da frequência instantânea consiste em identificar os instantes de tempo (em segundos) em que ocorrem os picos do sinal adquirido do tacômetro. A partir destes, inverte-se o tempo decorrido entre dois pulsos consecutivos, obtendo a frequência em Hz. Este procedimento, usado na tese de doutorado de Blough (1998), permite a obtenção da velocidade de rotação nos tempos identificados pelos pulsos, isto é, determina-se a velocidade apenas onde ocorrem os pulsos. Para definir os pontos intermediários, utiliza-se uma interpolação por *spline*.

A equação (3.1) expressa a velocidade de rotação em Hz, ω_{Hz} , em função do número de

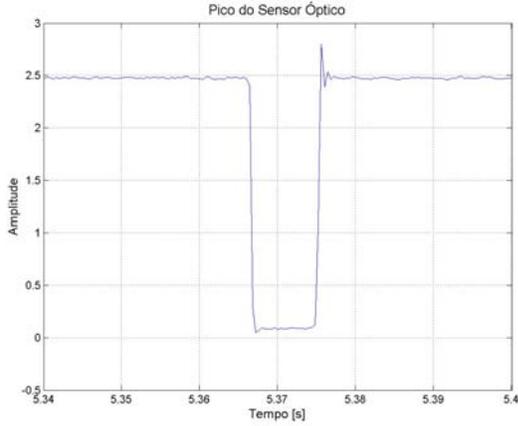


Figura 3.1: Pulso do tacômetro óptico.

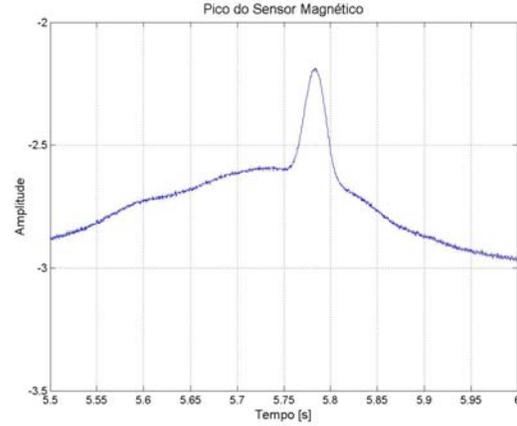


Figura 3.2: Pulso do tacômetro magnético.

pulsos por revolução, N_{pulso} e dos instantes de tempo de pulsos consecutivos, t_i e t_j :

$$\omega_{Hz} = \frac{1/N_{pulso}}{t_j - t_i}. \quad (3.1)$$

A frequência pode ser determinada para qualquer número de pulsos por volta. Contudo, é usual o uso de apenas um pulso por volta visto que é suficiente para a estimativa.

Entretanto, uma grande imprecisão ocorre quando há a presença de pulsos extras ou perdidos na medição. Para reduzir esta influência sobre o resultado interpolado, divide-se o histórico em seções, interpolando cada uma delas. A continuidade entre os blocos é garantida pela condição de contorno, usando em comum o último ponto da seção com o primeiro da próxima, isto é, mantém-se a mesma derivada na passagem entre blocos (sem descontinuidades).

A precisão da estimativa depende da taxa de amostragem do sinal. Isto é, a identificação dos pulsos ocorre pelo momento em que este passa por um nível definido pelo usuário e, como o nível não necessariamente coincide com um dos pontos amostrados, surge então uma imprecisão no tempo do pulso, conforme ilustra a Figura 3.3.

A imprecisão na estimativa de ocorrência do pulso pode ser avaliada pela equação (3.2):

$$t_{pulso} = t_{nível} \pm \frac{1}{fs/2}, \quad (3.2)$$

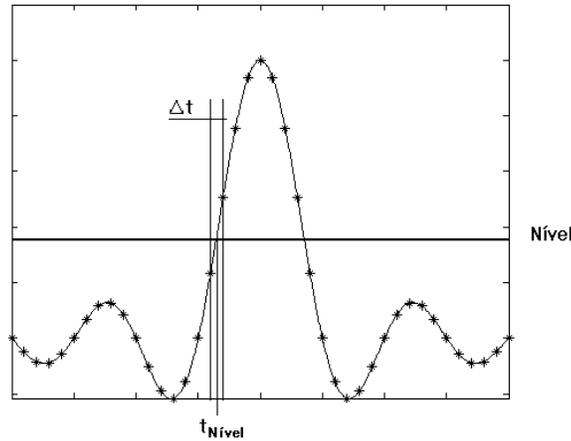


Figura 3.3: Tempo de um nível (tempo do pulso) na discretização do pulso de um tacômetro. cujo tempo do pulso (t_{pulso}) é o tempo em que o nível coincide com a curva do tacômetro ($t_{nível}$) mais ou menos a inversa da metade da freqüência de amostragem (fs).

Portanto, o desvio na estimativa da velocidade de rotação na equação (3.1) é dada por:

$$\omega_{Hz} = \frac{\frac{1}{N_{pulso}}}{\left(t_j \pm \frac{2}{fs}\right) - \left(t_i \pm \frac{2}{fs}\right)} = \frac{\frac{1}{N_{pulso}}}{(t_j - t_i) \pm \left(\frac{2}{fs} + \frac{2}{fs}\right)} = \frac{\frac{1}{N_{pulso}}}{(t_j - t_i) \pm \left(\frac{4}{fs}\right)} \quad (3.3)$$

sendo que o erro da estimativa é dado por (Rabinowicz, 1970):

$$\omega_{Hz} = \frac{\frac{1}{N_{pulso}}}{t_j - t_i} \pm \left(\frac{\frac{1}{N_{pulso}} \cdot \frac{4}{fs} + (t_j - t_i) \cdot 0}{(t_j - t_i)^2} \right) = \frac{\frac{1}{N_{pulso}}}{t_j - t_i} \pm \left(\frac{\frac{4}{fs} \cdot N_{pulso}}{(t_j - t_i)^2} \right) \quad (3.4)$$

Por exemplo, a precisão de um sinal de um pulso por volta amostrado a 5000 Hz na rotação de 20 Hz (1200 rpm) é de ~0,32 Hz (19,2 rpm).

Contudo, a determinação do tempo do nível pode ser realizada por uma interpolação entre os dois pontos vizinhos, o que reduziria o valor do desvio e portanto, o erro na estimativa da rotação. As equações anteriores dão a idéia de quanto pode chegar o erro, mas na prática este desvio é muito menor por causa da interpolação. Os resultados apresentados a seguir utilizam uma interpolação linear entre os pontos, quando o nível não coincide com um dos valores amostrados.

Para a série de testes com diferentes taxas de amostragem (1000, 2000, 5000 e 10.000 Hz) citada anteriormente, foi obtida a velocidade instantânea de rotação do motor utilizando-se os sinais dos dois tacômetros. Para tanto, foi definido um nível constante, $t_{nível}$, usado como referência para determinar os instantes de passagem do pulso. Assim, toda vez que foi identificada a passagem do sinal pelo nível, em subida, considerou-se como o momento do pulso. As Figuras 3.4 a 3.7 apresentam estes resultados.

A Figura 3.4(a), que ilustra a estimativa pelo tacômetro óptico com taxa de amostragem de 1000 Hz, mostra que a discretização não é suficiente para descrever corretamente os picos do tacômetro, portanto verifica-se perda de sua identificação; o que provoca quedas repentinas de velocidade de rotação e que o ruído presente no sinal gera picos extras resultando no acréscimo do valor da velocidade. Na Figura 3.4(b) verifica-se que foi possível definir um nível que não provocasse perda de pulsos ou gerasse pulsos extras, apesar de fornecer uma estimativa imprecisa, observada pela flutuação da curva na rotação próxima de 60 Hz (3600 rpm).

Os sinais dos sensores óptico e magnético apresentam melhoras quando a taxa de amostragem é aumentada para 2000 Hz. Como pode ser visto na Figura 3.5, a queda de amplitude verificada nesta condição é menor que no caso da amostragem de 1000 Hz. Isto possibilita elevar o nível, afastando-se da área poluída por ruídos. Na estimativa da frequência instantânea, não há mais erros gerados por causa de perda de pulsos – uma vez que o nível atinge todos os pulsos medidos – ou a medição de pulsos extras - por estar em uma região sem ruído. Contudo a variação da frequência em altas rotações ainda é considerável, principalmente no caso do sensor óptico.

A mesma análise é realizada nos casos com taxa de amostragem de 5000 e 10000 Hz. Os sinais dos tacômetros (resultados não apresentados) melhoram consideravelmente quanto às quedas de amplitudes, possibilitando usar níveis mais altos. A precisão da estimativa da frequência instantânea também aumenta, não verificando as variações de velocidade vista em rotações altas (Figuras 3.6 e 3.7).

Por estas observações a respeito do algoritmo de localização dos instantes de passagem dos pulsos e do cálculo da frequência instantânea, quanto maior a taxa de amostragem melhor é o sinal obtido do tacômetro, com mais facilidade de definir níveis acima do ruído, pelo fato das bruscas variações de amplitudes serem reduzidas nestes casos.

Uma alternativa de obter os pulsos para determinação da rotação sem o uso de sensores de deslocamento ou óptico e a utilização de um *encoder*. Este sensor permite precisar a posição angular do eixo e, portanto, conhecer o momento da passagem por uma referência, servindo como pulso para os cálculos apresentados anteriormente. No entanto, neste trabalho não será feita nenhuma análise utilizando *encoders*.

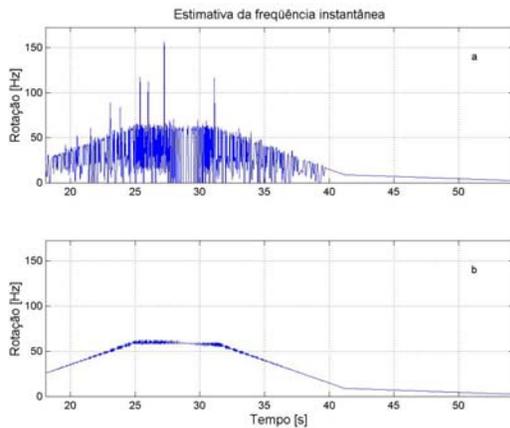


Figura 3.4: Frequência instantânea, $f_s = 1000$ Hz. (a) sensor óptico e (b) sensor magnético.

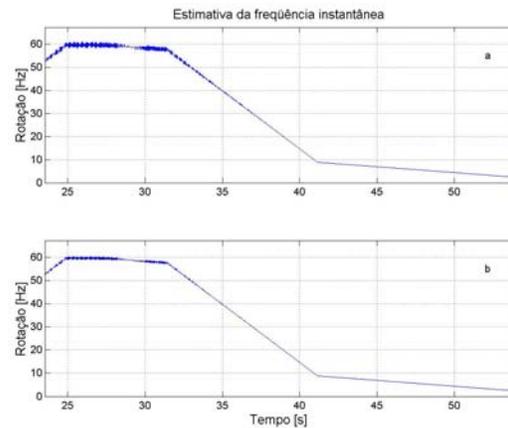


Figura 3.5: Frequência instantânea, $f_s = 2000$ Hz. (a) sensor óptico e (b) sensor magnético.

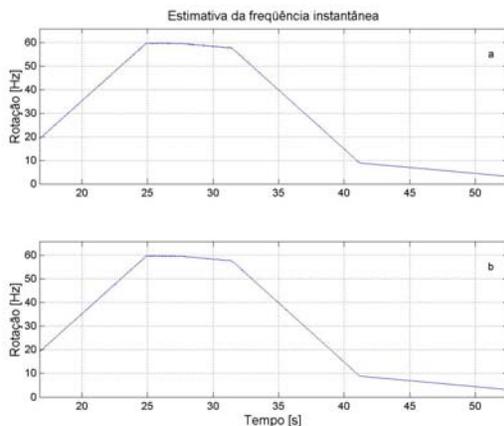


Figura 3.6: Frequência instantânea, $f_s = 5000$ Hz. (a) sensor óptico e (b) sensor magnético.

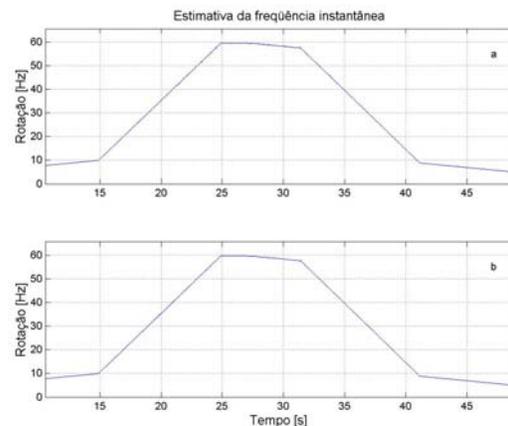


Figura 3.7: Frequência instantânea, $f_s = 10000$ Hz. (a) sensor óptico e (b) sensor magnético.

3.1.2. Determinação da frequência instantânea por tempo-frequência

Em muitos casos práticos, pode ser difícil ou mesmo impossível obter um sinal de tacômetro com a qualidade exigida pelos algoritmos de *Order Tracking* devido a questões de acesso aos componentes rotativos da máquina, motor ou equipamento ou até pela indisponibilidade de sensores para este fim. Nestas situações é importante ter-se à disposição alternativas para conseguir obter a velocidade instantânea de rotação. Já foi mencionado, no Capítulo 2, o trabalho de Håkansson (1994) que publicou um artigo sobre *Order Tracking* sem a necessidade de um tacômetro. Contudo, este trabalho não apresenta detalhes sobre a metodologia adotada.

Uma alternativa interessante para a obtenção da velocidade de rotação instantânea de uma máquina ou um componente rotativo é a utilização das distribuições tempo-frequência. A grande vantagem deste método é que não são necessárias medições adicionais para obter a frequência instantânea, bastando apenas um sinal de vibração, som, tensão, etc., já medido.

Como se sabe, as distribuições tempo-frequência são capazes de separar as componentes espectrais de um sinal a cada instante de tempo. O uso destas distribuições na determinação da frequência instantânea, e portanto da velocidade de rotação, foi apresentada no trabalho de mestrado de Miranda (2002). Existem inúmeros outros trabalhos na literatura apresentando métodos bastante elaborados (e precisos) para a identificação da frequência fundamental instantânea de um sinal como, por exemplo, Qiu (1995) e Hussain (2001). Contudo, o objetivo desta dissertação é estudar os métodos seguidores de ordem e os filtros adaptativos de Kalman e, por este motivo (e considerando que outros alunos já o estão fazendo), optou-se por não aprofundar a investigação nesta área. Assim, a aplicação neste trabalho consiste apenas em analisar a eficiência de um procedimento gráfico de estimação da frequência instantânea que permita integrar as ferramentas de análise de ordens com as de tempo-frequência, capacitando as primeiras a traçar as curvas de ordens sem a necessidade do uso de um tacômetro.

A Figura 3.8 ilustra a decomposição simultânea nos domínios tempo e frequência, utilizando a Distribuição de Wigner Direcional, de um sinal formado da soma de um seno com frequência constante de 20 Hz e um *chirp* (varredura senoidal) com variação linear de frequência entre 0 e 40 Hz, em 2 segundos. Pode-se associar este sinal analisado com, por exemplo, a resposta de um rotor cuja frequência natural é excitada pelo desbalanço. Neste caso, a frequência

instantânea seria estimada através da primeira de ordem. Vale ressaltar, portanto, que, para o uso adequado deste procedimento, o usuário deve conhecer muito bem o sistema a ser analisado e as ordens mais significativas existentes no sinal. Em geral, isto não representa problemas porquê, em rotores, a primeira ordem (relacionada com o desbalanço) é a predominante.

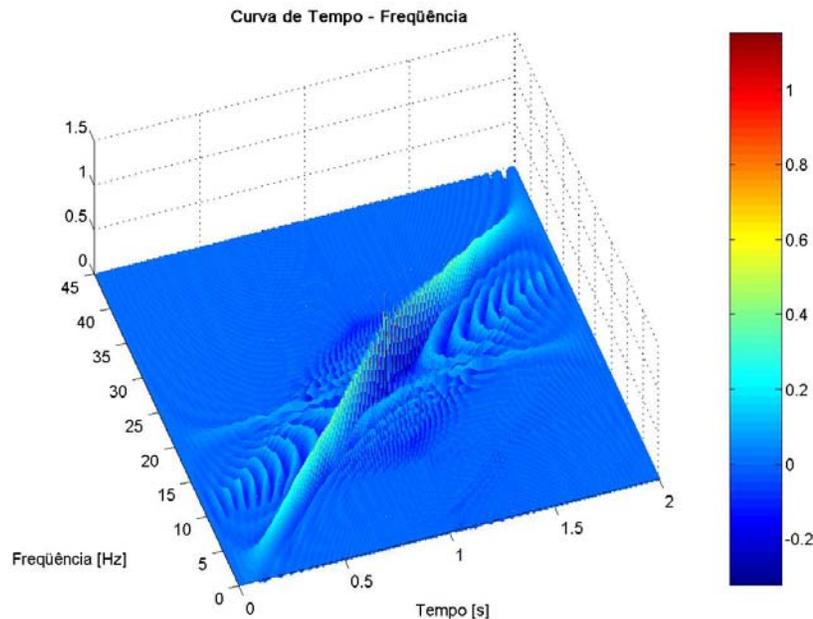


Figura 3.8: Exemplo de uma curva tempo-freqüência (Distribuição de Wigner direcional) de um seno com freqüência constante e um *chirp* com freqüência variando linearmente.

O procedimento gráfico proposto neste trabalho consiste em selecionar um conjunto de pontos, no gráfico da distribuição tempo-freqüência, sobre a ordem que se deseja seguir (aquela que fornecerá a velocidade de rotação do sistema). Utilizando os pontos selecionados, faz-se um ajuste polinomial para ter a primeira estimativa da freqüência instantânea. A ordem do polinômio utilizado é cinco (linha cheia). A Figura 3.9 ilustra este resultado para um caso em que há apenas uma ordem cuja variação de freqüência é quadrática (de zero a 100 Hz em 0,5 segundo). Esta estimativa visual da curva pode apresentar uma grande divergência do valor real, pois depende da escolha do usuário, sendo a influência do espalhamento da energia ao longo da linha de ordem uma causa das dificuldades em distinguir o valor máximo. A opção de uma busca direta dos

pontos de máxima amplitude para cada instante de tempo não seria viável, uma vez que poderia haver outras componentes com amplitudes maiores, em alguns momentos, que a ordem que se deseja seguir. Desta forma, optou-se por uma busca do pico localizada em uma faixa ao longo desta ordem específica (a primeira estimativa da frequência instantânea). Assim, a identificação da frequência instantânea é realizada utilizando a curva obtida do primeiro ajuste para definir uma faixa de busca, dentro da qual localiza-se o instante de tempo e frequência de máxima amplitude. Para isto, a cada instante de tempo do polinômio tomam-se as amplitudes que estão entre 10 % abaixo e acima da frequência estimada, como mostra a Figura 3.10.

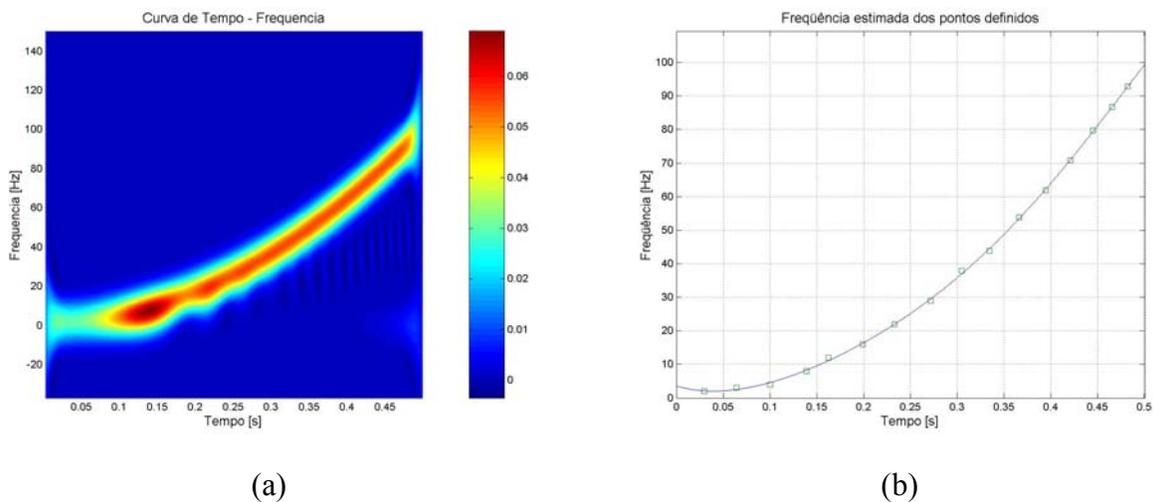


Figura 3.9: (a) Distribuição *Smoothed Wigner Direcional* de um *chirp* com variação quadrática de frequência e (b) pontos selecionados pelo usuário e interpolados.

Deste novo conjunto de dados, baseados em máximos da faixa, faz-se um ajuste polinomial, estimando a frequência instantânea daquela componente. A velocidade de rotação será a estimativa da frequência instantânea dividida pelo valor da ordem. A frequência instantânea ajustada e a real estão no gráfico da Figura 3.11. Nota-se na curva da estimativa que há um erro maior nas extremidades. Isto ocorre porquê a distribuição tempo-frequência tende a espalhar mais a energia no início e final do histórico de análise, além de uma divergência da frequência na decomposição, tornando mais impreciso o cálculo da estimativa. Contudo, apesar deste erro, a estimação da velocidade nestes pontos de desvios pode ser realizada com extrapolação do sinal consistente. Entretanto, quando aplicado nas técnicas de *Order Tracking* este efeito é diluído porquê realiza-se a análise por blocos.

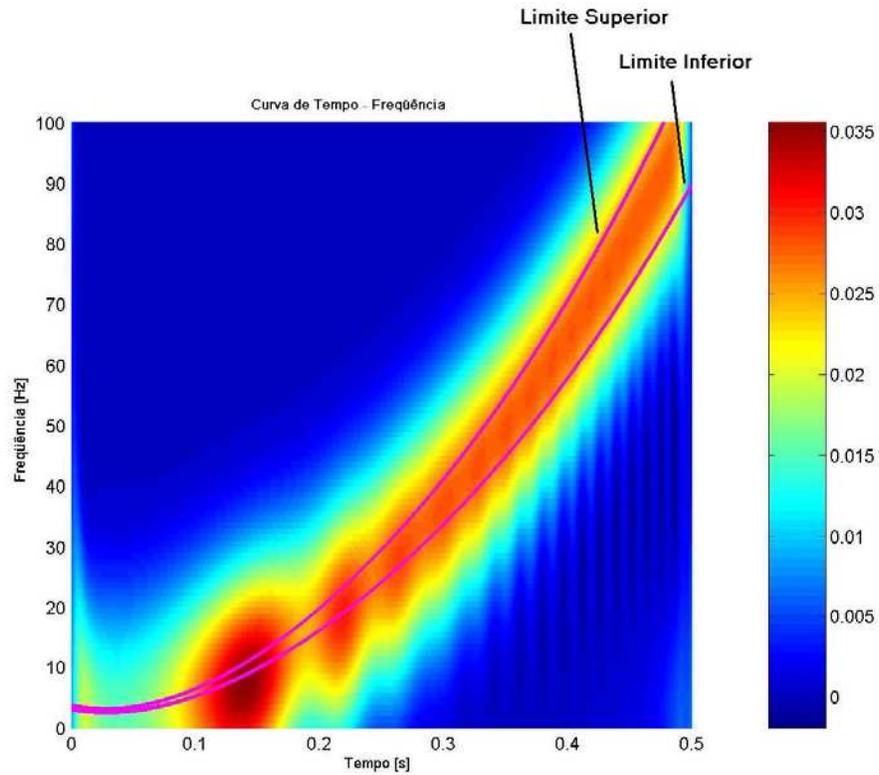


Figura 3.10: Distribuição *Smoothed Wigner Direcional* de um *chirp* com variação quadrática de frequência e os limites da busca.

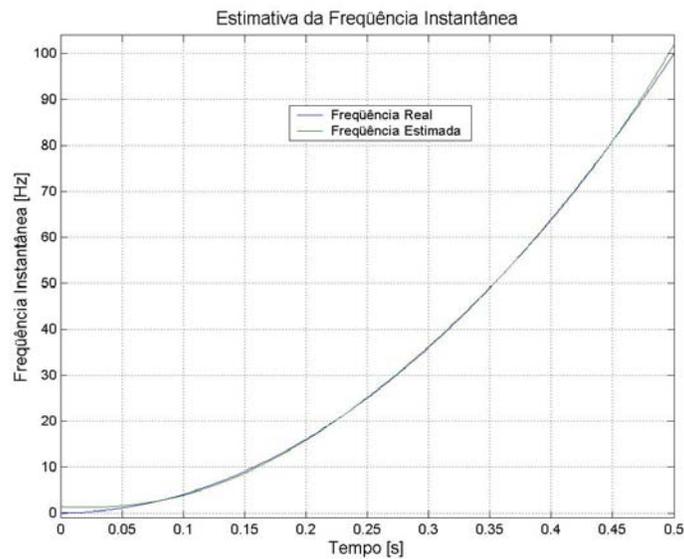


Figura 3.11: Estimativa da frequência instantânea de um *chirp* com variação quadrática de frequência.

3.2. Domínio da Ordem

As máquinas rotativas produzem sinais repetitivos de vibração e acústica relacionada à velocidade de rotação, os quais são expostos na chamada análise de ordem. No processo da FFT, ocorre a mudança do domínio do tempo para o domínio da frequência, gerando o espectro. Sinais que são periódicos (repetitivos) no tempo surgem nas curvas da frequência como picos. Na análise de ordem, a FFT transforma o domínio angular em espectro de ordem, e sinais periódicos no domínio angular também aparecem como picos no domínio da ordem. Por exemplo, se um pico de vibração surge três vezes a cada revolução completa, sempre nas mesmas posições do eixo, então o pico surge na terceira ordem no espectro de ordem.

Em geral, o espectro de ordem é visualizado nos mapas de ordem, cuja abscissa é a ordem, a ordenada é a rotação e no terceiro eixo cartesiano é a amplitude (pode ser usado igualmente o tempo). Nos diagramas de cascata (espectros de frequência), o eixo da abscissa é a frequência, enquanto que os outros parâmetros são os mesmos do mapa de ordem. Exemplos do mapa de ordem e do diagrama em cascata podem ser vistos na Figura 3.12.

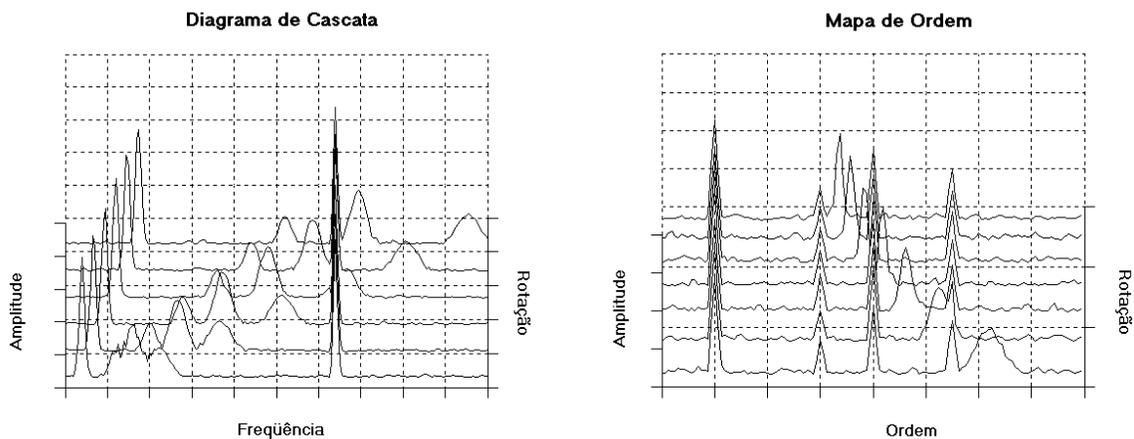


Figura 3.12: Exemplos de um diagrama de cascata (mapa espectral) e mapa de ordem.

Uma clara diferença entre os mapas está na evolução dos picos ao longo da rotação. As componentes harmônicas do mapa de ordem progridem como linhas verticais, indicando que as ordens são constantes, ao passo que a frequência natural surge como linhas curvas – assíntotas

hiperbólicas de inclinação negativa. No diagrama de cascata, as harmônicas surgem como linhas curvas de igual ou proporcional inclinação à da velocidade de rotação e a frequência natural como linhas verticais, indicando frequência constante.

O mapa de ordem indica mais facilmente a relação entre a vibração e a velocidade do eixo, do que pode ser deduzida dos diagramas de cascata ou mapas de espectro. O mais interessante está na capacidade da análise de examinar uma única ordem, ignorando as outras. Isto é chamado de *order track* (seguir ordens). O método representa uma grande ajuda quando se quer focar exatamente uma componente e verificar a contribuição desta dentro do sinal medido da máquina.

As ordens de um sistema têm origem em inúmeras causas com valores relacionadas à estrutura e partes constituintes da máquina, por exemplo: no número de pistões de um compressor, no número de pólos de motor elétrico ou alternador, no número de pás da hélice de uma bomba, no desbalanceamento e desalinhamento do eixo (primeira e segunda ordem, respectivamente), no defeito das pistas interna e externa ou da esfera e rolo cilíndrico de um rolamento, etc. As ordens não necessariamente aparecem como valores inteiros. Há casos em que pode ser menor que a primeira ordem, como ocorre em redutores de velocidade e filmes de fluidos de mancais hidrodinâmicos (0,43 – 0,48 vezes a rotação), ou maiores, como ocorre em motores automotivos devido à presença de engrenagens da caixa de marcha, anel sincronizador (*timing chain engagement*) ou ação das válvulas.

3.3. Métodos de *Order Tracking*

Esta seção trata da formulação e do procedimento prático dos métodos de *Order Tracking*. Apesar de não ser o enfoque deste trabalho, inicia-se esta seção com uma breve descrição das características da *Order Tracking* analógica. Em seguida, passa-se a apresentar os métodos digitais (ou computacionais) que são o objetivo desta dissertação. Os métodos aqui explicados são os implementados neste trabalho. A escolha destes deve-se principalmente a existência de várias referências da teoria e aspectos computacionais, por serem os métodos mais aplicados no mercado e pela comunidade acadêmica e também por serem métodos comprovadamente eficazes. Procura-se ressaltar, para cada um dos métodos, sua formulação básica, limitações e vantagens de uma técnica em relação à outra.

3.3.1. Order Tracking Analógico

O crescimento significativo da tecnologia de processamento digital através de programas e *hardwares* nas últimas décadas permitiu a substituição em diversas áreas do tradicional processamento analógico. Um dos setores atingidos por esta mudança, e foco deste trabalho, é a implementação de técnicas de processamento computacional na análise do domínio da ordem em máquinas rotativas, em substituição do aparato analógico; como amostradores externos (*external sampling*), sintetizadores (*order ratio syntherizers*) e filtros seguidores (*tracking filters*), a comparação entre a técnica analógica e digital (reamostragem digital) é feita no trabalho de McDonald (1991).

Como já foi dito, no ensaio analógico (baseado na alteração da taxa de amostragem) são necessários diversos equipamentos auxiliares – amostradores externos, multiplicador/divisor de frequências (sintetizadores) e filtros seguidores – o que torna a medição trabalhosa. Além disso, o uso de sintetizadores restringe o método quanto à aceleração permitida para análise e a ordem máxima mapeada. Já no processamento digital, o uso de um DSP (*Digital Signal Processor* – Processador de Sinal Digital) e um microprocessador permitem substituir o *hardware* de reamostragem e o filtro seguidor passa-baixa por um algoritmo implementado. O ganho imediato está na centralização de todo o processamento em um programa, requerendo apenas um processador que não está mais limitado às restrições do processamento analógico.

A eliminação dos equipamentos auxiliares evita diversos problemas. A exemplo, o sintetizador pode apresentar falhas (*pit falls*) quando calculando os tempos de reamostragem (taxa de amostragem não uniforme), devido a imperfeições físicas de um sensor como de um *encoder* instrumentando um eixo. Portanto, a utilização deste equipamento é indesejável. Por outro lado, os filtros digitais eliminam a necessidade e limitações dos filtros seguidores passa-baixa *anti-aliasing*, substituído-os por programas de melhor desempenho. Uma vantagem da análise digital é a possibilidade de salvar as medições para um pós-processamento enquanto que, no caso do processamento analógico, requer-se um conversor A/D (analógico digital) para armazenar os dados e um conversor D/A (digital analógico) para reproduzi-los analogicamente. Uma outra forma de pós processar os dados é através de gravadores analógicos, os quais permitem gravar os sinais em fitas e reproduzi-los posteriormente. Mas qualquer destas duas soluções encarece as medições, além de torna-las mais complexas.

A forma ideal de obter uma amostragem não constante no tempo, mas uniforme com o deslocamento angular do eixo é através de um *encoder*, que gera pulsos em função da posição deste. Quando o sinal de outros transdutores é colocado nesta base de amostragem, o espectro calculado fornece componentes em função da rotação, na forma de linhas estacionárias no mapa de ordem. Entretanto, o uso de um *encoder* não é viável em diversas aplicações por restrições de instalação e problemas de *aliasing* em ordens mais elevadas, que podem ser reduzidos com um *encoder* de alta precisão (maior discretização angular, isto é, estima maiores valores de ordem).

Um método clássico de lidar com o erro de *aliasing* é usar uma PLL (*Phase-Locked Loop*) para gerar uma frequência de amostragem proporcional à velocidade de rotação. O objetivo aqui é amostrar um número de pontos constante a cada volta do eixo independente da velocidade, e sincronizado por um sinal de referência (tacômetro), como o fornecido por uma fita reflexiva monitorada de um sensor óptico. O esquema da Figura 3.13 traça o procedimento requerido para o mapa de ordem.

Do sistema analisado mede-se um sinal de tacômetro que alimenta o sintetizador e este, uma vez computado a nova base de amostragem, envia esta referência a um filtro seguidor. O filtro por sua vez recebe o sinal de um transdutor e, juntamente com o sinal do sintetizador, reamostra para evitar a ocorrência de *aliasing*. O sinal resultante é digitalizado por um conversor A/D (em função da rotação) e é calculada a FFT, visualizado em um gráfico tridimensional (ordem x rotação x amplitude).

Esta técnica é aplicável em máquinas com pequena taxa de variação da velocidade de rotação. Caso contrário, a amostragem não será constante em uma volta devido a PLL não acompanhar a nova rotação.

3.3.2. Order Tracking Computacional

Este método foi apresentado juntamente com o equacionamento em Potter (1989) e produto da patente da Hewlett-Packard Company (1990), usando a reamostragem digital do sinal para superar as limitações da técnica baseada na transformada de Fourier. A aquisição é realizada com taxa de amostragem fixa, acompanhado de um sinal de tacômetro. Através deste sinal é possível usar a reamostragem digital para obter um sinal com o mesmo número de pontos por volta, isto é, do sinal com intervalo de tempo constante obtém-se um sinal com intervalo angular constante.

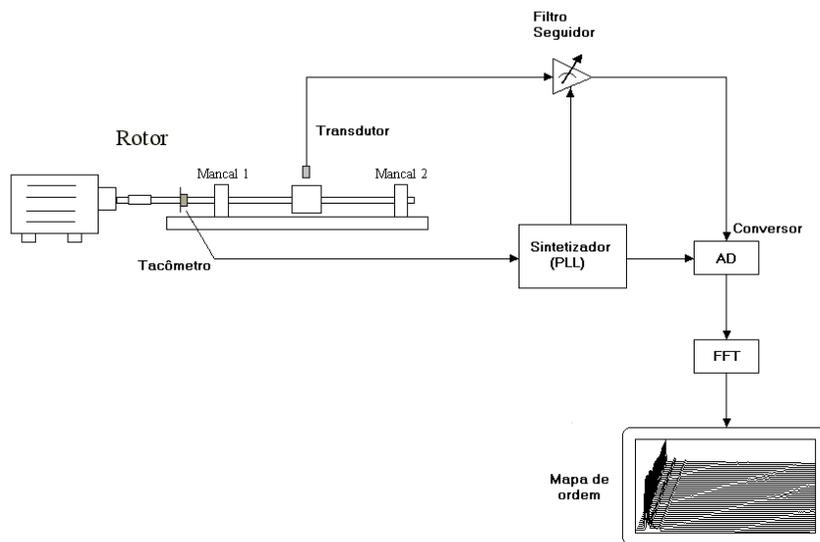


Figura 3.13: Esquema de Order Tracking Analógico com amostragem externa.

Neste método, os dados são adquiridos em intervalos de tempo, Δt , constantes e, em seguida, reamostrados de tal forma a se obter um sinal com um intervalo angular, $\Delta \theta$, constante, conforme ilustra a Figura 3.14.

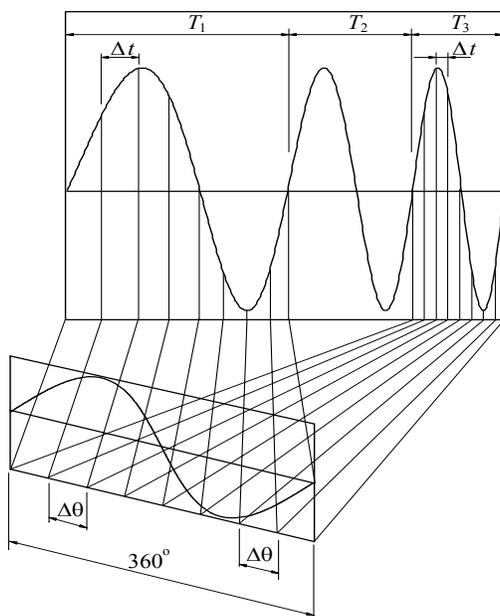


Figura 3.14: Representação no domínio angular de um sinal.

A forma de obter o intervalo regular dos ângulos é interpolando o sinal do tempo baseado nos pulsos do tacômetro, para que se tenha sempre o mesmo número de pontos por revolução. A interpolação é feita através de um polinômio aplicado a três pulsos.

Na reamostragem, considera-se que a posição angular possa ser descrita por uma relação quadrática do tempo (aceleração constante), de forma que,

$$\Phi(t) = b_o + b_1.t + b_2.t^2. \quad (3.5)$$

Isolando-se o tempo em função do ângulo, obtém-se:

$$t = \frac{1}{2.b_2} \left[\sqrt{4.b_2(\Phi - b_o) + b_1^2} - b_1 \right] \quad (3.6)$$

Uma vez que o objetivo da reamostragem é obter um sinal amostrado em intervalos $\Delta\theta$ constantes, define-se:

$$\begin{aligned} \Phi(t_1) &= 0 \\ \Phi(t_2) &= \Delta\Phi \\ \Phi(t_3) &= 2\Delta\Phi \end{aligned} \quad (3.7)$$

A partir dos valores medidos, isto é, tendo um sinal de ângulo em função do tempo (sinal do tacômetro), é possível, de três pontos, determinar os coeficientes da equação (3.5) para um $\Delta\Phi$ definido, a partir da equação.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \Delta\Phi \\ 2\Delta\Phi \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ 1 & t_3 & t_3^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} b_o \\ b_1 \\ b_2 \end{Bmatrix}. \quad (3.8)$$

Resolvendo-se o sistema de equações (3.8), obtém-se os coeficientes:

$$b_o = \frac{t_1 \cdot \Delta\Phi}{\det} [t_3(t_1 - t_3) + 2t_2(t_2 - t_1)], \quad (3.9)$$

$$b_1 = \frac{\Delta\Phi}{\det} [t_1^2 - 2t_2^2 + t_3^2], \quad (3.10)$$

e

$$b_2 = \frac{\Delta\Phi}{\det} [-t_1 + 2t_2 - t_3], \quad (3.11)$$

sendo que,

$$\det = (t_2 - t_1)(t_3 - t_1)(t_3 - t_2). \quad (3.12)$$

Uma vez conhecido estes coeficientes, é possível determinar o tempo para uma variação angular constante:

$$t_k = \frac{1}{2b_2} \left[\sqrt{4b_2(k \cdot \Delta\theta - b_o) + b_1^2} - b_1 \right], \quad (3.13)$$

sendo k inteiro. Tendo o tempo, que corresponde a deslocamentos angulares constantes, interpola-se o sinal nestes pontos. A interpolação fornece a amplitude que o sinal teria se fossem feitas medidas para obter incremento de ângulos constantes durante a rotação de um rotor, por exemplo.

Por meio deste processo, obtém-se a transformação do sinal tempo/ frequência para ângulo/ ordem, o qual não possui erro de *leakage* porquê o número de pontos no domínio angular é escolhido de tal forma que se tenha sempre um número inteiro de períodos em um registro. Pelo cálculo da transformada de Fourier do sinal do ângulo resulta na estimativa das ordens, amplitude e fase. Contudo, este processo é computacionalmente custoso.

3.3.3. Order Tracking por Reamostragem Digital

A reamostragem digital é uma variação da *Order Tracking Computacional*, mas que ainda segue o princípio da amostragem síncrona. Este método é usado em vários programas comerciais, em alternativa da técnica computacional (patente da HP) como, por exemplo, pela Bruel & Kjaer (Herlufsen, 1993).

O método trabalha com uma série de interpolações para gerar um sinal síncrono com a rotação e de incrementos angulares constantes ao invés de incrementos temporais constantes. Do sinal da velocidade de rotação obtém-se o deslocamento angular para cada instante de tempo por uma integração:

$$\theta(t) = \int \omega(t).dt, \quad (3.14)$$

tal que, $\theta(t)$ é o deslocamento angular instantâneo e $\omega(t)$ a velocidade de rotação.

O tempo de reamostragem ($t_{reamostragem}$), isto é, os tempos do sinal que representam um número de pontos constante por volta, é calculado pela interpolação da curva tempo/ ângulo nos pontos de ângulos igualmente espaçados. A equação (3.15) relaciona o tempo em função do ângulo e o tempo de reamostragem obtido pela mesma função nos ângulos de incremento constante ($n.\Delta\theta$).

$$\begin{aligned} t &= f(\theta) \\ t_{reamostragem} &= f(n.\Delta\theta), \quad n \in N. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Também por um processo de interpolação, define-se a amplitude do sinal analisado nos tempos de reamostragem.

$$x_{reamostrado} = x(t_{reamostragem}). \quad (3.16)$$

sendo, x o sinal medido que se quer reamostrar de forma síncrona com a rotação.

Uma vez que o sinal calculado tem taxa de amostragem constante no domínio angular, a relação entre ângulo e ordem é dada por:

$$\begin{aligned} \Delta o &= \frac{1}{R} = \frac{1}{N.\Delta\theta}, \\ R &= N.\Delta\theta, \\ O_{Nyquist} &= O_{max} = \frac{O_{amostragem}}{2}, \\ O_{amostragem} &= \frac{1}{\Delta\theta}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

sendo, Δo o espaçamento de ordem, $\Delta\theta$ o espaçamento angular e R a revolução máxima. $O_{Nyquist}$, O_{max} e $O_{amostragem}$ são a ordem de Nyquist, ordem máxima e taxa de amostragem da ordem, respectivamente. Estas relações são similares às de tempo e frequência.

3.3.4. Time Variant Discrete Fourier Transform Order Tracking (TVDFFT)

Este método de *Order Tracking* é baseado no núcleo da transformada de Fourier, cuja frequência pode variar com o tempo, desenvolvido na tese de doutorado de Blough (1998) e publicado em artigos como o de 1996 e 1997 do mesmo autor. A TVDFFT não requer a reamostragem de cada canal do domínio do tempo para o domínio angular, reduzindo

sensivelmente a carga computacional. A partir de um segundo cálculo, denominado de *Orthogonality Compensation Matrix* (OCM) é possível melhorar a separação de ordens próximas ou cruzadas.

A TVDFT *Order Tracking* é um caso especial da transformada *chirp-z*. Esta transformada é definida como um tipo de transformada de Fourier com um núcleo que possibilita a variação da frequência e do amortecimento com o tempo (ou frequência, ou rotação, como é o nosso caso). Mas, na TVDFT, a variação ocorre somente na frequência, enquanto que o amortecimento fica constante.

O método está baseado na amostragem do sinal com passo constante no tempo e, portanto, as relações de amostragem de Shannon são validadas para este caso:

$$\begin{aligned}\Delta f &= \frac{1}{T} = \frac{1}{N \cdot \Delta t}, \\ T &= N \cdot \Delta t, \\ F_{Nyquist} &= F_{max} = \frac{F_{amostragem}}{2}, \\ F_{amostragem} &= \frac{1}{\Delta t}.\end{aligned}\tag{3.18}$$

O número de pontos (N) e o espaçamento temporal (Δt) entre dois pontos consecutivos determinam a resolução em frequência (Δf) da FFT. A variável T é o tempo de registro, $F_{Nyquist}$, a frequência de Nyquist, F_{max} , a frequência máxima contida no sinal e $F_{amostrado}$ é a frequência de amostragem.

A descrição do sinal no domínio da ordem através da TVDFT é dada equação:

$$X(o_m) = a_m - j b_m,\tag{3.19}$$

cujos coeficientes são dados por:

$$a_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n \cdot \Delta t) \cos\left(2\pi \int_0^{n \cdot \Delta t} (o_m \cdot \Delta t \cdot \frac{Rpm}{60}) dt\right),\tag{3.20}$$

e

$$b_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n \cdot \Delta t) \text{sen}\left(2\pi \int_0^{n \cdot \Delta t} (o_m \cdot \Delta t \cdot \frac{Rpm}{60}) dt\right),\tag{3.21}$$

sendo que,

- o_m é a ordem analisada ($m.\Delta o$),
- a_m os coeficientes de Fourier do termo Cosseinodal de o_m ,
- b_m os coeficientes de Fourier do termo Senoidal de o_m ,
- Rpm a rotação instantânea da máquina.

Substituindo-se os coeficiente (3.20) e (3.21) na equação (3.19), tem-se:

$$X(o_m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n.\Delta t) \cos\left(2\pi \int_0^{n.\Delta t} (o_m.\Delta t.\frac{Rpm}{60})dt\right) + \\ - j.\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n.\Delta t) \text{sen}\left(2\pi \int_0^{n.\Delta t} (o_m.\Delta t.\frac{Rpm}{60})dt\right). \quad (3.22)$$

ou

$$X(o_m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n.\Delta t) \left(\cos\left(2\pi \int_0^{n.\Delta t} (o_m.\Delta t.\frac{Rpm}{60})dt\right) - j.\text{sen}\left(2\pi \int_0^{n.\Delta t} (o_m.\Delta t.\frac{Rpm}{60})dt\right) \right). \quad (3.23)$$

N forma de exponencial complexa a transformada (com núcleo variável) torna-se:

$$X(o_m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n.\Delta t). \exp\left(-j.2\pi.o_m.\int_0^{n.\Delta t} (\Delta t.\frac{Rpm}{60})dt\right). \quad (3.24)$$

Apenas para lembrar, a transformada de Fourier tradicional, de *kernel* fixo, tem relação espectral com o sinal $x(n.\Delta t)$ dado por (Oppenheim, 1989):

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n.\Delta t). \exp(-j.2\pi.k.n). \quad (3.25)$$

Comparando-se as duas transformadas, a diferença está no termo das exponenciais complexas. Do cálculo da FFT normal para a TVDFT, a mudança ocorre em n que, neste último caso, é função da rotação:

$$n \rightarrow \int_0^{n.\Delta t} (\Delta t.\frac{Rpm}{60})dt. \quad (3.26)$$

A partir da relação da equação (3.24) é possível estimar a amplitude e fase de qualquer ordem. Para se ter uma estimativa correta da amplitude são usados as relações que minimizam o erro de *leakage*:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta\omega} &= \text{inteiro} \\ \frac{\text{Ordem Seguida}}{\Delta\omega} &= \text{inteiro} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Apesar desta restrição, podem surgir erros de *leakage* por causa das outras ordens que compõe os dados. Para minimiza-los, pode-se aplicar as janelas usadas na análise convencional da FFT. A escolha da janela depende das ordens contidas nos dados e do aspecto da estimativa da ordem. As estimativas são mais sensíveis ao erro de truncamento em baixas rotações, quando as ordens não estão bem separadas.

O método é muito prático comparado com os outros métodos de *Order Tracking*, podendo ser implementado de uma maneira eficiente. A TVDFT é computacionalmente menos pesada que as técnicas com reamostragem e menos complexas, pois não utiliza a interpolação do domínio do tempo para o angular.

Para diminuir o erro da não ortogonalidade do núcleo no método da TVDFT, aplica-se a *Orthogonality Compensation Matrix* (OCM). Por meio desta é possível analisar variações rápidas do sinal e obter melhor resolução nas ordens próximas ou cruzadas. O método é usado no pós-processamento do resultado estimado da TVDFT.

Para a aplicação da OCM, todas as ordens com energia significativa são primeiramente obtidas pela TVDFT. Qualquer ordem com energia significativa não seguida irá levar a um erro nos resultados finais devido ao acréscimo de ruído nas equações lineares. A equação que relaciona as ordens obtidas pela TVDFT, a matriz de ortogonalidade (OCM) e as ordens corrigidas é dada por:

$$\begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & \cdots & e_{1m} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & & e_{2m} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & & e_{3m} \\ \vdots & & & & \vdots \\ e_{m1} & & \cdots & & e_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \\ \vdots \\ o_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{o}_1 \\ \tilde{o}_2 \\ \tilde{o}_3 \\ \vdots \\ \tilde{o}_m \end{Bmatrix}. \quad (3.28)$$

O primeiro termo da equação, a matriz OCM, é a contribuição da ortogonalidade cruzada da ordem i na estimativa da ordem. O vetor $\{o_i\}$ é o valor compensado da ordem i , enquanto que do lado direito da igualdade o vetor das ordens estimadas pela TVDFT.

Os termos e_{ij} são obtidos aplicando o núcleo da ordem i no núcleo da ordem j :

$$e_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ \exp\left(2\pi \int_0^{n.\Delta t} (o_i.\Delta t. \frac{Rpm}{60})dt\right).Janela. \exp\left(2\pi \int_0^{n.\Delta t} (o_j.\Delta t. \frac{Rpm}{60})dt\right)^* \right\}. \quad (3.29)$$

A janela usada é a mesma que foi aplicada na estimativa da ordem pela TVDFT.

No caso em que as ordens forem ortogonais entre si, a matriz terá termos significativos apenas a diagonal principal, sendo os outros termos iguais a zero, que é a transformada de Fourier padrão com janela uniforme. A estimação das ordens compensadas é obtida multiplicando-se ambos os lados da equação pela inversa da OCM, obtendo-se a equação (3.30).

$$\begin{Bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \\ \vdots \\ o_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & \cdots & e_{1m} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & & e_{2m} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & & e_{3m} \\ \vdots & & & & \vdots \\ e_{m1} & & \cdots & & e_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \tilde{o}_1 \\ \tilde{o}_2 \\ \tilde{o}_3 \\ \vdots \\ \tilde{o}_m \end{Bmatrix}. \quad (3.30)$$

A partir destas ordens compensadas é possível obter resultados melhores que a FFT padrão, que as técnicas de reamostragem e que a própria TVDFT sozinha.

Capítulo 4

Filtros Adaptativos

Os métodos apresentados no Capítulo 3 referem-se às técnicas de visualização das componentes que dependem da rotação, decompondo-as em ordens. Entretanto, não é possível obter por tal metodologia uma determinada componente isoladamente. Este fato não reduz sua importância como uma ferramenta de análise de sinais não estacionários, mas a capacidade de extração de ordens, seja para eliminar componentes que não interessam ao estudo ou mesmo de analisar separadamente uma destas, abriria uma infinidade de possibilidades de compreender melhor as características de uma máquina em regime não estacionário.

Com vista neste tipo de tratamento de sinais foram propostos nos anos 90 por Leuridan e Vold, filtros adaptativos de sinais dependentes de uma referência (rotação), que são os filtros de Kalman e de Vold-Kalman. Ambos foram implementados neste trabalho devido ao seu grande valor como ferramenta de análise de componentes rotativos, tal como se usa na indústria para desenvolvimento de produtos. O acesso ao sinal temporal de uma das componentes permite trabalhá-lo, como já mencionado, na psicoacústica (análise sonora com ferramentas subjetiva/objetiva), verificando a influência de cada uma das componentes em relação ao sinal completo.

Apesar da aplicação do filtro de Kalman nas máquinas rotativas em condições de rotação variável ser relativamente nova, o uso da técnica de filtragem já é conhecido desde os anos 60, o que torna este método conhecido matematicamente e cuja eficácia já foi comprovada. Neste capítulo apresenta-se a formulação destes filtros aplicado a sinais não estacionários provenientes de medições (simulações, neste caso) de máquinas rotativas, descritos nos trabalhos de Vold e Leuridan (1993, 1997a 1997b).

4.1. Order Tracking Baseado no Filtro de Kalman

A partir da teoria de controle de sistemas, Vold (1993) e Leuridan desenvolveram um método baseado no filtro de Kalman. Embora esta implementação seja computacionalmente pesada, a técnica é mais flexível do que os outros métodos apresentados.

Este método, como na *Order Tracking Computacional*, utiliza-se do sinal do tacômetro para estimar a frequência instantânea para cada instante de tempo. O conhecimento desta frequência é importante para que se possa aplicar o filtro de Kalman de segunda ordem, pois este depende da rotação, como mostra a equação a diferença do filtro, dada por:

$$x(n.\Delta t) - 2 \cos(\omega.\Delta t).x((n-1)\Delta t) + x((n-2)\Delta t) = 0, \quad (4.1)$$

sendo $x(n.\Delta t)$ a n -ésima amostra discreta dos dados de vibração.

Como a frequência varia com o tempo, não se pode tomar os três pontos para definir a rotação (frequência). Portanto a equação é reescrita da seguinte forma (equação da estrutura):

$$x(n\Delta t) - 2 \cos(\omega\Delta t).x((n-1)\Delta t) + x((n-2)\Delta t) = \varepsilon(n), \quad (4.2)$$

cujo, $\varepsilon(n)$ é um termo não homogêneo. Este é usado para descrever variações de amplitude e frequência de um seno perfeito. O desvio padrão deste termo é designado por $\delta_\varepsilon(n)$.

A relação entre a ordem, $x(n)$, e o dado medido, $y(n)$, é chamada de equação de dados:

$$y(n) = x(n) + \eta(n). \quad (4.3)$$

cujo, $\eta(n)$ é denominada de componente *Nuisance*, que representa a parte do sinal com as ordens não estimadas (as ordens não desejadas) e o ruído. O desvio padrão é $\delta_\eta(n)$. Se $\eta(n)$ é grande, então grande parte do sinal de $y(n)$ contém as ordens não estimadas e/ ou ruído.

Combinando-se a equação estrutural e a de dados numa relação linear é obtido a amplitude da ordem desejada, sendo necessário no mínimo três pontos dos dados medidos:

$$\begin{bmatrix} 1 & -2 \cos(\omega.\Delta t) & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x(n-2) \\ x(n-1) \\ x(n) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon(n) \\ y(n) - \eta(n) \end{Bmatrix}. \quad (4.4)$$

HCF para seguir uma ordem que varia muito rápido. Nestes casos são utilizados valores de HCF menores, o que permite uma banda passante do filtro maior e com resposta mais rápida.

Pela passagem do sinal no filtro consegue-se estimar a amplitude e fase da ordem desejada. A grande vantagem apresentada pelo filtro seguidor de ordem de Kalman é que ele é capaz de separar componentes muito próximas e extrair, sem erro de fase, a representação no domínio do tempo de tais ordens, ou seja, isolar uma ordem e reconstituí-la no tempo. Isto pode ser usado diretamente na análise da qualidade de som. As desvantagens do filtro seguidor de Kalman são o custo computacional e a determinação do fator de confiança. Este é um fator de ponderação que deve ser definido para o processo de solução por mínimos quadrados e que controla a performance do filtro - sua banda e a velocidade de convergência. Infelizmente, não existe nenhuma técnica para se determinar estes fatores de tal forma que se obtenha resultados consistentes para qualquer conjunto de dados.

4.2. Filtro Seguidor de Vold-Kalman

O filtro seguidor de Vold-Kalman (Vold, 1997a e 1997b) possui uma pequena diferença na formulação em relação ao filtro de Kalman original, equação (4.2). Ela considera um termo exponencial complexa na implementação do filtro que altera o número de pólos e as características da banda passante. A equação deste filtro é dada por:

$$x(n+1) - x(n) \exp(i\omega \Delta t) = \varepsilon(n) \quad (4.9)$$

O termo exponencial representa o ângulo que a ordem passa em uma única variação de tempo, Δt . Se a amplitude da ordem não mudar neste período, então o termo $\varepsilon(n)$ será zero.

Os dados adquiridos são multiplicados pela função exponencial, ou fasor, que é uma função do tempo, obtendo-se a expressão:

$$y_{DC}(t) = y(t) \cdot \exp(-ik \int_0^t \omega(u) du), \quad (4.10)$$

sendo que, y_{DC} é o histórico temporal deslocado na frequência e k é a ordem desejada.

O efeito do produto sobre os dados é a centralização da ordem de interesse sobre DC, obtendo a seguinte simplificação sobre a equação (4.9).

$$x(n+1) - x(n) = \varepsilon(n.) \quad (4.11)$$

A ordem extraída pela equação (4.12), nesta fase, é a amplitude complexa re-modulada:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ r(n) & 0 & 0 \\ 0 & r(n+1) & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x(n) \\ x(n+1) \\ x(n+2) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ r(n).y_{DC}(n) \\ r(n+1).y_{DC}(n+1) \end{Bmatrix}. \quad (4.12)$$

A solução da equação é uma estimativa da amplitude e fase do envelope, que precisa ser re-modulada, $\tilde{x}(t)$. Isto é feito multiplicando-se pela expressão do fasor negativo. A estimativa é somente nas frequências positivas da ordem.

$$\tilde{x}(t) = 2 \operatorname{Re}(x(t). \exp\left(ik \int_0^t \omega(u) du\right)). \quad (4.13)$$

Esta função de ordem re-modulada pode ser usada para subtraí-la do sinal original, permitindo uma análise sem a presença da ordem extraída. Ou seja, verificar o quanto aquela ordem participa da vibração de um sistema rotativo, por exemplo.

O Filtro seguidor de Vold-Kalman é capaz de separar ordens que se cruzam e identificar, com maior precisão, ordens próximas. Além disso, este método permite variar a forma do filtro com o uso de filtros de ordens mais elevadas. Contudo, na determinação do fator de confiança, como em todos os outros casos, a experiência do usuário ainda é de vital importância.

Capítulo 5

Implementação e Simulação

Neste capítulo apresentam-se as implementações dos métodos citados nos Capítulos 3 e 4, descrevendo esquematicamente a seqüência para passar o sinal no domínio do tempo/frequência para o domínio ângulo/ordem. Algumas simulações de sinais com componentes de frequência variantes no tempo são geradas para caracterizar, comparativamente, a qualidade das curvas de ordem, tempo de processamento e problemas relacionados com *aliasing* (desdobramento). Em uma segunda etapa, a resposta numérica de um rotor de Laval é utilizada para simular uma medição experimental, igualmente utilizada para determinar as qualidades e limitações dos métodos. Por exemplo, a resposta de um rotor isotrópico é usada para analisar efeitos do comprimento de bloco e do uso de janelas para reduzir *leakage* (vazamento). Da mesma formulação, mas com um rotor anisotrópico, avalia-se a presença de movimentos de precessão direta e retrógrada a partir de mapas de ordem. Este tipo de análise dinâmica em rotores é pouco discutido na literatura.

Na seqüência, os filtros de Kalman e Vold-Kalman são usados na extração de componentes temporais da resposta do rotor isotrópico, cujos resultados auxiliam na qualificação e comparação dos métodos. Nesta condição, filtra-se também o sinal para diversos valores de HCF, parâmetro de grande influência no comportamento dos filtros. Na literatura apresenta-se o filtro de Vold-Kalman como sendo capaz de extrair corretamente múltiplas ordens, ordens próximas ou ordens cruzadas. Esta característica é avaliada através da simulação de um rotor com várias ordens, duas delas próximas e, em uma outra simulação, com ordens cruzadas.

A implementação de todos os algoritmos é feita em ambiente *Matlab*[®], o que simplificou bastante o trabalho uma vez que este dispõe de diversas ferramentas prontas, como filtros digitais, integradores numéricos e vários tipos de interpoladores. Contudo, as limitações computacionais do próprio *Matlab* restringiram a velocidade dos algoritmos implementados e limitaram o tamanho dos conjuntos de dados que puderam ser analisados (por problemas de falta de memória).

5.1. Simulação Numérica

Neste exemplo, simula-se um sinal composto de várias ordens e de um seno com frequência constante de 32 Hz. A amplitude de cada componente é mantida constante enquanto que suas frequências aumentam linearmente, a uma aceleração de 5 Hz/s². As ordens pertencem a sinais do tipo *chirp* (funções seno com frequência variável no tempo), cujas componentes são a primeira, terceira, quarta, quinta e meia (5,5) ordens. A Figura 5.1 mostra cada uma das componentes e o sinal resultante. Vale ressaltar que as amplitudes das componentes não variam com o tempo. A primeira ordem e o sinal de frequência constante têm amplitudes iguais a 1, a terceira ordem tem amplitude de 0,35, a quarta de 0,75 e a quinta e meia de 0,5.

Realiza-se a análise de ordem de zero a cinco segundos partindo de condições iniciais nulas, como apresentada na Figura 5.2(a). Em (b) está a rotação, que representa a frequência da primeira ordem, em rpm. O sinal é amostrado a uma taxa de 10.000 pontos por segundo.

5.1.1. Order Tracking Computacional (OTC)

Este método é de fácil implementação, uma vez que não utiliza nenhum recurso computacional complexo, como se verifica no caso da TVDFT, que tem um núcleo da FFT variável com a rotação, ou cálculos por integração e interpolações como na Reamostragem Digital. A *Order Tracking Computacional* utiliza uma função quadrática para descrever a relação entre tempo e ângulo no intervalo de dois pulsos consecutivos do tacômetro. Assim, estima os tempos de reamostragem para interpolar o sinal de um sensor qualquer; obtendo uma amostragem síncrona com a rotação, como indicado no diagrama da Figura 5.3.

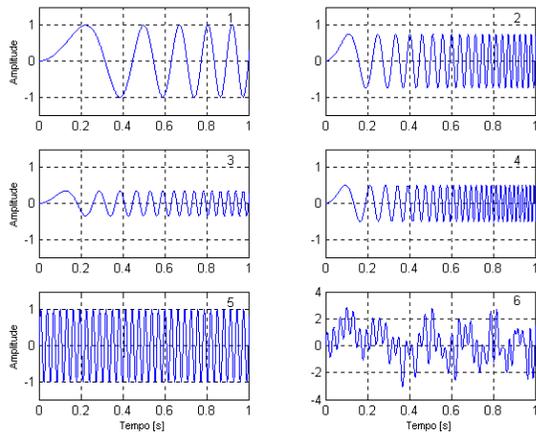


Figura 5.1: Soma de quatro *chirps* (1-4) e um seno de frequência constante (5), resultando no sinal (6).

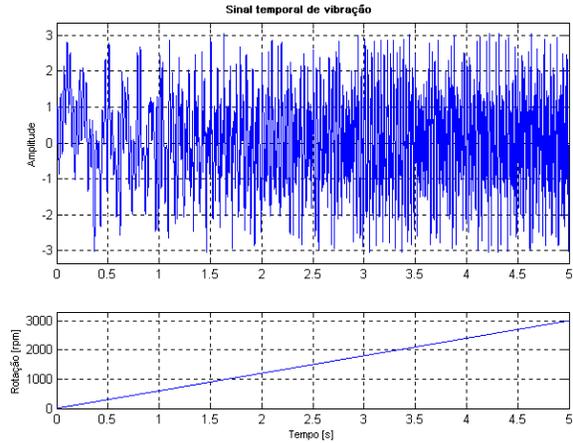


Figura 5.2: (a) sinal simulado resultante e (b) rotação.

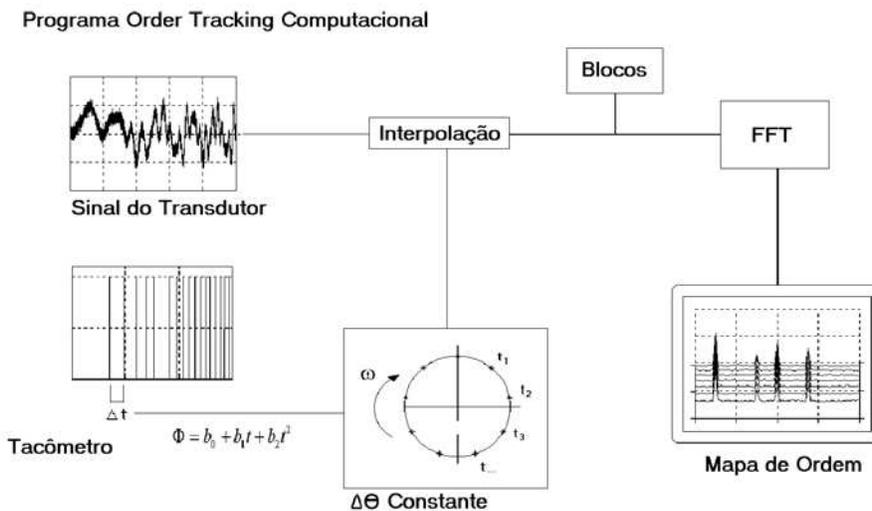


Figura 5.3: Diagrama do algoritmo de *Order Tracking Computacional*.

Contudo, o modelo quadrático de ângulo pode representar uma limitação na variação da rotação, quando esta não varia linearmente ou para variações muito bruscas de velocidade. Alternativas como a utilização de modelos de ordens maiores ou um aumento no número de pulsos por volta do eixo podem melhorar a estimativa das ordens, mas isto significa, no primeiro caso, inverter matrizes maiores, podendo ocorrer problemas numéricos ou um tempo

computacional maior e, no segundo, a necessidade de usar um *encoder* ou pulsos gerados com boa precisão angular.

Na implementação do algoritmo, inicialmente são determinados os instantes dos pulsos do tacômetro. A seguir estimam-se os tempos com variação angular constante a cada par de pulsos consecutivos, pela equação (3.13). Desta estimativa interpola-se o sinal do transdutor, convertendo a amostragem de intervalo de tempo regular para uma variável de acordo com a velocidade de rotação.

Para poder testar este método com o sinal gerado pelos *chirps* e a frequência constante é necessário produzir um sinal de tacômetro referente à primeira ordem. Isto pode ser feito acompanhando um período completo da componente e definindo-o como tempo do pulso. A partir da estimativa da rotação e do sinal da Figura 5.2, pode-se gerar o mapa de ordem da Figura 5.4, em que as componentes são separadas em função das ordens ao longo da rotação, segundo eixo cartesiano. O mesmo pode ser substituído pelo tempo, o que dispensaria a estimativa da rotação. Os *chirps* correspondem aos picos de ordem constante, ao passo que o sinal de frequência constante assinala como uma curva assintótica. A diminuição de seu valor, com o aumento da rotação, deve-se à redução da relação frequência/ rotação, sendo que, quando a frequência constante cruza a primeira ordem é o momento em que a rotação é igual à frequência de 32 Hz. Neste caso, o número de pontos reamostrados usados em cada bloco (para cada linha de rotação é usado sempre o mesmo número de voltas) foi de 400 pontos, o *overlap* foi de 28% (valor de atualização, isto é, rejeita-se 28% dos dados para o próximo bloco calculado) e foi utilizada janela Hanning para redução do erro de *leakage*.

O incremento de ordem pode ser obtido pela seguinte equação:

$$\Delta o = \frac{O_{Max}}{N} \quad (5.1)$$

Neste caso, como a ordem máxima foi definida como 20 e sendo 400 o número de pontos, então a variação (incremento) de ordem é 0,05.

O desenvolvimento de uma determinada amplitude e fase de ordem ao longo da rotação (ou tempo) pode ser examinado em curvas bidimensionais que seguem o plano de uma ordem do mapa. Na Figura 5.5 mostra-se a amplitude e fase da primeira, terceira, quarta e quinta e meia

ordens e, como se pode ver, estes valores correspondem exatamente à amplitude da componente gerada originalmente.

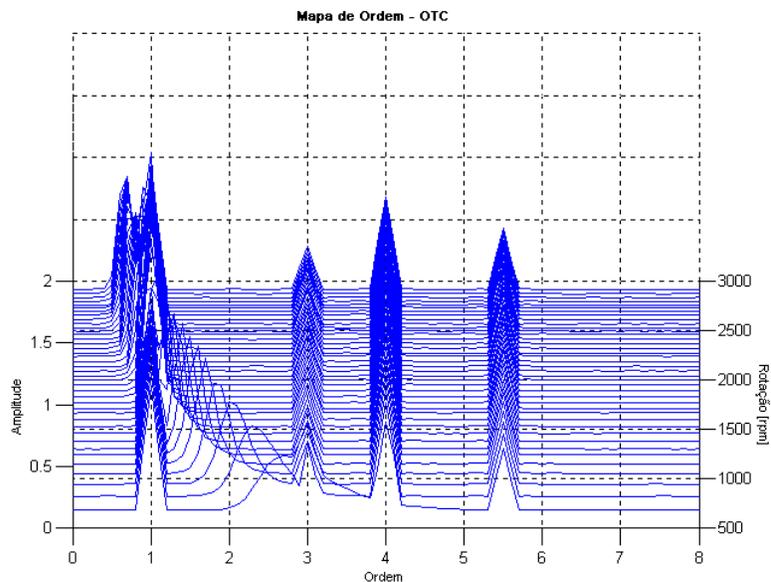


Figura 5.4: Mapa de ordem pelo método de *Order Tracking Computacional* com 400 pontos por bloco, *overlap* de 28% e janela Hanning.

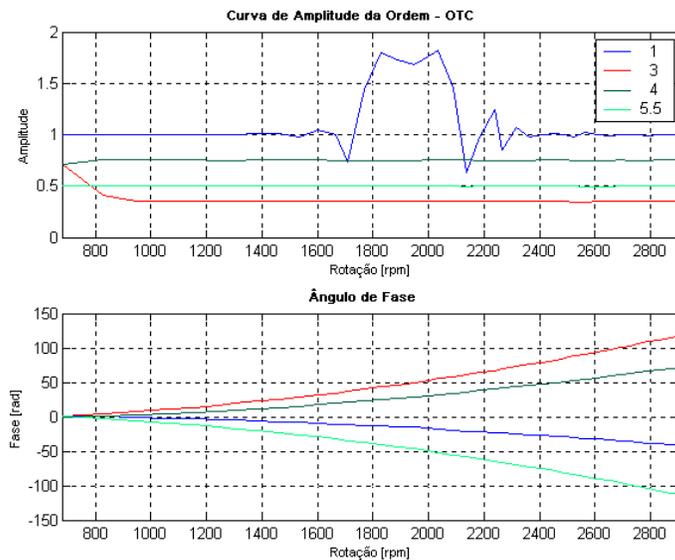


Figura 5.5: Amplitudes e fases das ordens obtidas pela OTC do sinal gerado.

O sinal de frequência constante surge nas curvas de amplitude/ fase como picos ou uma elevação da amplitude, isto ocorre por causa da sobreposição de ambos os sinais. Os métodos de

Order Tracking não são capazes de separar a ordem de outros sinais quando ocorre o cruzamento destas curvas, como aparece na Figura 5.5 para a primeira e terceira ordens, cujas amplitudes são influenciadas pela frequência no momento da interceptação, que na primeira ordem ocorre em torno de 1920 rpm, e na terceira, em 640 rpm.

O significado da fase destas curvas é apresentado posteriormente, quando se analisa a simulação de um rotor. Este parâmetro em específico é de difícil cálculo, pois frequentemente tende a divergir. Mesmo na literatura, poucas curvas são disponíveis e quase não há referência quanto ao seu significado físico.

Uma característica importante nos mapas é o aparecimento do erro de *leakage* (vazamento) para as componentes de frequência fixa, pois a alteração da taxa de amostragem, embora reduza a dispersão do sinal para as ordens inteiras, compromete os resultados para a frequência constante. Portanto, a reamostragem possibilita obter melhores resultados nos sinais variantes no tempo do que nos de frequência constante.

Um outro comportamento visível nos mapas obtidos pela amostragem síncrona é uma dispersão maior das frequências constantes a baixa rotação. Isto ocorre porque em baixa rotação a variação da ordem Δo representa uma faixa de frequência menor, enquanto que em alta rotação as linhas de ordens significam uma faixa de frequência muito maior. Para exemplificar, caso a rotação esteja em 10 Hz, um intervalo de ordem de 0,1 representaria 1 Hz na frequência, enquanto que se a rotação passa para 100 Hz cada 0,1 de ordem representaria um aumento de frequência de 10 Hz. Por isso na Figura 5.4, a frequência de 32 Hz aparece mais espalhada nas linhas de rotação iniciais.

5.1.2. Reamostragem Digital

O método da Reamostragem Digital é equivalente ao *Order Tracking Computacional*, a não ser pelo procedimento de determinação dos tempos de reamostragem. Ao invés de utilizar um modelo de ângulo e tempo quadrático, definem-se os tempos em que os ângulos são igualmente espaçados através de uma integração numérica da estimativa da rotação e um processo de interpolação, como ilustra a Figura 5.6.

A aquisição é realizada para os dois sinais, transdutor e tacômetro, mas a taxa de amostragem não precisa ser necessariamente é igual. O importante é ter a discretização do tacômetro alta o suficiente para definir com precisão os pulsos. A análise é realizada em duas partes: na primeira determinam-se os tempos de reamostragem pelo sinal da rotação e, na segunda, interpola-se a medição do transdutor com esta informação.

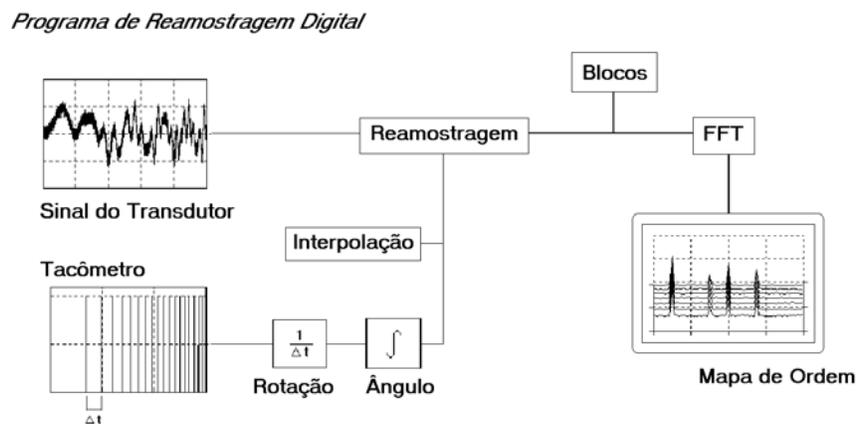


Figura 5.6: Diagrama do algoritmo de Reamostragem Digital.

Dos pulsos do tacômetro, determina-se a velocidade de rotação pelo método apresentado no Capítulo 3. O ângulo é obtido da integração numérica da rotação, sendo que o método utilizado neste trabalho é o trapezoidal. Por meio desta integração, obtém-se a área abaixo da curva da rotação, ou seja, o deslocamento angular a cada instante de tempo (ainda com incrementos de tempo constantes). O número de pontos por volta é definido pelo usuário, na forma de incremento angular constante. Para cada um destes valores de ângulo, realiza-se a interpolação, calculando os tempos de reamostragem. O mesmo não apresenta mais uma taxa de amostragem temporal constante, mas uma taxa constante no domínio angular.

A Figura 5.7 mostra uma representação da passagem de uma amostragem para outra: nas curvas de cima está o deslocamento angular com o tempo de aquisição assíncrona (esquerda) e os tempos de reamostragem (direita) indicados com asteriscos, e abaixo das mesmas os pontos medidos de um eixo girando no sentido horário. Originalmente, a distribuição dos pontos é irregular, mas após o processo de reamostragem apresenta-se uniforme.

A partir do tempo de amostragem, determina-se a amplitude do sinal de vibração (por exemplo) através de interpolação. Para melhorar a característica do sinal interpolado, Blough

(1998) sugere o uso de uma superamostragem para aumentar a discretização do sinal antes do processo de reamostragem. Calculado o sinal reamostrado, utilizam-se janelas para reduzir o efeito do erro de *leakage*. Além das janelas, o uso de filtros *anti-aliasing* é recomendado, uma vez que para altas rotações e elevadas ordens, este tipo de problema pode ser encontrado.

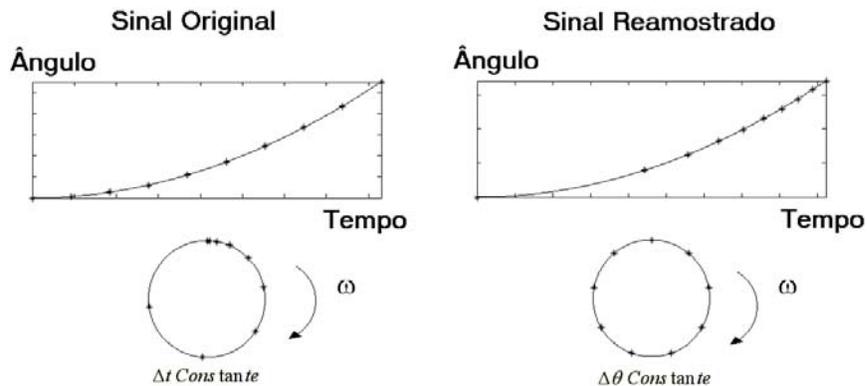


Figura 5.7: Representação da passagem de um sinal com taxa de amostragem constante para um incremento angular constante pela reamostragem.

Após as séries de interpolações, o sinal torna-se estacionário no domínio angular, podendo ser aplicado a transformada de Fourier como em uma análise clássica. O mapa de ordem é traçado em partes do histórico, para cada um destes blocos usa-se a FFT, posicionando a curva resultante em função da rotação ou do tempo médio do bloco. A Figura 5.8 exibe um esquema dos mapas de ordem, no qual o histórico é dividido em partes (podendo ter sobreposição dos dados do bloco – *overlap*) e, para cada uma, calculada o espectro e posicionada em um gráfico tridimensional.

A mesma metodologia de dividir em partes para usa-las numa curva 3D é aplicada nos diagramas de cascata, que representa a visualização da amplitude do espectro em função da frequência, ao invés da ordem como nas técnicas de *Order Tracking*.

A Figura 5.9 mostra um diagrama de cascata do sinal simulado. Pode-se verificar as quatro componentes de ordem, aumentando de frequência com o aumento da rotação e picos fixos em frequência do sinal estacionário. Esta forma de visualização é comumente aplicada em análise de sinais com frequência variável e é de fácil montagem, já que necessita apenas de um algoritmo de

FFT. A desvantagem em utilizar o diagrama de cascata é a dificuldade de estimar a amplitude em baixa rotação, quando as ordens estão próximas uma das outras. O diagrama é subdividido em blocos de 8000 pontos com *overlap* de 10%. O cálculo da FFT é acompanhado de um tratamento temporal pela janela Hanning, para reduzir influência de *leakage*.

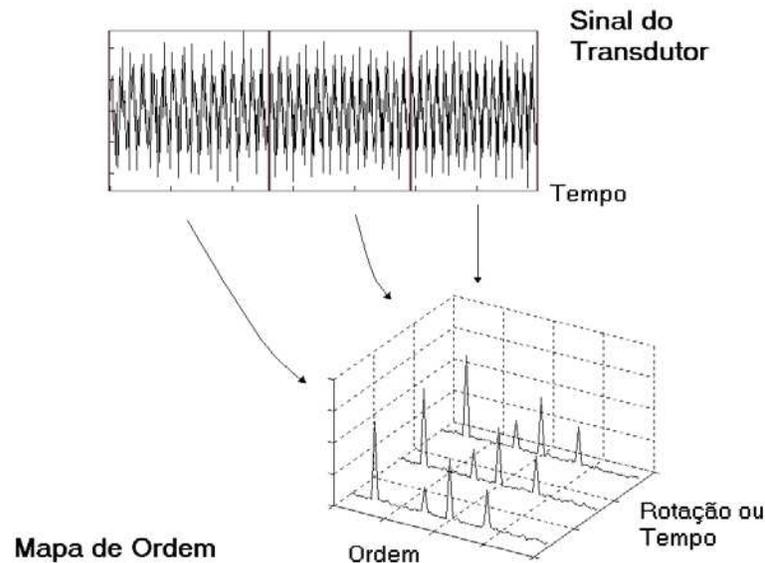


Figura 5.8: Mapa de ordem obtido por blocos do sinal de um transdutor.

A Figura 5.10 mostra o mapa de ordem obtido pela reamostragem digital do mesmo sinal analisado pela OTC. Novamente, os parâmetros usados são: blocos contendo 400 pontos do vetor reamostrado, atualização de 29% de uma linha de rotação para a seguinte e tratamento do sinal temporal pela janela Hanning.

A Figura 5.11 mostra as amplitudes e fases das ordens obtidas pela reamostragem digital do sinal gerado. Comparando-se estes resultados com a Figura 5.5 (que mostra as amplitudes e fases das ordens obtidas pela OTC), percebe-se um comportamento semelhante, ou seja, espalhamento maior da frequência fixa em baixa rotação e separação da amplitude das ordens com pouca divergência dos valores originais, exceto nos cruzamentos com a frequência constante, quando a amplitude aumenta. A fase das ordens diverge novamente, como na OTC.

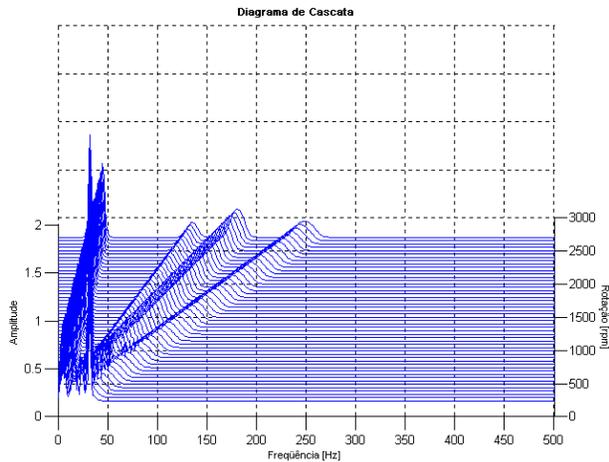


Figura 5.9: Diagrama de Cascata com 8000 pontos por bloco, *overlap* de 10% e janela Hanning.

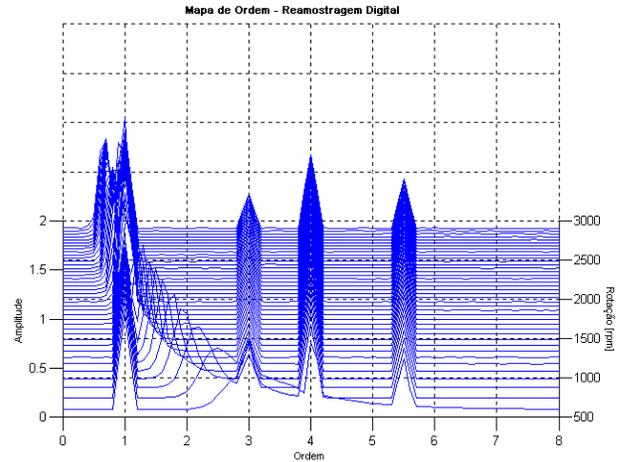


Figura 5.10: Mapa de ordem obtido pela Reamostragem Digital com blocos de 400 pontos, *overlap* de 29% e janela Hanning.

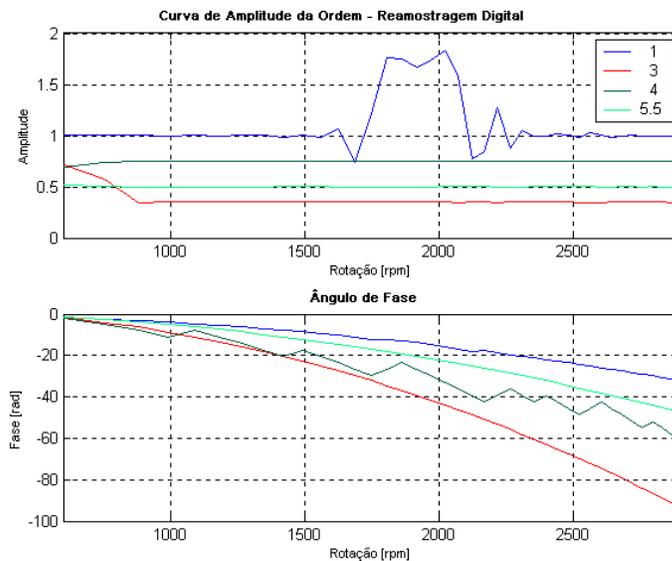


Figura 5.11: Amplitudes e fases das ordens obtidas pela Reamostragem Digital do sinal gerado.

5.1.3. Order Tracking com Transformada de Fourier Discreta Variável no Tempo

A TVDFT (*Time Variant Discrete Fourier Transform Order Tracking*) é um método diferente dos outros dois apresentados anteriormente. Para estimar as ordens não se utiliza uma amostragem síncrona, mas um cálculo da Transformada de Fourier diretamente sobre o sinal de

amostragem assíncrona (intervalo de tempo constante), forma como os dados são usualmente adquiridos. Um fluxograma do método é apresentado na Figura 5.12, cuja estimativa da rotação representa o ângulo do cálculo dos coeficientes de Fourier de núcleo variável.

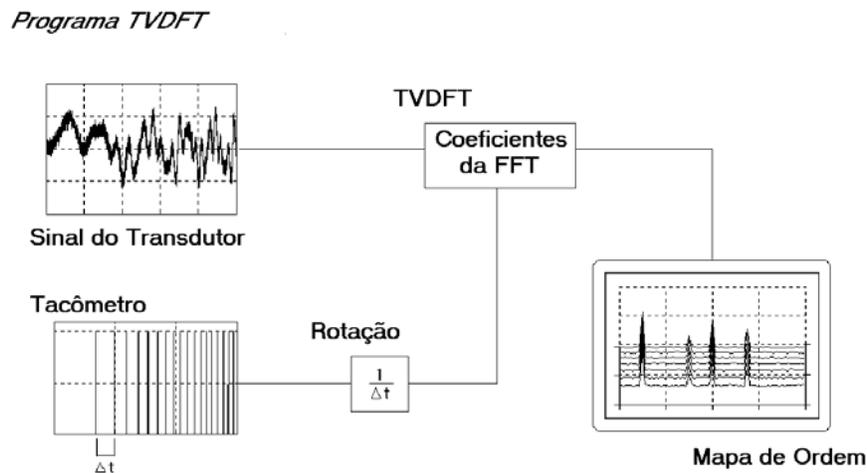


Figura 5.12: Diagrama do algoritmo de TVDFT.

O algoritmo da TVDFT também se divide em duas partes fundamentais, sendo inicialmente avaliado a velocidade de rotação do sinal do tacômetro, pelo método de análise discutido anteriormente e, em seguida, determinados os coeficientes de Fourier de núcleo variável, em função da estimativa da rotação, para o sinal adquirido do transdutor. Os coeficientes são as partes reais e imaginárias do domínio da ordem. Novamente usa-se um método de integração numérica (trapezoidal) para definir o deslocamento angular em cada instante de tempo (esta informação é usada nos cálculos da ordem).

O mapa de ordem é gerado em partes do sinal do transdutor como é feito no método da reamostragem. Contudo, uma grande diferença entre os métodos está no número de pontos analisáveis, isto é, como a TVDFT é computacionalmente menos pesada, pode-se analisar um número de pontos maior sem a necessidade de um tempo elevado de processamento, como ocorreria na Reamostragem Digital devido às interpolações requeridas.

A única interpolação requerida na TVDFT seria para ajustar as taxas de amostragem do sinal do transdutor e do tacômetro (estimativa da rotação) caso tenham discretizações diferentes. Isto é, a aquisição tem uma alta taxa de amostragem no tacômetro para determinar com precisão

os pulsos, mas o transdutor pode ser amostrado a uma taxa menor. Assim, para colocar na mesma base de tempo ambos os sinais, usa-se a interpolação.

Um esquema de redução da taxa de amostragem da estimativa da rotação para o mesmo nível da discretização do transdutor é apresentado na Figura 5.13. As linhas da primeira curva mostram que, por terem taxas de amostragem diferentes, os pontos não coincidem, alterando-as após a interpolação da rotação (curva da direita). Qualquer dos métodos de *Order Tracking* com uso de tacômetro requer o mesmo tipo de tratamento, quando a amostragem não é única entre os sensores.

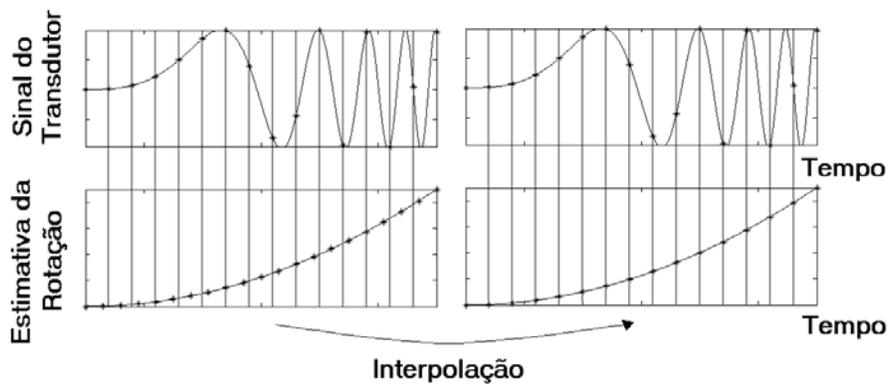


Figura 5.13: Interpolação da rotação para a mesma taxa de amostragem do sinal do transdutor.

A Figura 5.14 é obtida dos dados gerados da Figura 5.2, composto das várias ordens (1, 3, 4 e 5,5) e uma frequência constante (32 Hz). No caso da TVDFT, não se utiliza um número constante de pontos por bloco, como na OTC ou na Reamostragem Digital. O número de pontos varia de bloco a bloco para manter sempre constante o número de revoluções, isto devido à irregularidade da amostragem visto do domínio angular (aquisição com intervalo de ângulo diferente a cada instante). Esta escolha (utilizar um número de revoluções constante por bloco) provoca no mapa de ordem estimativas com banda de ordem constante. Isto é, definir um mapa significa como se filtrasse o sinal naquelas ordens, e por isso do conceito de largura de banda. O mapa do sinal simulado, obtido pela TVDFT, apresentado na Figura 5.14, usa 39 revoluções por bloco. Os outros parâmetros são: *overlap* de 5% e janela de tipo Hanning. A precisão da ordem é de 0,1 com estimativa de até a décima ordem.

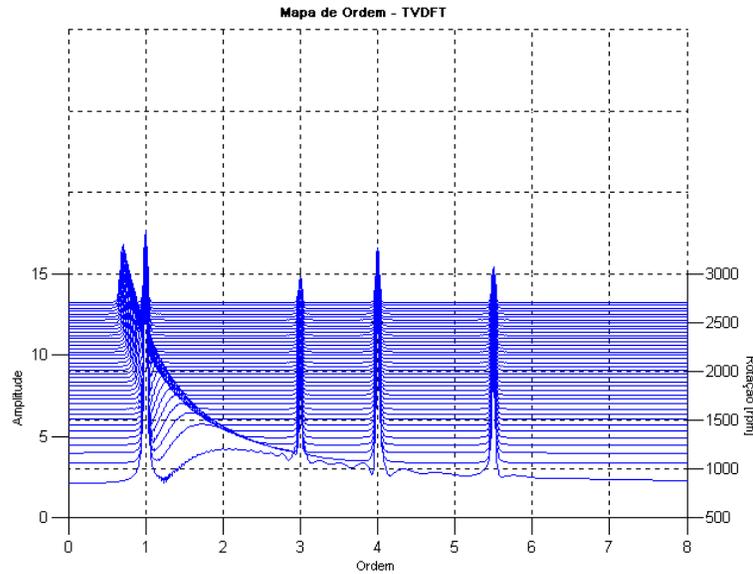


Figura 5.14: Mapa de ordem obtido pelo método da TVDFT com blocos de 39 revoluções, *overlap* de 5% e janela Hanning.

Como já foi visto, a Reamostragem Digital obedece às relações de Shannon para os domínios do ângulo e ordem, ou seja, são válidas as relações da equação (3.17). Por outro lado, o método da TVDFT segue as mesmas relações que o cálculo da frequência a partir do tempo, equação (3.18). Porém, como trabalha com o domínio da ordem, este também obedece a relação entre ângulo e ordem da equação da reamostragem, dada por.

$$\Delta o = \frac{1}{R} = \frac{1}{N \cdot \Delta \theta}. \quad (5.2)$$

Os mapas de ordem mostrados nas Figura 5.4 e Figura 5.10 apresentam diferentes dispersões de picos em relação ao mapa da Figura 5.14. A abertura nas curvas é um efeito direto de *leakage*, que neste caso é menor no método da TVDFT por causa do elevado número de pontos usados (equivalente a um elevado número de voltas). De acordo com os trabalhos na literatura, como o de Blough (1996), a TVDFT está mais suscetível ao *leakage* do que a reamostragem, isto porquê não se pode garantir, com a taxa de amostragem constante, que os

pontos amostrados estejam sobre um número completo de voltas. Entretanto, o erro pode ser reduzido aumentando-se o número de revoluções por bloco.

Na condição de baixa rotação surge ainda o problema da interação entre as ordens, como é visível na Figura 5.15. Pode-se perceber que o início das curvas tem amplitudes maiores, antes de diminuir próximo a um patamar. Esta elevação vem da soma da energia das ordens vizinhas, enquanto que o patamar representa a amplitude da ordem estimada. Comparando-se estes resultados com aqueles obtidos através da Reamostragem Digital (Figura 5.11) verifica-se que a amplitude da TVDFT é muito maior e com uma tendência de queda com o aumento da rotação.

A solução proposta pelo Blough é a aplicação de uma relação de ortogonalidade entre as ordens estimadas, equação (3.30). A partir da definição da matriz de ortogonalidade, denominada de OCM (*Orthogonality Compensation Matrix*), é possível separar a influência de uma ordem sobre a outra. O resultado deste tratamento está na Figura 5.16 para a primeira, terceira, quarta e quinta ordens (as mesmas ordens escolhidas para compor a matriz de compensação ortogonal deste caso). Nota-se em muito a melhoria das amplitudes, que agora são próximas às estimavas da OTC e da Reamostragem Digital. Contudo a influência da frequência constante ainda continua como um aumento de amplitude, observado fundamentalmente na primeira e no início da terceira ordem.

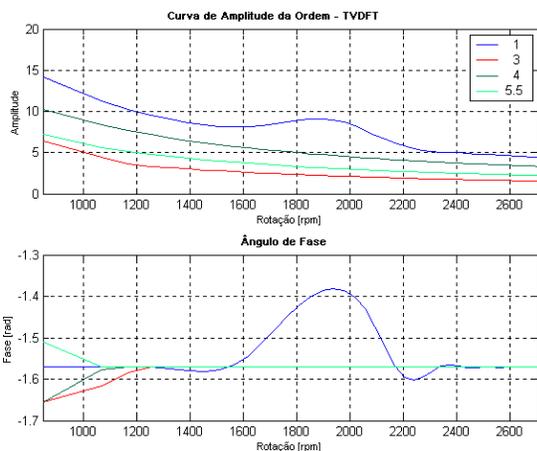


Figura 5.15: Amplitude e fase pela TVDFT.

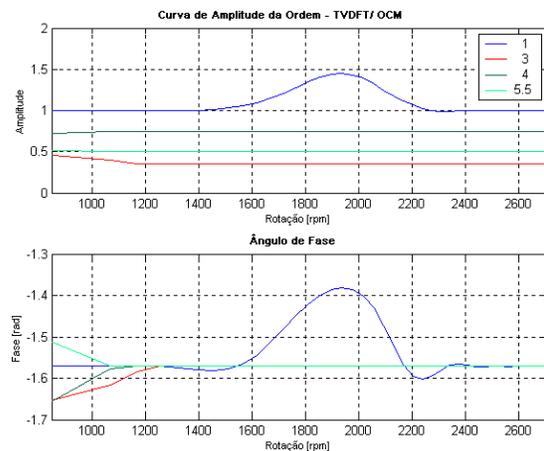


Figura 5.16: Amplitude e fase pela TVDFT/OCM.

Um importante resultado destes gráficos está na fase, em que a sua estimativa de cada uma das ordens seguidas não diverge como ocorre na reamostragem mas tendem a estabilizar em um único valor próximo de $-\pi/2$ ($\approx -1,57$) e variar somente quando há picos da frequência constante. Uma outra característica no tratamento da OCM é de não alterar a fase estimada inicialmente pela TVDFT. A aplicação da OCM também pode ser realizada para reduzir a influência de ordens próximas, não apenas quanto à proximidade devido à baixa rotação, mas quando o próprio sistema possui uma fonte de vibração com frequência perto da velocidade de rotação, por exemplo. O mesmo procedimento é útil nas regiões em que há cruzamento de ordens.

Apesar da TVDFT ser muito influenciável pelo erro de *leakage* e a interação entre as ordens, é um método muito prático por utilizar dados com frequência de amostragem constante, permitindo-lhe uma performance mais rápida que os métodos de reamostragem. Além disso, a possibilidade de um pós-processamento do mapa de ordens pelo OCM, e portanto, uma melhoria na qualidade da estimativa da amplitude, coloca-o no mesmo nível de precisão ou melhor que a OTC e a Reamostragem Digital, quanto à estimativa da amplitude/ fase.

A escolha de um determinado método para analisar um conjunto de dados depende exclusivamente da aplicação. Caso a visualização das ordens como um todo seja o objetivo, os mapas de ordens da reamostragem mostram-se adequados para isso, mas o preço necessário para esta análise está no tempo requerido pelo processo e a memória disponível para executar todas as operações. Contudo, se a meta está apenas na amplitude individual de cada ordem, então é possível obter uma análise rápida e precisa pela TVDFT/ OCM.

Vale ressaltar que a *Order Tracking Computacional* surgiu em um momento em que os processadores eram demasiadamente lentos e a quantidade de memória, restrita. Isto justifica a implementação de um algoritmo com poucos cálculos e com um modelo restrito. Contudo, atualmente este problema é secundário já que existem microcomputadores com capacidade muito maior que naquela época. Sendo assim, entende-se que o algoritmo da Reamostragem Digital é uma metodologia mais adequada para os processadores atuais.

A seguir, apresenta-se uma comparação dos três métodos no que diz respeito ao tempo de processamento e erros devido ao *aliasing*.

Tempo de processamento

Os métodos de reamostragem apresentam tempos de processamento muito próximos, e são mais pesados que a TVDFT. Na Tabela 5.1, apresentam-se os tempos requeridos para processar 50.000 pontos mantendo-se a mesma resolução em ordem para os três métodos e utilizando 40 raias no eixo da rotação. O microcomputador utilizado é um Pentium 3, de 768 MB de memória RAM e processador de 1,1 GHz. O aumento do número de pontos faz com que a diferença de tempo entre os métodos da reamostragem e da TVDFT aumente.

Tabela 5.1: Tempo de processamento dos métodos de *Order Tracking* para uma determinada resolução em ordem.

	Tempo [s]	Bloco	Overlap
OTC	309	40 pontos	28%
Reamostragem Digital	314	40 pontos	29%
TVDFT	263	39 revoluções	5%

Erros de aliasing

No processo de conversão do domínio do tempo para o angular pode ocorrer o problema de *aliasing*, que pode ser de dois tipos: um devido a ordens acima da taxa de reamostragem – por exemplo, se a amostragem máxima permite que sejam seguidas ordens até a décima componente, qualquer outro de valor acima deste provoca o erro, semelhante ao que ocorre na frequência no domínio temporal; o outro tipo de erro de *aliasing* está associado às ordens, na subida da rotação, que atingem frequências acima da taxa de amostragem temporal.

Na simulação, do sinal de várias componentes com frequência variável, substitui-se a ordem 5,5 pela ordem 12, e reamostra-se até a décima ordem. O resultado está na Figura 5.17, para o método da *Order Tracking Computacional*, e na Figura 5.18, para a Reamostragem Digital. Os dois mapas têm 400 pontos por bloco, precisão em ordem de 0,05 e *overlap* de 13%. A componente de ordem 12, que não pertence ao intervalo reamostrado (de 0 a 10), gera uma

componente em 8, o qual não estava presente no sinal original. Este erro em ordem ocorre sempre que a taxa de reamostragem (domínio angular) for inferior a alguma componente em ordem. Este tipo de erro não é verificado no método da TVDFT por não utilizar o processo de reamostragem. No caso de restringir a ordem máxima para 10, a componente de décima segunda ordem não aparece no mapa, como ilustra a Figura 5.19. Este mapa de ordens foi obtido com blocos de 39 revoluções, *overlap* de 5% e janela Hanning.

O procedimento utilizado nos métodos comerciais para eliminar o *aliasing* consiste em filtrar até uma ordem de interesse, que esteja dentro da faixa da taxa de reamostragem. Isto é possível visto que o erro é gerado numericamente durante a reamostragem e não provém do sinal adquirido. Os mapas de ordem da OTC e Reamostragem Digital com filtro *anti-aliasing* na quinta ordem são apresentados nas Figuras 5.20 e 5.21, respectivamente. A componente virtual na oitava ordem é eliminada pelo filtro, entretanto, no início da Reamostragem Digital não se usou a filtragem porque, para frequência fundamental muito baixa, a frequência de amostragem é inferior à frequência de corte do filtro (a maior discretização em tempo do bloco está acima da metade da discretização do sinal), impossibilitando a aplicação do filtro digital. Este fato surge devido à amostragem não regular em tempo (amostragem síncrona), cujo intervalo de tempo é maior em velocidade baixa do que em altas rotações.

O filtro *anti-aliasing* usado, nos métodos baseados na reamostragem, são filtros digitais passa-baixa de frequência de corte constante, mas que varia de bloco em bloco. Neste trabalho utiliza-se um filtro de Resposta ao Impulso Infinito (IIR) Chebyshev de terceira ordem.

O segundo tipo de *aliasing* ocorre quando a frequência correspondente a uma das ordens ultrapassa a frequência de amostragem no domínio do tempo. Por exemplo, para o mesmo sinal com componentes de ordem 1, 3, 4 e 5,5 com taxa de amostragem em 1000 Hz a partir de aproximadamente 4000 rpm (frequência fundamental de 67 Hz) surgem linhas espectrais de ordem correspondente à ordem 5,5 (~370 Hz), as quais diminuem assintoticamente com o aumento da rotação (Figura 5.22, 5.23 e 5.24, respectivamente, para a OTC, Reamostragem Digital e TVDFT). O mesmo ocorre para as outras ordens em rotações maiores. Essas componentes são o efeito de *aliasing* por causa da taxa de amostragem temporal e não podem ser eliminadas por filtragem, sendo a solução aumentar a taxa de amostragem da aquisição.

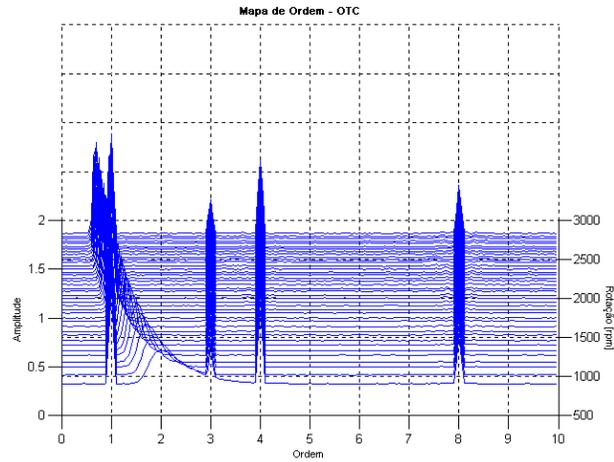


Figura 5.17: Mapa de ordem pelo método da OTC.

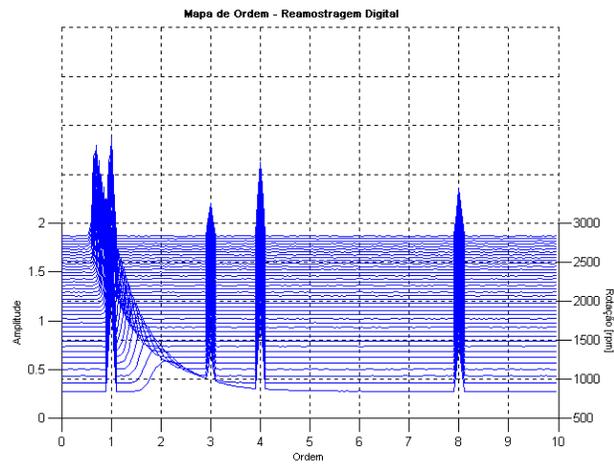


Figura 5.18: Mapa de ordem pelo método da Reamostragem Digital.

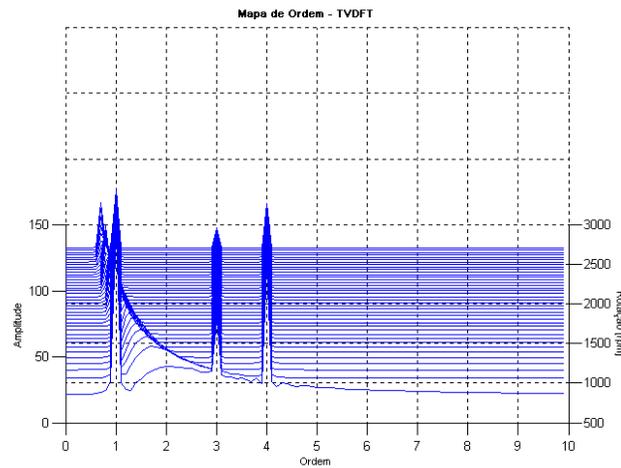


Figura 5.19: Mapa de ordem pelo método da TVDFT.

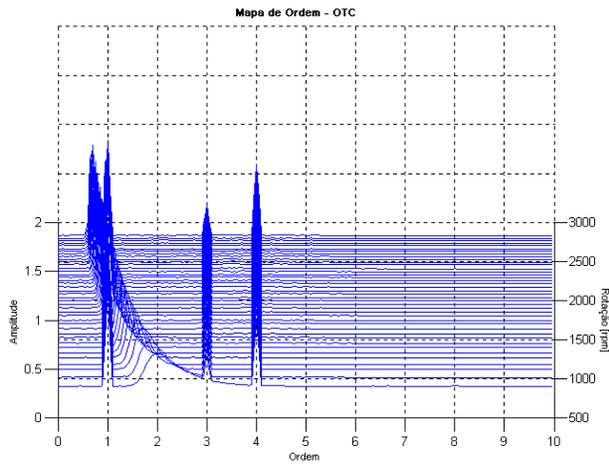


Figura 5.20: Mapa de ordem obtido pelo método da *Order Tracking Computacional* com blocos de 400 pontos, *overlap* de 13%, janela Hanning e com filtro *anti-aliasing*.

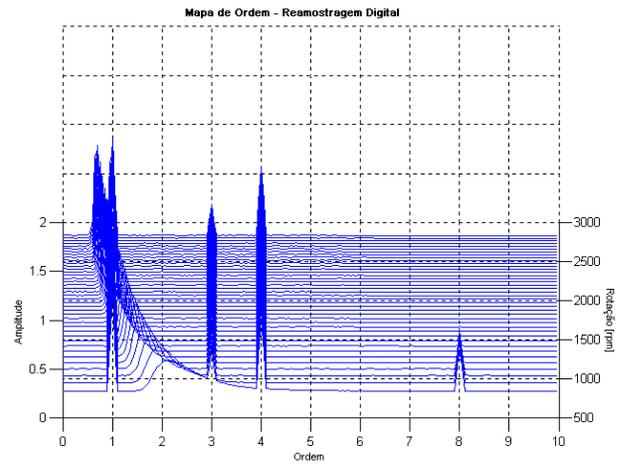


Figura 5.21: Mapa de ordem obtido pelo método da Reamostragem Digital com blocos de 400 pontos, *overlap* de 13%, janela Hanning e filtro *anti-aliasing*.

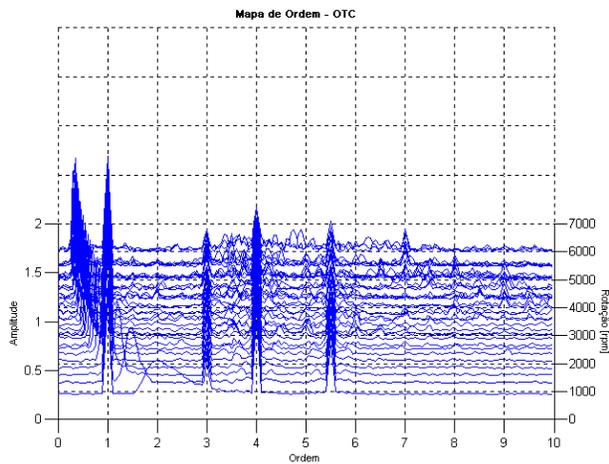


Figura 5.22: Mapa de ordem obtido pelo método da OTC com blocos de 400 pontos, *overlap* de 60% e janela Hanning.

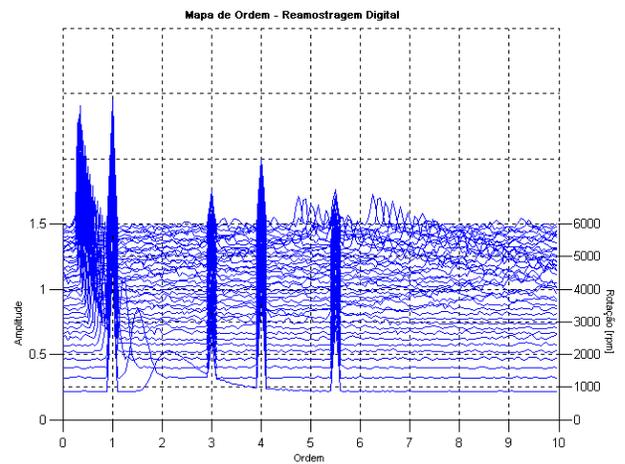


Figura 5.23: Mapa de ordem obtido pelo método da Reamostragem Digital com blocos de 400 pontos, *overlap* de 60% e janela Hanning.

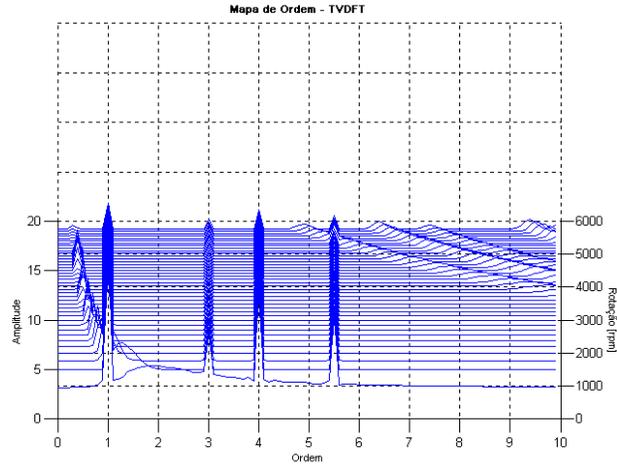


Figura 5.24: Mapa de ordem pelo método da TVDFT com blocos de 49 revoluções, *overlap* de 29% e janela Hanning.

5.2. Simulação de um rotor de Laval

De forma a observar o comportamento dos métodos aplicados a diferentes condições de operação e configurações de parâmetros, simulou-se a resposta temporal de um rotor de Laval, de 2 graus de liberdade, excitado pela força de desbalanço. O equacionamento é a mesmo apresentado por Lalanne (1990). Considerou-se que o rotor partia do repouso com aceleração angular constante até uma velocidade de rotação acima da frequência natural do sistema. A equação de movimento deste sistema é dada por:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_{xx}\dot{x} + k_{xx}x = m_e \cdot \varepsilon (\dot{\theta}^2 \cdot \cos(\theta) + \ddot{\theta} \cdot \sin(\theta)) \\ m\ddot{y} + c_{yy}\dot{y} + k_{yy}y = m_e \cdot \varepsilon (\dot{\theta}^2 \cdot \sin(\theta) - \ddot{\theta} \cdot \cos(\theta)) \end{cases} \quad (5.3)$$

sendo que a massa do rotor está representada por m , a massa de desbalanço e excentricidade, por m_e e ε , respectivamente. A rigidez e amortecimento do sistema apresentam-se por k_{xx} , k_{yy} , c_{xx} e c_{yy} (neste caso não são usados os termos cruzados, k_{xy} , k_{yx} , c_{xy} e c_{yx}).

Os termos do lado direito da equação (5.3) dependem da posição angular (θ), da velocidade de rotação ($\dot{\theta}$) e da aceleração do eixo ($\ddot{\theta}$), cujos valores podem ser obtidos pela equação (5.4), dado o valor da aceleração constante, α , e considerando condições iniciais nulas:

$$\theta = \frac{\alpha.t^2}{2}; \quad \dot{\theta} = \alpha.t \quad e \quad \ddot{\theta} = \alpha. \quad (5.4)$$

Utilizando-se o integrador numérico do *Matlab*[®], obtém-se a resposta temporal, em deslocamento, da equação de movimento (5.3). Estes resultados, juntamente com a posição angular obtida da equação (5.4), são utilizadas como entradas nos métodos de *Order Tracking*. Os parâmetros utilizados nesta simulação foram: $m = 1 \text{ kg}$, $m_e = 0,08 \text{ kg}$, $\varepsilon = 0,1 \text{ mm}$, $k_{xx} = k_{yy} = 22.500 \text{ N/m}$, $c_{xx} = c_{yy} = 0,3 \text{ Ns/m}$. Os resultados da simulação estão apresentados na Figura 5.25.

A velocidade, indicada abaixo de cada curva de vibração, inicia-se em zero com aceleração constante de 40 rad/s^2 . O aumento da amplitude de vibração ocorre quando o sistema se aproxima da frequência natural em $23,87 \text{ Hz}$. A taxa de amostragem da simulação é de 1000 Hz . Os diagramas em cascata correspondentes aos sinais de vibração nas direções x e y respectivamente estão apresentados nas Figuras 5.26.

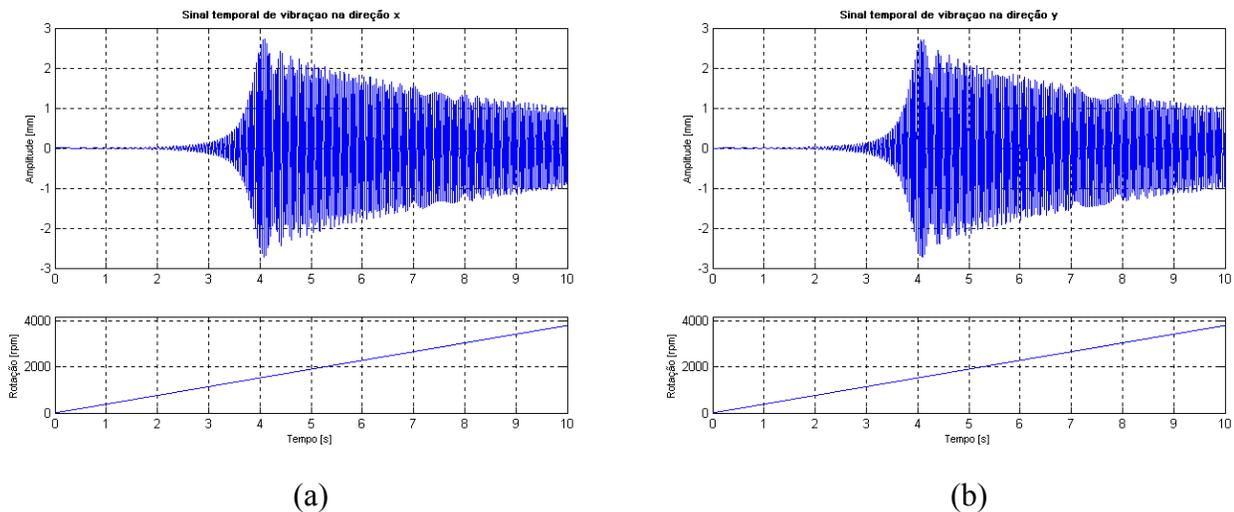


Figura 5.25: Resposta temporal do rotor isotrópico nas direções (a) x e (b) y com aceleração constante de 40 rad/s^2 passando pela frequência natural de $23,87 \text{ Hz}$.

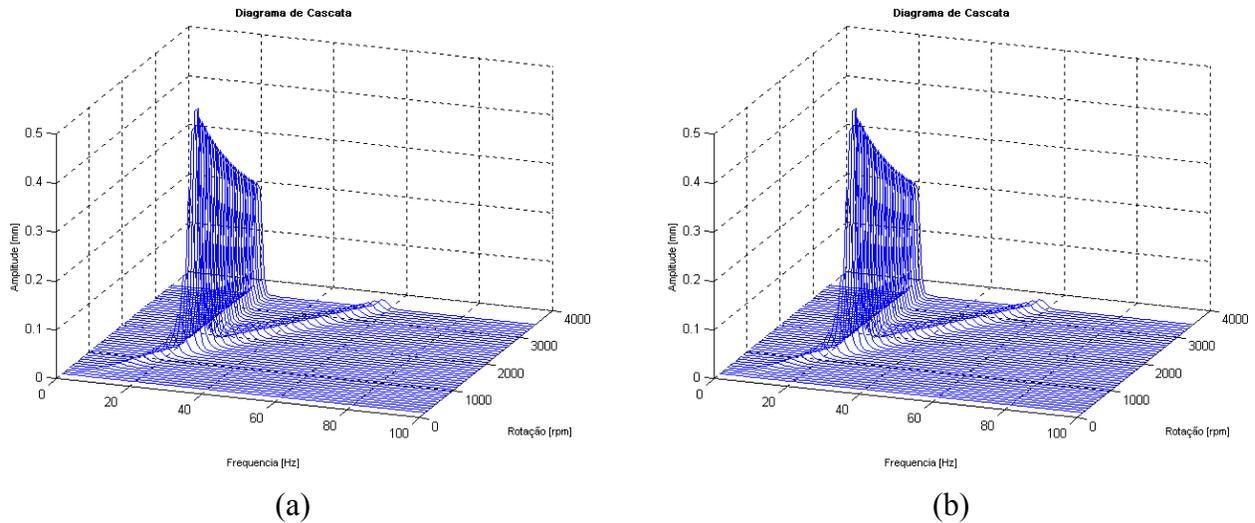


Figura 5.26: Diagrama em Cascata das direções (a) x e (b) y com blocos de 1024 pontos *overlap* de 20% e janela Hanning.

Os mapas de ordem da Figuras 5.27 e 5.29, obtidos da Reamostragem Digital, utilizam 20 pontos interpolados por volta com resolução de 0,05 e ordem máxima de 10, cada bloco tem 400 pontos do sinal reamostrado. O sinal temporal é tratado com janela Hanning e filtrado por um filtro passa-baixa de cinco vezes a rotação máxima de cada bloco, respectivamente, para reduzir os erros de *leakage* e *aliasing*. Os mesmos sinais usados na Reamostragem Digital, agora analisados pelo método da TVDFT, geram os mapas da Figuras 5.31 e 5.33. O número de revoluções por bloco é de 13 voltas com 0,01 de precisão e ordem máxima de 10. O tratamento dos blocos no tempo é feito com a janela Hanning.

Em ambos os métodos nota-se que há dois conjuntos de picos que se desenvolvem com o aumento da rotação: uma delas representa a freqüência natural – relacionada com o transiente –, e a outra representa a primeira ordem do sistema – força de desbalanço. A freqüência natural, de maior intensidade, segue o mesmo comportamento da amplitude no tempo, e como verificado nos testes com freqüência constante, esta diminui assintoticamente no domínio da ordem com o aumento linear da velocidade de rotação. Já o termo da ordem, que segue constante na primeira ordem, é um valor menor com um sobressalto da amplitude no cruzamento com a freqüência natural.

A separação das ordens nos mapas permite que sejam visualizados termos referentes a um transiente e outras relacionadas diretamente com a rotação. Nas Figuras 5.28 e 5.30 mostra-se a

amplitude/fase desta componente relacionada com a rotação nas direções x e y, respectivamente, obtida pela Reamostragem Digital. A amplitude/ fase da primeira ordem obtida através da TVDFT, nas duas direções, está apresentada nas Figuras 5.32 e 5.34. As curvas das duas direções aparentam as mesmas características pelo fato do rotor ser isotrópico, ou seja, as respostas no tempo das duas direções são exatamente iguais.

A amplitude da ordem mantém-se aproximadamente constante com a rotação, tendo um valor de pico no momento em que cruza a frequência natural. Neste instante, a fase, que é constante, inverte de π radianos e segue aproximadamente constante. Esse é o mesmo efeito na fase de uma curva espectral em frequência quando passa por uma frequência natural. Também verifica-se que a fase do sinal na direção y está defasada de $\frac{\pi}{2}$ radianos em relação à direção x. Isto ocorre porquê as medições são feitas em direções ortogonais (deslocadas de 90°). A estimativa que se faz da fase pela reamostragem e TVDFT aparecem com inversão de fase em sentido contrário, a primeira muda de $-\pi$ radianos, enquanto que na outra de $+\pi$ radianos.

5.2.1. Comprimento dos blocos

A escolha do valor a ser usado tanto do número de pontos como de revoluções depende da exatidão com que o usuário requer as curvas para análise, e também do total de pontos disponíveis para processar. No caso de usar blocos muito extensos, mas com taxa de amostragem baixa ou sinais de curta duração, a quantidade de blocos fica reduzida, diminuindo a resolução das curvas de amplitude/ fase em função da rotação, mesmo usando o recurso do *overlap*.

A variação do número de pontos usada em cada bloco influi diretamente no resultado da amplitude da ordem. À medida que se usa um maior número de pontos, tomam-se maiores variações de amplitude, o que provoca uma diminuição da amplitude da ordem, como verificado nas Figura 5.35(a) e (b). Na fase não há variações, além da mudança do valor da rotação média devido a diferentes blocos usados.

Como o número de pontos da TVDFT de cada bloco é variável, a análise é feita sobre o número de revoluções. Do mesmo modo que ocorre com a reamostragem em número de pontos, o aumento da faixa de tempo dos blocos (quanto maior a revolução maior o tempo) gera uma queda de amplitude por causa da variação no sinal temporal, como mostra as Figuras 5.36(a), (b) e (c). Além disso, ocorre um deslocamento do pico em relação ao eixo da rotação, aumentado a

freqüência do pico conforme se aumenta o número de revoluções por bloco. Este valor não é exatamente a freqüência natural, pois é apenas a média da velocidade do bloco analisado.

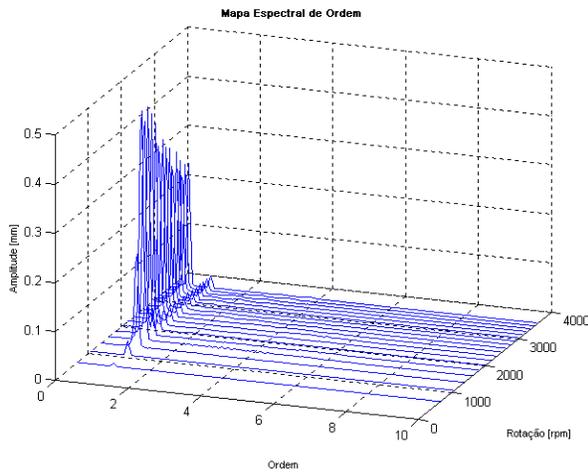


Figura 5.27: Mapa de ordem da direção x pelo método da Reamostragem Digital com blocos de 400 pontos *overlap* de 80% janela Hanning e filtro anti-aliasing até a quinta ordem.

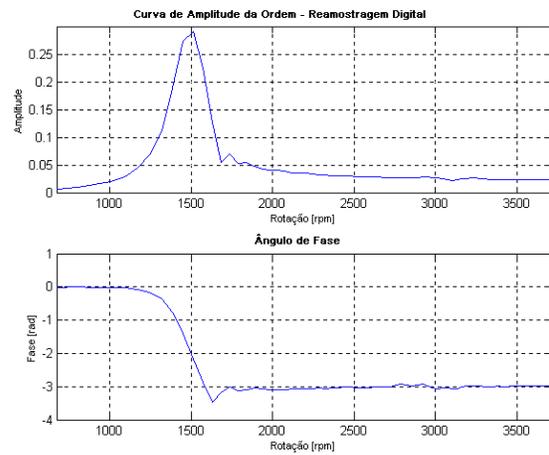


Figura 5.28: Amplitude e fase da primeira ordem pela Reamostragem Digital do rotor isotrópico na direção x.

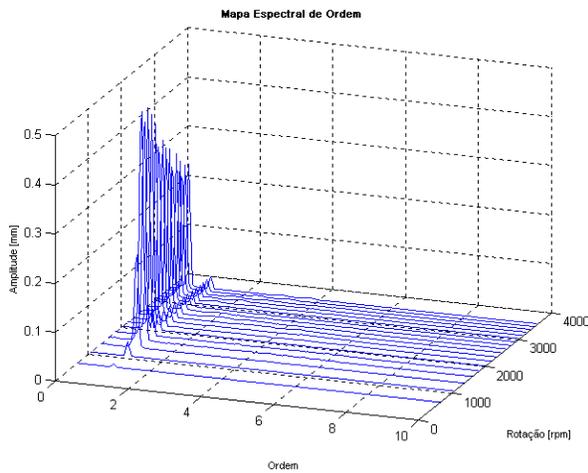


Figura 5.29: Mapa de ordem da direção y pelo método da Reamostragem Digital com blocos de 400 pontos *overlap* de 80% janela Hanning e filtro anti-aliasing até a quinta ordem.

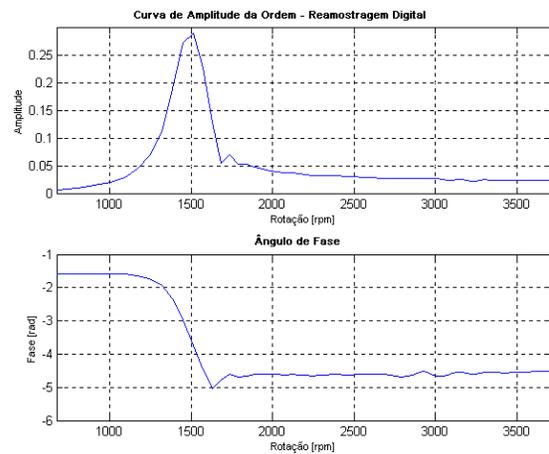


Figura 5.30: Amplitude e fase da primeira ordem pela Reamostragem Digital do rotor isotrópico na direção y.

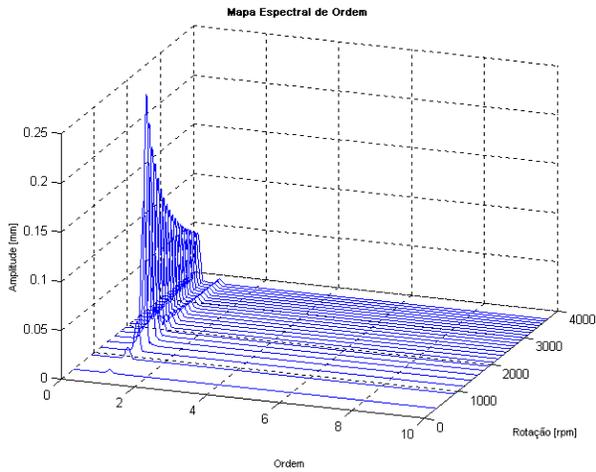


Figura 5.31: Mapa de ordem da direção x pelo método de TVDFT com revolução de 13 voltas e janela Hanning.

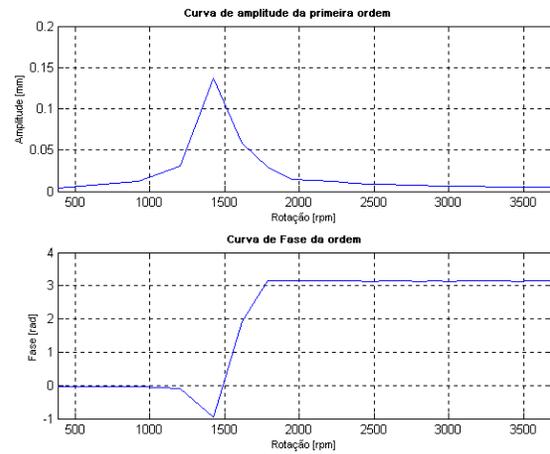


Figura 5.32: Amplitude e fase da primeira ordem por TVDFT do rotor isotrópico na direção x.

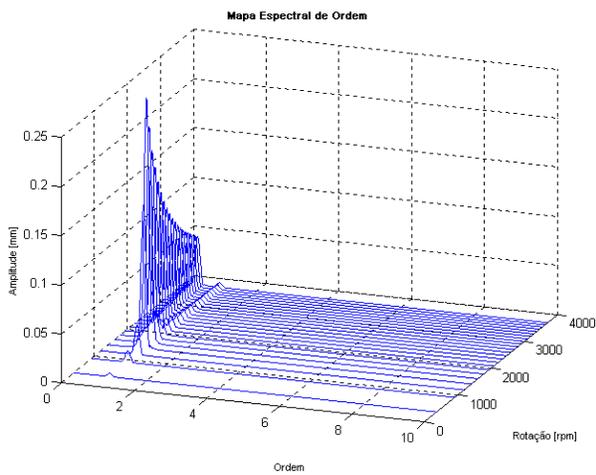


Figura 5.33: Mapa de ordem da direção y pelo método de TVDFT com revolução de 13 voltas e janela Hanning.

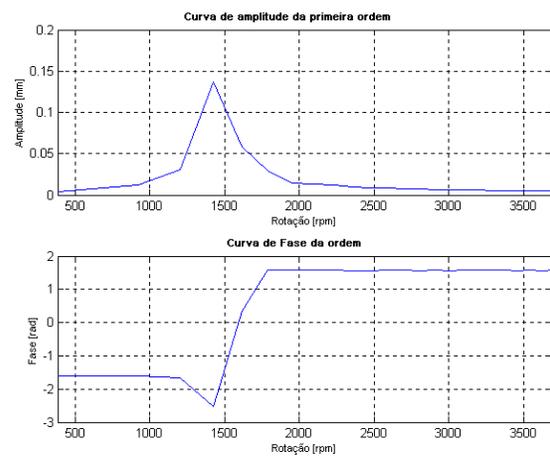
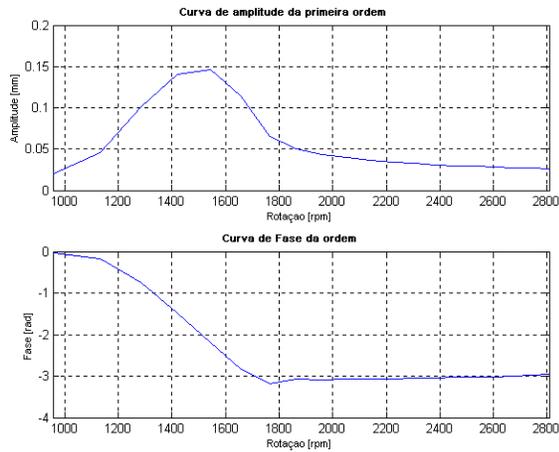
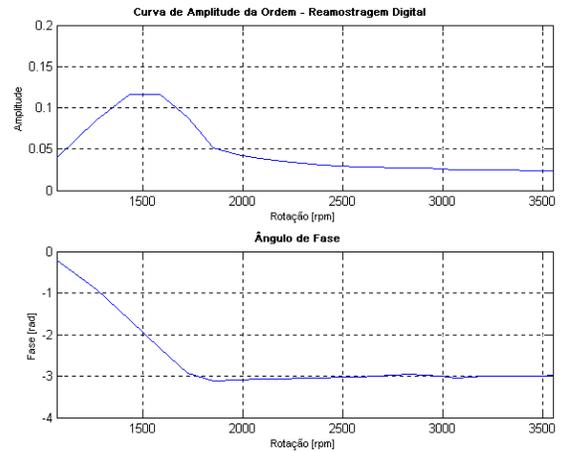


Figura 5.34: Amplitude e fase da primeira ordem por TVDFT do rotor isotrópico na direção y.

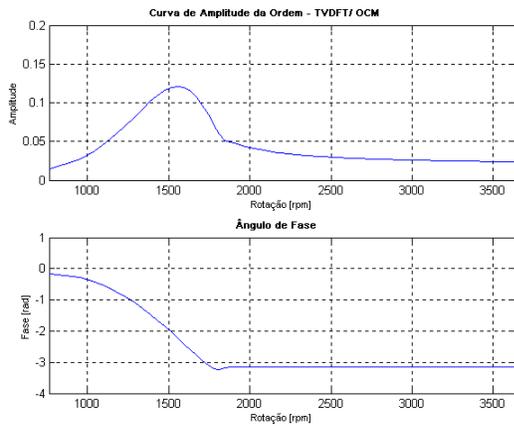


(a)

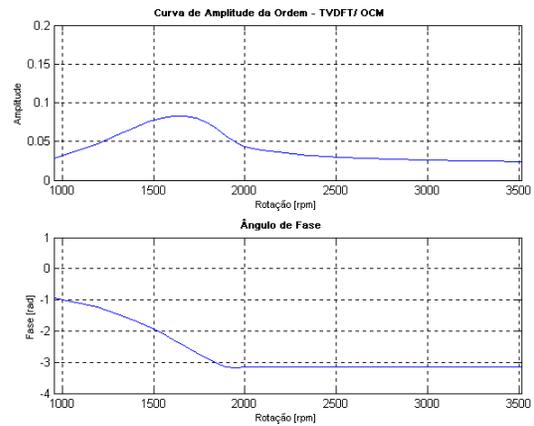


(b)

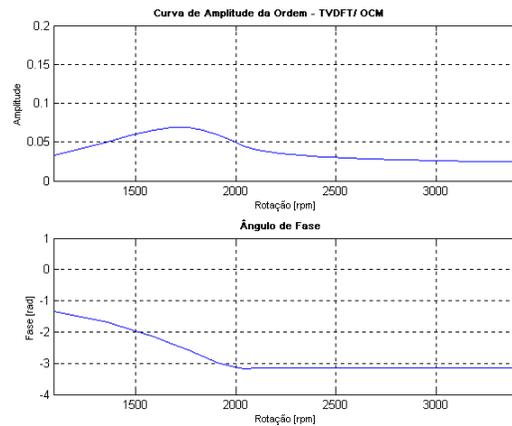
Figura 5.35: Amplitude e fase da primeira ordem pela Reamostragem Digital, na direção x, com (a) 800 e (b) 1000 pontos por bloco.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.36: Amplitude e fase da primeira ordem obtida pela TVDFT, na direção x, com (a) 20, (b) 31 e (c) 41 revoluções.

5.2.2. Efeito de *Leakage*

Nos métodos de *Order Tracking*, semelhante aos problemas da FFT na relação tempo/freqüência, um número incompleto de ciclos no bloco provoca o efeito de “vazamento” da energia de um pico para as raias ao redor da ordem (*leakage*). A reamostragem trabalha com um número de pontos constante por revolução, portanto, se o número de pontos do bloco for proporcional a este valor, é garantido um número completo de voltas, o que evitaria o *leakage*. Porém, a análise de sinais pode trazer consigo ordens não inteiras, provocando o erro nestas componentes. Assim como na TVDFT, que trabalha com um número de revoluções constante por bloco, pode haver *leakage* das ordens não inteiras. A recomendação para reduzir o erro é através de janelas temporais, as mesmas utilizadas em processamento de sinais estacionários (Hanning, Hamming, Flat Top, etc). Neste trabalho, utiliza-se a janela Hanning.

Mesmo para um sinal de uma única ordem, a primeira, o efeito de *leakage* pode ser percebido quando se compara as Figuras 5.37(a) e (b), com e sem tratamento da janela Hanning, respectivamente. Apesar da ordem estar nas linhas espectrais, a freqüência natural não necessariamente está, provocando o espalhamento de sua energia sobre a ordem seguida e conseqüentemente, sendo a causa da irregularidade da amplitude.

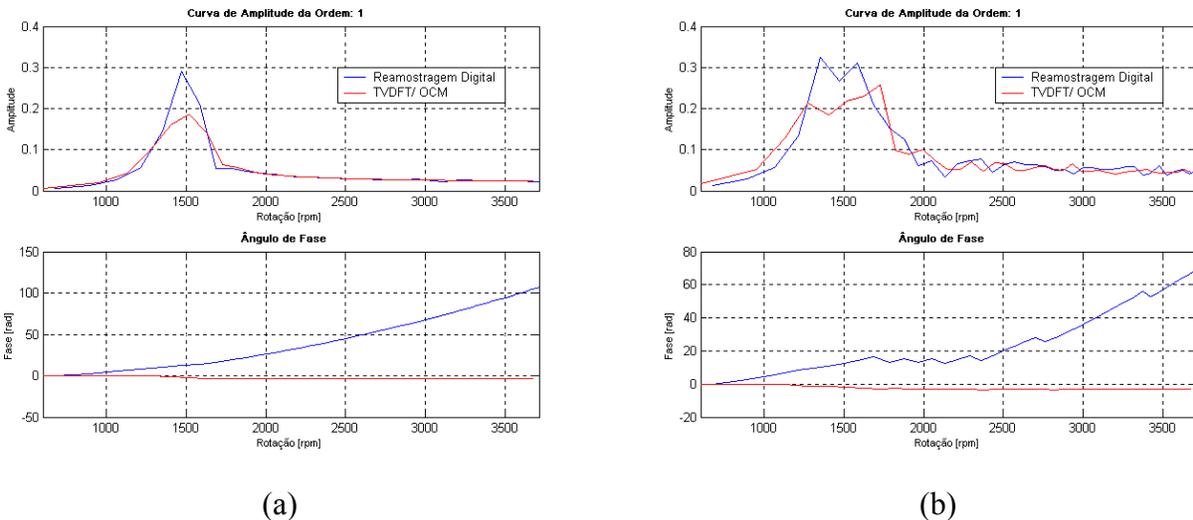


Figura 5.37: Amplitude e fase obtidas pela Reamostragem Digital e TVDFT (a) com janela Hanning e (b) sem janela.

5.2.3. Variação de rotação em rotor anisotrópico

Utilizando a mesma formulação matemática de rotor apresentada na equação de movimento (5.3), foi realizada a simulação de um rotor anisotrópico com os seguintes parâmetros: $m = 1 \text{ kg}$, $m_e = 0,08 \text{ kg}$, $\varepsilon = 0,1 \text{ mm}$, $k_{xx} = 22.500 \text{ N/m}$, $k_{yy} = 4.000 \text{ N/m}$, $c_{xx} = c_{yy} = 0,5 \text{ Ns/m}$. Os resultados da simulação estão apresentados nas Figuras 5.38(a) e (b). O rotor parte do repouso com aceleração de 20 rad/s^2 até 10 segundos e desacelera na mesma taxa até atingir o repouso em um tempo total de 20 segundos. Neste processo, as frequências naturais (de $23,87 \text{ Hz}$ para a direção x e $10,06 \text{ Hz}$ para a direção y) nas duas direções são excitadas na aceleração e na desaceleração do rotor, como se observa nos diagramas em cascata das Figuras 5.39(a) e (b). A taxa de amostragem é de 1000 Hz .

As Figuras 40(a), 41(a), 42(a) e 5.43(a) mostram os mapas de ordem, nas direções x e y, obtidos pela Reamostragem Digital e pela TVDFT. No primeiro caso, utilizou-se janela Hanning, com 400 pontos por bloco e 25% de *overlap* e filtro *anti-aliasing* até a quinta ordem. Na TVDFT, foram usadas 25 revoluções por bloco e manteve-se a janela e o nível de *overlap*. A amplitude e fase da primeira ordem estão ilustradas nas Figuras 40(b) a 43(b).

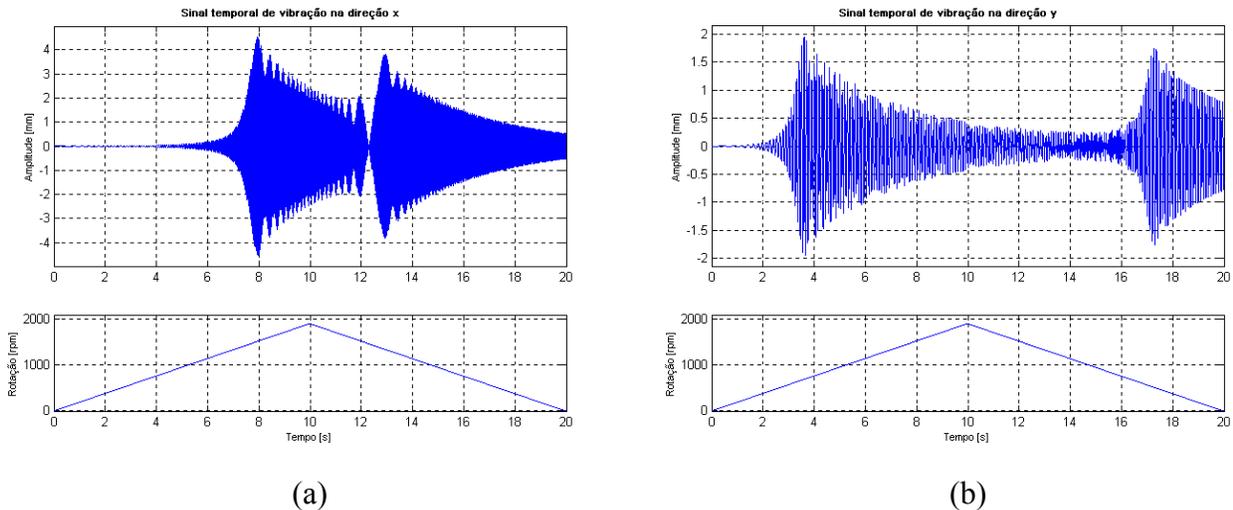
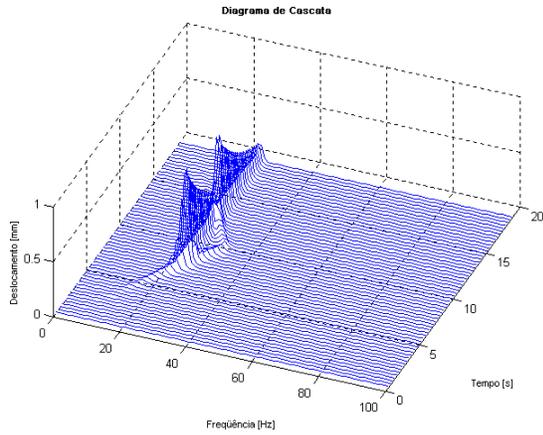
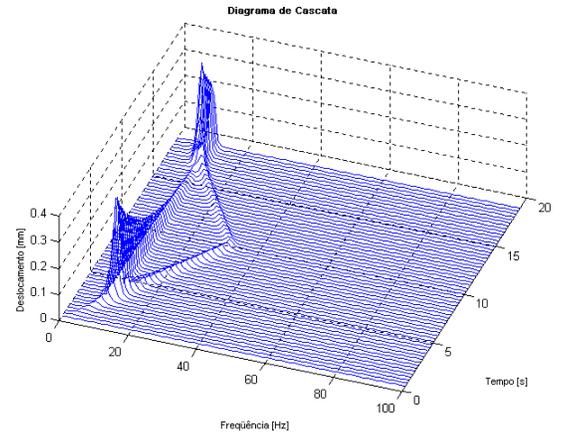


Figura 5.38: Resposta temporal do rotor anisotrópico com aceleração constante de 20 rad/s^2 . (a) direção x – frequência natural = $23,87 \text{ Hz}$ e (b) direção y – frequência natural = $10,06 \text{ Hz}$

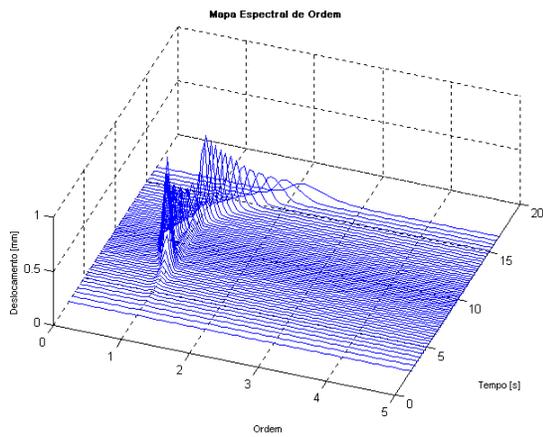


(a)

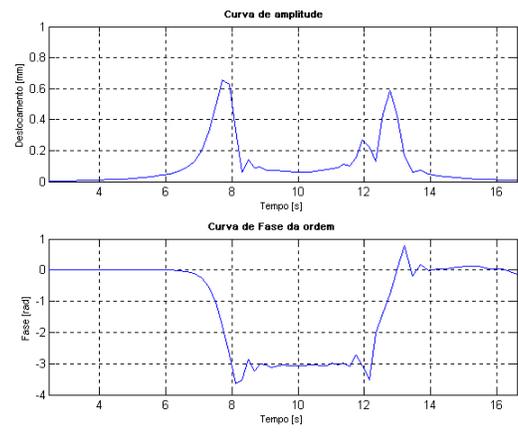


(b)

Figura 5.39: Diagrama em cascata nas direções (a) x e (b) y com blocos de 1024 pontos *overlap* de 30% e janela Hanning.

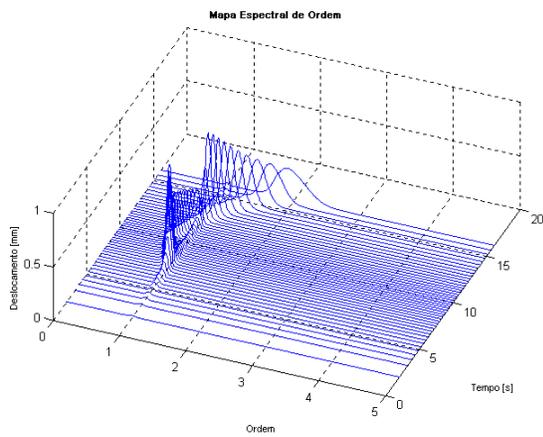


(a)

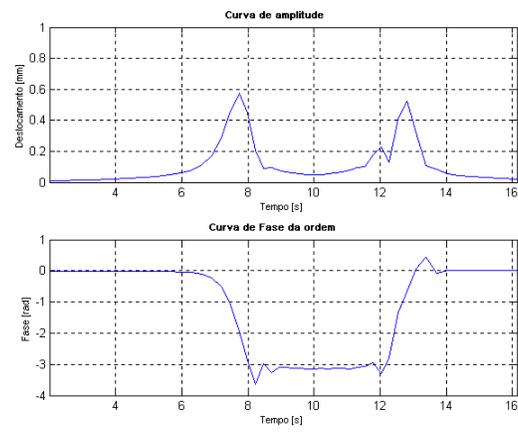


(b)

Figura 5.40: (a) Mapa de ordem do rotor anisotrópico e (b) amplitude e fase da primeira ordem, na direção x, obtida pela Reamostragem Digital com blocos de 400 pontos *overlap* 25% e filtro até a quinta ordem.

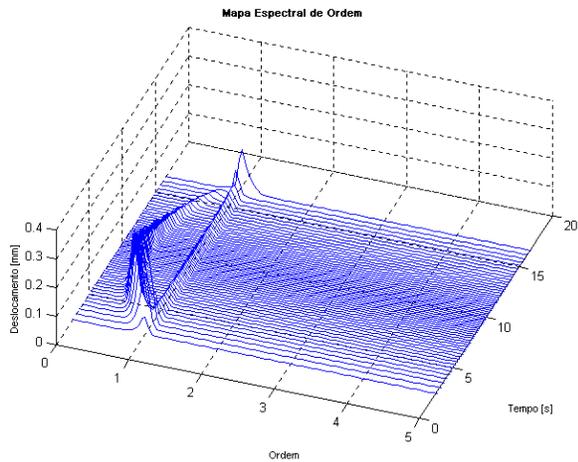


(a)

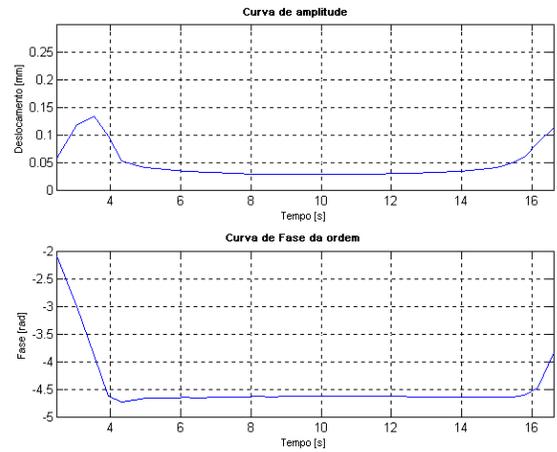


(b)

Figura 5.41: (a) Mapa de ordem do rotor anisotrópico e (b) amplitude e fase da primeira ordem, na direção x, obtida pela TVDFT com bloco de 25 voltas e *overlap* de 25% e janela Hanning.

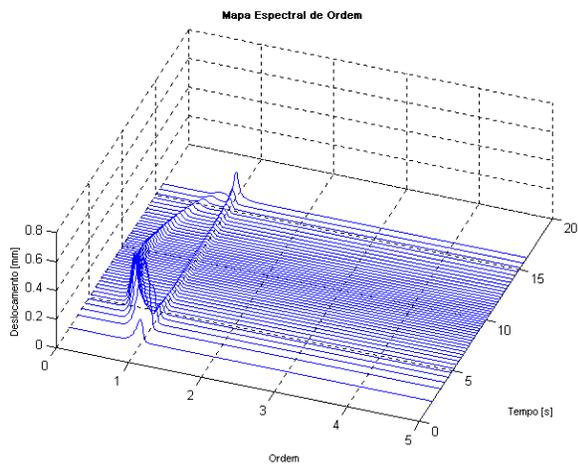


(a)

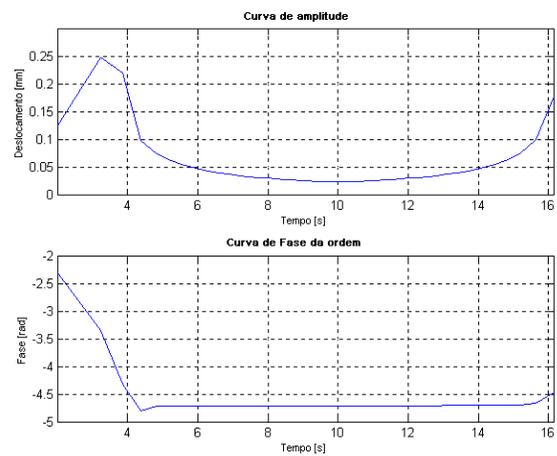


(b)

Figura 5.42: (a) Mapa de ordem do rotor anisotrópico e (b) amplitude e fase da primeira ordem, na direção y, obtida pela Reamostragem Digital com blocos de 400 pontos *overlap* 25% e filtro até a quinta ordem.



(a)



(b)

Figura 5.43: (a) Mapa de ordem do rotor anisotrópico e (b) amplitude e fase da primeira ordem, na direção y, obtida pela TVDFT com bloco de 25 voltas e *overlap* de 25% e janela Hanning.

Conforme verificados para o rotor isotrópico, os mapas separam a ordem gerada pelo desbalanço da parte transiente relacionada à frequência natural. Durante o aumento da velocidade de rotação, a frequência natural diminui no eixo da ordem assintoticamente, até que a velocidade volta a aumentar, juntamente com a frequência que se aproxima da primeira ordem. Na direção x, verifica-se que a frequência ultrapassa a ordem da rotação, provocando uma excitação no sistema e conseqüentemente um aumento na amplitude da frequência natural. Este efeito é verificado

fracamente na outra direção por causa do baixo valor da frequência, que cruza com a primeira ordem muito próximo do final da análise.

A amplitude da frequência segue a forma do sinal temporal, cujo valor máximo é atingido próximo a 3 segundos no caso da direção y, diminuindo em seguida e novamente aumentada após 17 segundos. Não apenas a frequência natural tende a acompanhar o contorno do sinal de vibração, mas como a própria ordem aumenta nos instantes de maior amplitude e diminui com a queda desse. A variação pode ser mais bem observada nas curvas de amplitude/ fase da primeira ordem. O mesmo tipo de comportamento pode ser observado na direção x com aumento de amplitude próximo de 7 e 12 segundos.

A fase estimada pelos métodos fornece o primeiro valor em x próximo de zero e depois $-\pi$ radianos após a passagem pela frequência natural do sistema. Na direção de y, a fase da reamostragem e na TVDFT inicia-se em $-\pi/2$ até $-3\pi/2$. A estimativa da fase pela reamostragem mostra-se muito próxima com o outro método de *Order Tracking*.

Os mapas são traçados em função do tempo médio de cada bloco, devido à variação da rotação. Caso contrário, haveria uma sobreposição das linhas de rotação do rotor acelerando com aquelas do rotor desacelerando. Mesmo com o tempo, nota-se, principalmente nas Figuras 5.41(a) e 5.43(a), uma visível aproximação das linhas em torno de 10 segundos (quando a rotação atinge o auge) em relação às linhas iniciais e finais.

5.2.4. Análise de sinais de precessão direta e retrógrada

Devido à ação da anisotropia juntamente com a excitação de desbalanço, a órbita do eixo/ rotor é elíptica, podendo ser de precessão direta (deslocamento angular no mesmo sentido da rotação) ou retrógrada (sentido contrário da rotação). O tipo de movimento é importante porque pode gerar esforços de tensão alternados a cada revolução do eixo na precessão retrógrada (*backward*), ocasionando fadiga prematura do sistema.

Nos trabalhos de Joh (1993) e Lee (1994), apresenta-se um procedimento para identificar a forma da precessão (direta ou retrógrada) e o momento em que surge. Neste sentido, os artigos utilizam um conceito de coordenada complexa, cuja idéia está em agrupar o deslocamento das

duas direções perpendiculares do rotor (x e y) em um único vetor complexo (z), como indicado na seguinte equação:

$$z(t) = x(t) + j.y(t). \quad (5.5)$$

Pode-se mostrar facilmente que quando a amplitude das componentes de frequência negativas da FFT do sinal $z(t)$ for maior que a amplitude das componentes de frequência positiva, então o movimento do rotor é de precessão retrógrada. Caso contrário, será de precessão direta. Maiores detalhes do equacionamento estão nos trabalhos de Joh (1993) e Lee (1994).

Da mesma forma, este conceito pode ser usado no domínio angular para indicar a característica do movimento de precessão do rotor em cada uma das ordens. A equação (5.5) pode ser escrita no domínio do ângulo da seguinte forma:

$$z(\theta) = x(\theta) + j.y(\theta). \quad (5.6)$$

Para obter o sinal $z(\theta)$, cada um dos sinais nas direções x e y do rotor é reamostrado para obter um sinal estacionário e, em seguida, monta-se o sinal complexo desejado.

A Figura 5.44(a) mostra o mapa de ordem, obtido pela Reamostragem Digital, da resposta complexa do rotor para as ordens positivas e negativas. Para verificar a direcionalidade da órbita compara-se a primeira ordem positiva com a negativa, como na Figura 5.44(b). Nos instantes em que a intensidade da componente positiva é maior que a da componente negativa ocorre um movimento de precessão direta, enquanto que a precessão retrógrada surge quando a componente negativa supera o valor da componente positiva. Esta situação é verificada entre cada uma das frequências naturais das duas direções, aproximadamente no intervalo de 4 a 7 segundos (durante o aumento da velocidade de rotação) e após 12 segundos (diminuição da velocidade). Nestes casos, a curva contínua (sem pontos) de precessão retrógrada tem amplitude maior que aquela com os pontos (precessão direta). A precessão direta ocorre antes da primeira e após a passagem pela segunda frequência natural.

Igualmente é possível usar o método da TVDFT para uma análise similar sem que os sinais necessitem ser reamostrados; a composição complexa é feita com os dados originais e em seguida

processada pelo algoritmo. Pela mesma relação indicada na equação (3.24), ao reescreve-la na forma complexa da soma das direções ortogonais de x e y , tem-se a equação (5.7):

$$Z(o_m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n.\Delta t) + j.y(n.\Delta t)). \exp\left(-j.2\pi.o_m.\int_0^{n.\Delta t} (\Delta t. \frac{Rpm}{60}) dt\right). \quad (5.7)$$

sendo que a amplitude de ordem é dada pela variável de Z , N é o número de pontos analisados, Rpm é a rotação do sistema e o_m é a ordem calculada. A discretização no tempo é Δt .

Observa-se, nos resultados da Figura 5.45(a) (mapa de ordem) e Figura 5.45(b) (amplitude/fase), resultados similares aos da Reamostragem Digital na estimativa da amplitude da ordem. Contudo, há uma grande diferença nas fases estimadas pelos dois métodos. Na reamostragem, a fase diverge ao longo da variação da rotação, enquanto que na TVDFT alterna de zero a $-\pi$ para a precessão direta e de zero a $+\pi$ na retrógrada, iniciando próximo de $-\pi$. Também ocorre na precessão direta uma dupla inversão de fase próximo da segunda frequência natural, tanto em subida como em descida da velocidade.

A vantagem da formulação complexa está na capacidade de analisar as diferentes informações contidas nas direções ortogonais em um único sinal, e pode ser útil na identificação de falhas em máquinas em componentes rotativos (Goldman, 1999).

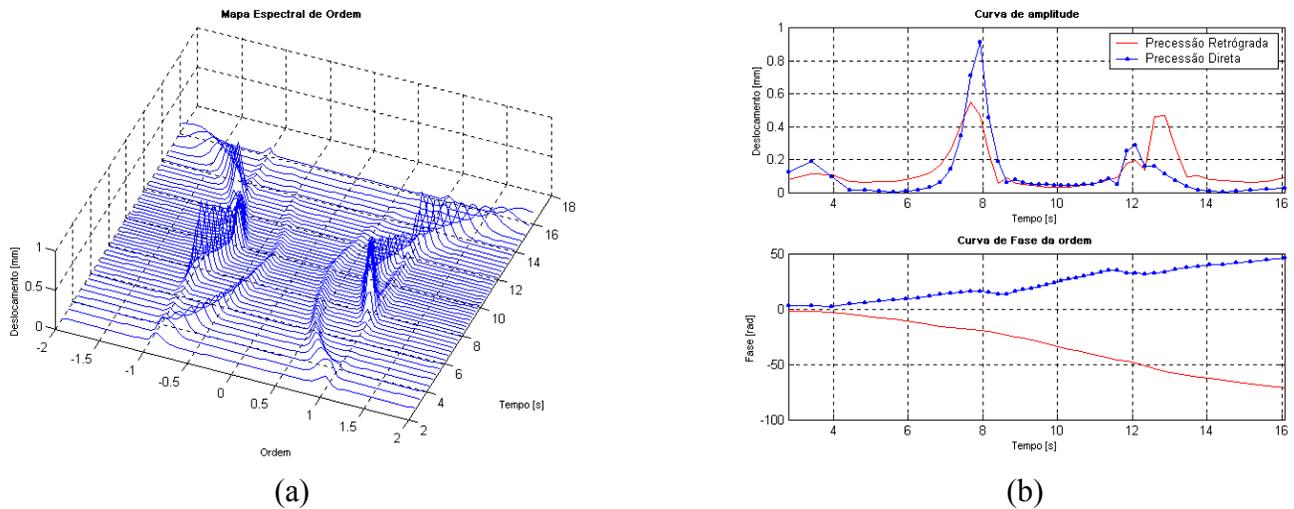


Figura 5.44: (a) Mapa de ordem do rotor anisotrópico e (b) amplitude e fase da primeira ordem, do sinal complexo, obtida pela reamostragem digital com blocos de 500 pontos *overlap* 25% janela Hanning.

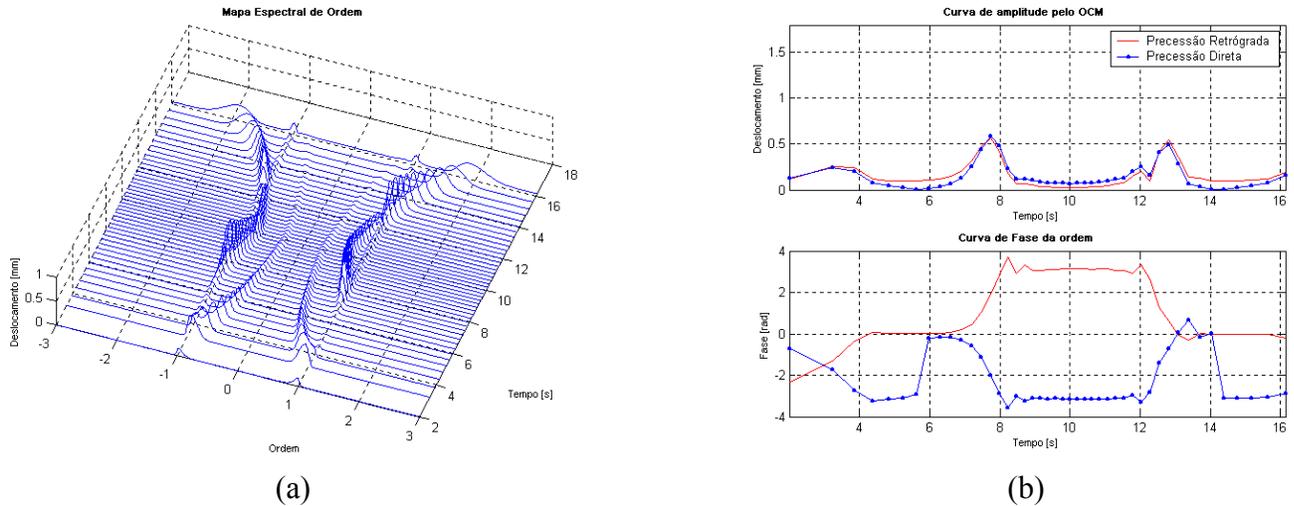


Figura 5.45: (a) Mapa de ordem do rotor anisotrópico e (b) amplitude e fase da primeira ordem, do sinal complexo, obtida pela TVDFT com bloco de 25 revoluções, *overlap* de 25% e janela Hanning.

5.3. Filtragem Adaptativa

5.3.1. Filtro de Kalman e Vold-Kalman

O filtro de Kalman é um método usado para extrair componentes no domínio do tempo que variam ou não com a rotação, podendo, portanto, isolar uma determinada ordem. Como nas técnicas de *Order Tracking*, é necessário estimar a velocidade de rotação do sistema, o qual é usado na formulação de Kalman pela solução de Mínimos Quadrados. O termo de rotação está na matriz a ser invertida, enquanto que o sinal do transdutor no vetor com o termo de HCF (*Harmonic Confidence Factor*), equação (4.8). Na Figura 5.46 mostra-se um diagrama de filtragem por Kalman, estimando a rotação pelo tacômetro e filtrando o sinal do transdutor para obter uma saída de única ordem.

Seguindo a mesma formulação do filtro de Kalman, o filtro de Vold-Kalman difere na equação da estrutura quanto à forma de seguir as componentes de ordem, com o uso de um termo exponencial. A matriz não mais carrega consigo os termos de rotação, que agora se encontram no vetor e integrados numericamente em deslocamentos angulares, além dos valores do sinal do transdutor. Este passo representa um deslocamento em frequência do histórico de tempo, colocando em fase com a rotação do sistema.

Programa Filtro Kalman

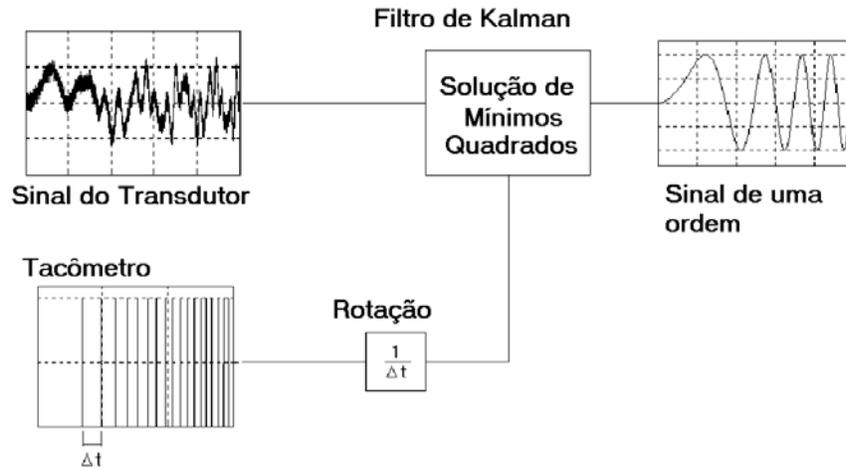


Figura 5.46: Diagrama do algoritmo de filtro de Kalman.

Uma vez determinada a solução de Mínimos Quadrados, retira-se o deslocamento em frequência, usando novamente a velocidade de rotação. Esta operação é denominada de remodulação do sinal. O sinal filtrado da ordem é a parte real da saída remodulada. Um fluxograma é traçado na Figura 5.47, que é semelhante ao filtro de Kalman, mas com uma passagem de remodulação logo após os cálculos de mínimos quadrados.

Programa Filtro Vold-Kalman

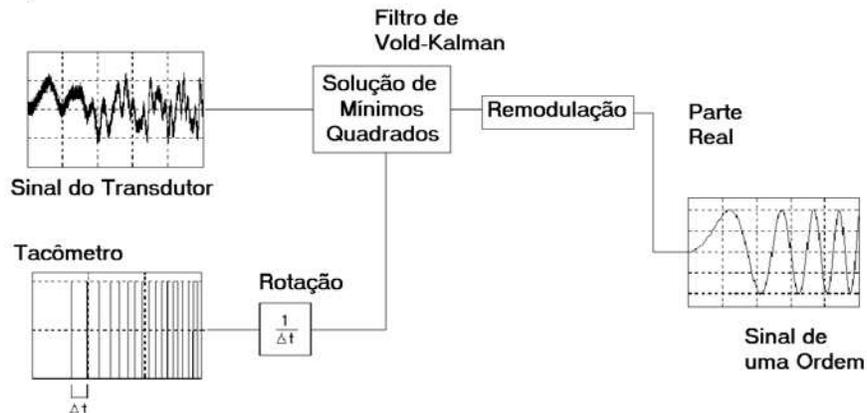


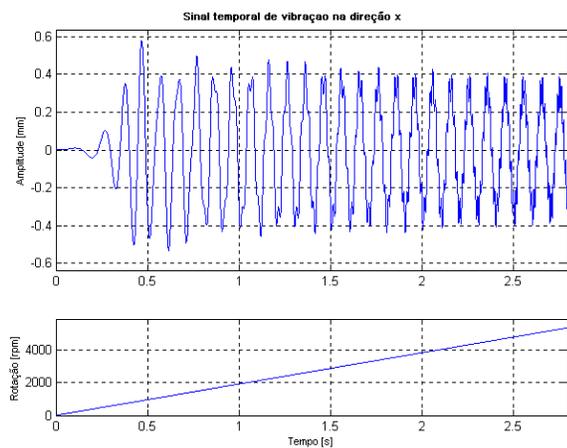
Figura 5.47: Diagrama do algoritmo de filtro de Vold-Kalman.

Harmonic Confidence Factor (HCF)

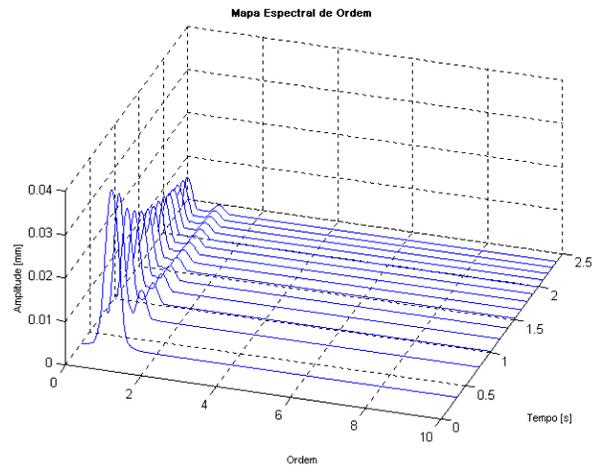
Como discutido no Capítulo 4, os filtros de Kalman requerem grande interação com o usuário, na forma do parâmetro HCF. Ainda não foi desenvolvida uma metodologia geral para determiná-lo, ou seja, dependendo de como o sinal evolui no tempo (rotação) é necessário usar diferentes valores de HCF. Como exemplo de sua influência sobre o sinal filtrado, simula-se a resposta de um rotor isotrópico de 0 a 3 segundos com aceleração de 200 rad/s^2 , sendo a frequência natural do sistema de $10,07 \text{ Hz}$, Figura 5.48(a). Os parâmetros usados são: massa do rotor igual a 1 kg , massa de desbalanceamento de $0,08 \text{ kg}$; excentricidade de $0,1 \text{ mm}$, coeficiente de amortecimento de $0,3 \text{ Ns/m}$ e rigidez de 4.000 N/m . O sinal é amostrado a 1000 Hz . O mapa de ordem é traçado na Figura 5.48(b), indicando uma componente na primeira ordem e uma outra da frequência natural.

A filtragem da primeira ordem com um filtro de Vold-Kalman de HCF igual a 100 resulta na Figura 5.49(a). O sinal extraído apresenta um aumento de amplitude em torno de 0,5 segundos devido a frequência natural e diminui em seguida, após o cruzamento. Com esse sinal, subtrai-se da resposta original a componente de primeira ordem, traçando o mapa de ordem da Figura 5.49(b). Nota-se que o filtro elimina completamente a ordem, não surgindo os picos de primeira ordem no mapa.

Quanto maior o valor do HCF mais lento torna-se o filtro e portanto, não acompanha mudanças bruscas de amplitude. Na Figura 5.50(a), Figura 5.51(a) e Figura 5.52(a), a ordem é extraída para HCF de 400, 800 e 1200. Imediatamente percebe-se que a partir de 400 o filtro já não acompanha mais a frequência natural, sua amplitude aparece atenuada em relação ao resultado de HCF 100. Nos mapas de ordem da Figura 5.50(b), Figura 5.51(b) e Figura 5.52(b) para a mesma seqüência de coeficientes HCF surgem, logo após o cruzamento com a frequência natural, picos atenuados da primeira ordem. Estes são resíduos gerados pelo fato do filtro ser um sistema mais lento do que o rotor, pelo menos ao redor da frequência natural, pois longe desta a ordem é novamente eliminada completamente. Não havendo uma forma de estimar ou calcular um HCF ideal para cada caso, o valor deve ser adotado pelo usuário de forma que atenda as suas necessidades. Neste caso, a sua experiência com o sistema estudado e com o próprio filtro tornam-se importantes para a análise. Não se apresentam os resultados da análise realizada com o filtro de Kalman por fornecerem resultados similares.

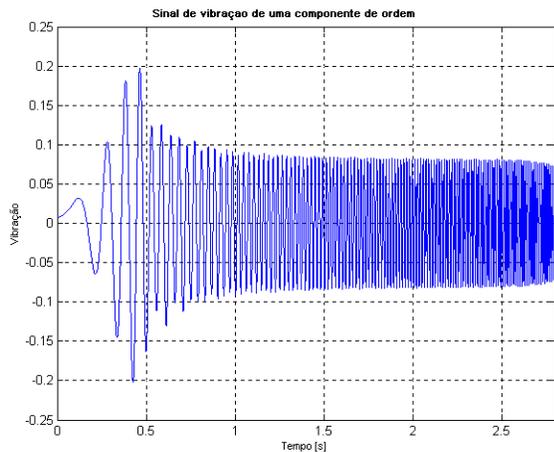


(a)

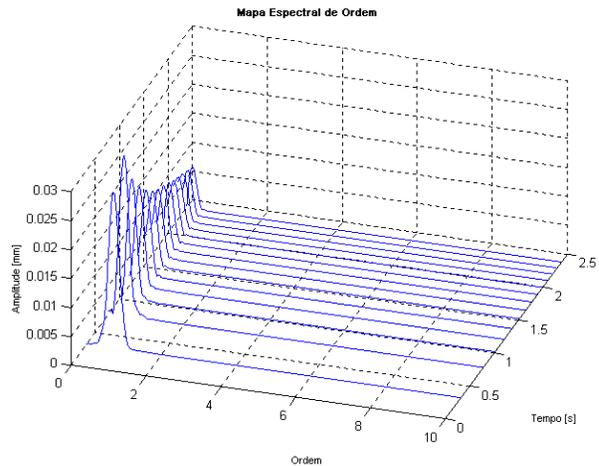


(b)

Figura 5.48: Rotor isotrópico na direção x com aceleração constante de 200 rad/s^2 passando pela frequência natural de $10,07 \text{ Hz}$. (a) resposta temporal e (b) mapa de ordem pelo método da TVDFT com 27 revoluções *overlap* de 25% e janela Hanning.

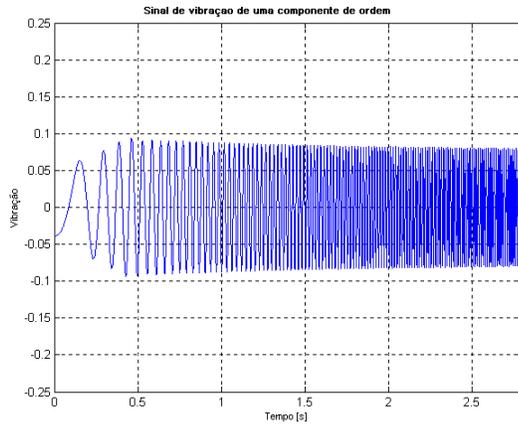


(a)

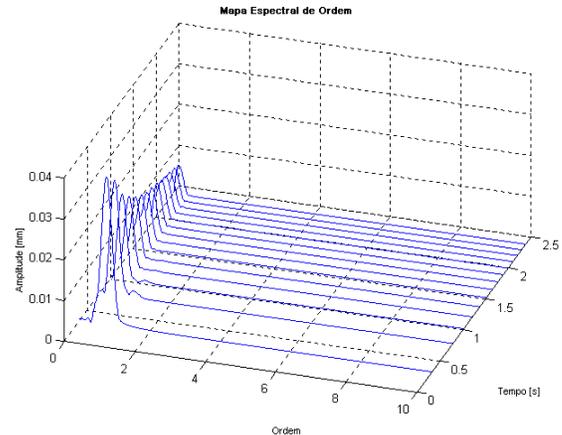


(b)

Figura 5.49: Rotor isotrópico na direção x com aceleração constante de 200 rad/s^2 passando pela frequência natural de $10,07 \text{ Hz}$ pelo filtro de Vold-Kalman com HCF de 100 na primeira ordem. (a) resposta filtrada e (b) mapa de ordem pelo método da TVDFT com 27 revoluções *overlap* de 25% e janela Hanning.

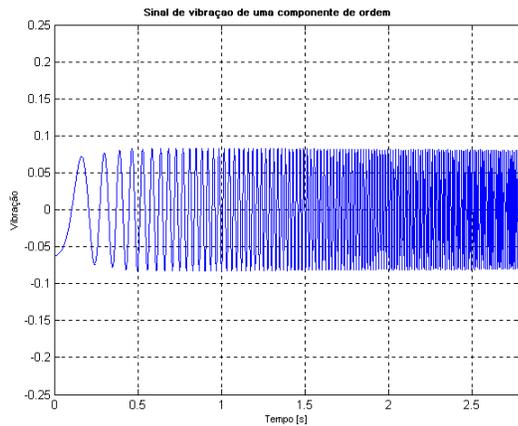


(a)

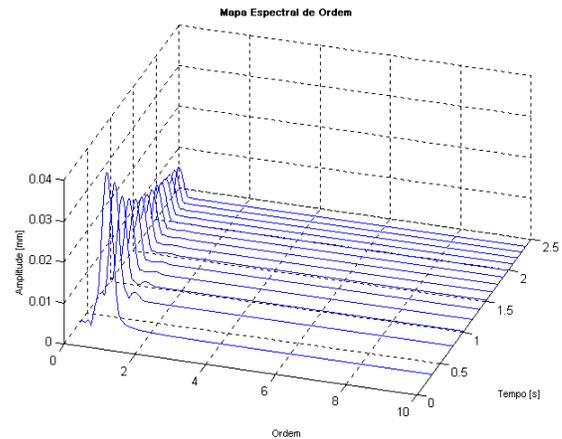


(b)

Figura 5.50: Rotor isotrópico na direção x pelo filtro de Vold-Kalman com HCF de 400 na primeira ordem. (a) resposta filtrada e (b) mapa de ordem pelo método da TVDFT.

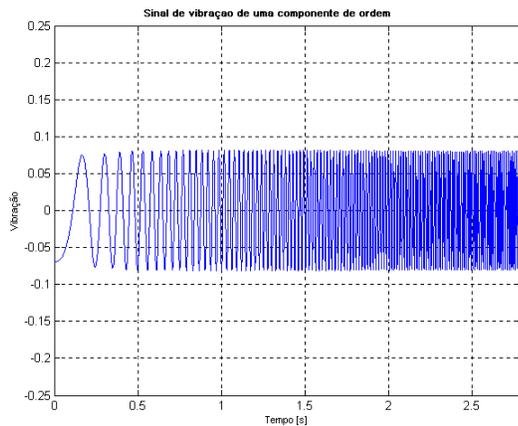


(a)

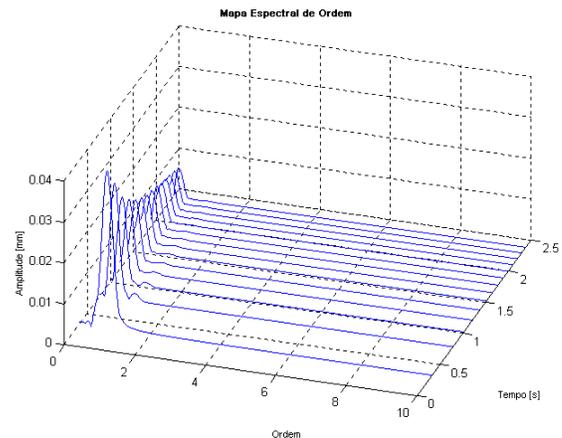


(b)

Figura 5.51: Rotor isotrópico na direção x pelo filtro de Vold-Kalman com HCF de 800 na primeira ordem. (a) resposta filtrada e (b) mapa de ordem pelo método da TVDFT.



(a)



(b)

Figura 5.52: Rotor isotrópico na direção x pelo filtro de Vold-Kalman com HCF de 1200 na primeira ordem. (a) resposta filtrada e (b) mapa de ordem pelo método da TVDFT.

5.4. Rotor com Múltiplas Ordens

A seguir, simula-se a resposta de um sistema de múltiplas ordens – 1, 1,2 e 2 –, geradas pela integração numérica das equações de um rotor isotrópico excitado por forças proporcionais a rotação. Considera-se a aceleração do rotor constante e igual a 20 rad/s² a partir do repouso até 20 segundos, e a frequência natural do sistema é de 50,0 Hz. A excentricidade para cada ordem é diferenciada para obter diferentes amplitudes: na primeira ordem usa-se 1 mm; 75% deste valor na ordem 1,2 e 50% na segunda ordem. O sistema usado na integração numérica para a direção x é descrito pela equação:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 + c_{xx}\dot{x}_1 + k_{xx}x_1 = m_e \cdot \varepsilon_1 (\dot{\theta}^2 \cdot \cos(\theta) + \ddot{\theta} \cdot \text{sen}(\theta)) \\ m\ddot{x}_{1,2} + c_{xx}\dot{x}_{1,2} + k_{xx}x_{1,2} = m_e \cdot \varepsilon_{1,2} (\dot{\theta}^2 \cdot \cos(\theta) + \ddot{\theta} \cdot \text{sen}(\theta)) \\ m\ddot{x}_2 + c_{xx}\dot{x}_2 + k_{xx}x_2 = m_e \cdot \varepsilon_2 (\dot{\theta}^2 \cdot \cos(\theta) + \ddot{\theta} \cdot \text{sen}(\theta)) \end{cases} \quad (5.8)$$

cujo, o sinal completo é a soma de cada uma das respostas das ordens, ou seja,

$$x = x_1 + x_{1,2} + x_2. \quad (5.9)$$

Este cálculo pode ser realizado uma vez que o sistema é linear. O parâmetro de massa (m), amortecimento (c_{xx}), rigidez (k_{xx}) e massa de desbalanceamento (m_e) é igual, respectivamente, a 1 kg, 1,5 Ns/m, 98.696 N/m e 0,08 kg.

O diagrama em cascata deste sinal está mostrado na Figura 5.53, cuja observação da amplitude das componentes a baixa rotação é prejudicada pela proximidade entre as ordens. O mapa de ordem, Figura 5.54(b), é obtido pela TVDFT com blocos de 115 revoluções, *overlap* de 11% e janela Hanning. A frequência natural aparece com amplitude maior e decrescente em ordem com a rotação, as outras componentes surgem constante nas ordens 1, 1,2 e 2. Da mesma forma, se compõe o mapa de ordem pela Reamostragem Digital, Figura 5.54(a), com 1000 pontos por bloco, variação de ordem de 0,02 e *overlap* de 29%. Contudo, a amplitude do mapa calculada pela TVDFT é maior que a obtida pela Reamostragem Digital.

A diferença entre as amplitudes diminui quando se aplica o pós-processamento da OCM nas ordens da TVDFT. Como pode ser visto nas curvas da Figura 5.55 (a), (b) e (c), respectivamente para as ordens 1, 1,2 e 2, a amplitude está muito próxima, exceto no pico do cruzamento da frequência natural com a ordem. A amplitude do pico é diferente por causa do

comprimento dos blocos entre os métodos; a Reamostragem Digital utiliza uma faixa com pequena variação de amplitude, enquanto que, a TVDFT abrange um intervalo em que a amplitude varia mais. Esta característica é inerente aos métodos, devido ao procedimento de cálculo. A fase nestas três curvas indica inversão de zero a $-\pi$ radianos no cruzamento com a frequência natural para o método da TVDFT, e um deslocamento positivo na Reamostragem Digital, que não tem valores constantes como no primeiro método.

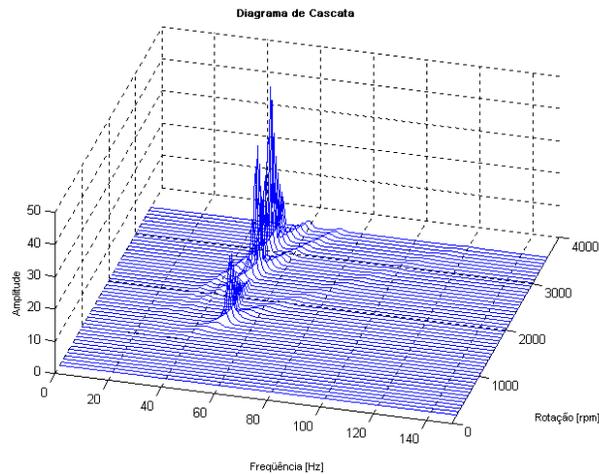


Figura 5.53: Diagrama de Cascata da direção x com blocos de 1000 pontos *overlap* de 20% e janela Hanning.

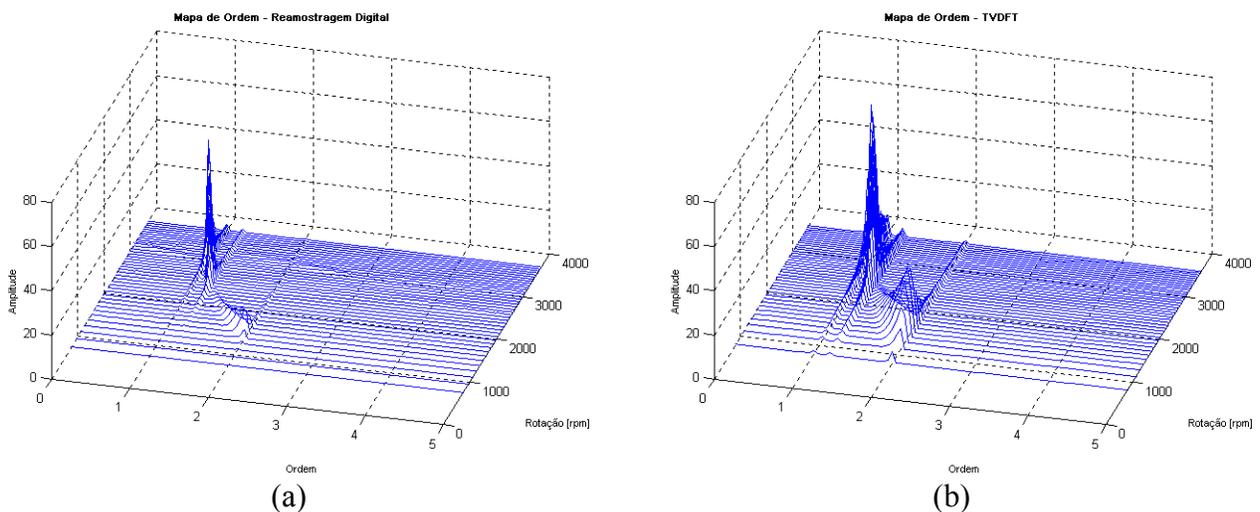
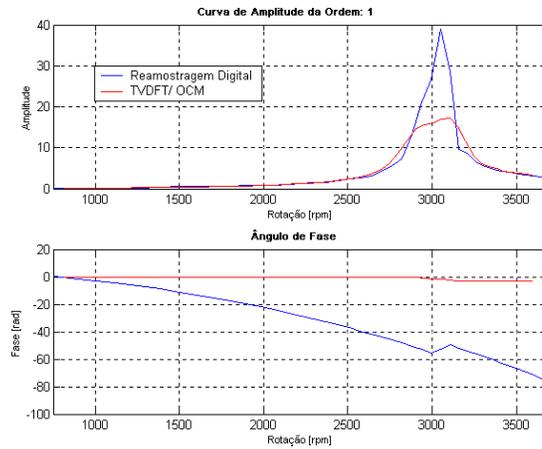
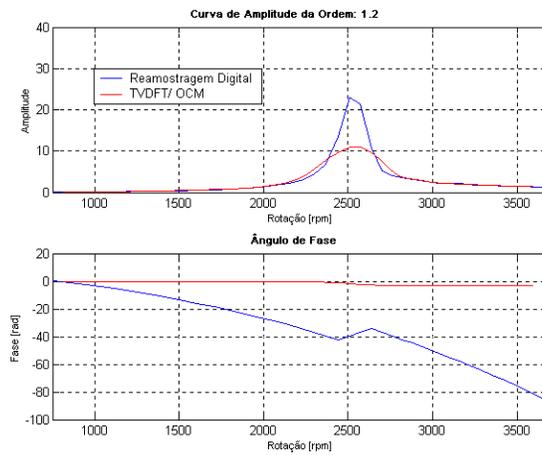


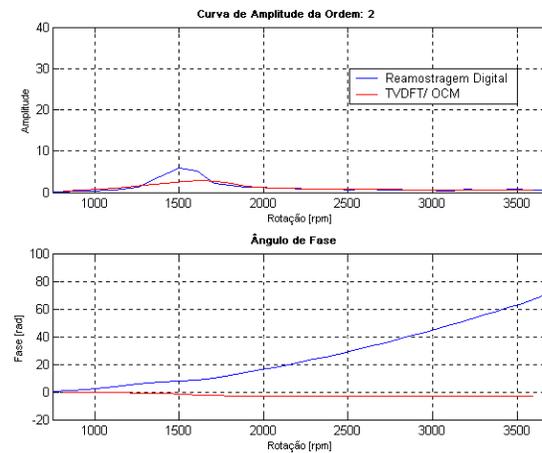
Figura 5.54: Mapa de ordem do rotor isotrópico de três ordens na direção x (a) pelo método da Reamostragem Digital com 1000 pontos *overlap* de 29% e janela Hanning e (b) pelo método da TVDFT com 115 revoluções *overlap* de 11% e janela Hanning.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.55: Amplitude/ fase pelos métodos da Reamostragem Digital e TVDFT/ OCM (a) da primeira ordem, (b) ordem 1,2 e (c) segunda ordem.

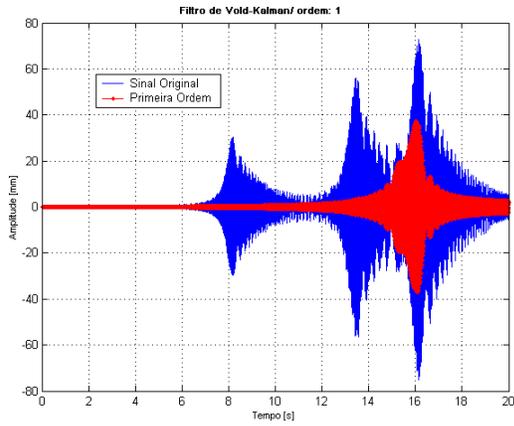
O filtro de Vold-Kalman permite que o usuário escolha qual a ordem a ser filtrada a partir da variável k na equação (4.10), mesmo que não seja uma ordem inteira. Assim procede-se filtrando do sinal original as ordens 1, 1,2 e 2 e posteriormente subtraindo-as nesta mesma ordem do sinal completo para gerar os mapas de ordem, Figura 5.57 (a), (b) e (c). As respectivas respostas temporais estão mostradas nas Figura 5.56 (a), (b) e (c). Na resposta temporal das ordens filtradas surge um aumento de amplitude seguido por uma diminuição, que representa o instante em que a frequência natural cruza a ordem. Como o cruzamento ocorre uma vez para cada ordem, o pico de amplitude manifesta-se apenas uma vez, sendo que ocorre primeiro para as ordens maiores (mais rápidas em atingir o valor da frequência natural). Os mapas de ordem filtrados mostram a eliminação completa das ordens correspondentes ao filtro, e na curva da Figura 5.57(c) há apenas o sinal da frequência natural.

As curvas de amplitude e fase do mapa antes e depois da filtragem estão na Figura 5.58(a) e Figura 5.58(b). Estes apresentam resultados parecidos com a filtragem da primeira ordem da simulação anterior, ou seja, queda da amplitude para perto de zero com a filtragem com exceção nos instantes de cruzamento da frequência natural com a ordem. As fases destes sinais filtrados mudam de amplitude, mas continuam a apresentar inversão de fase na frequência natural.

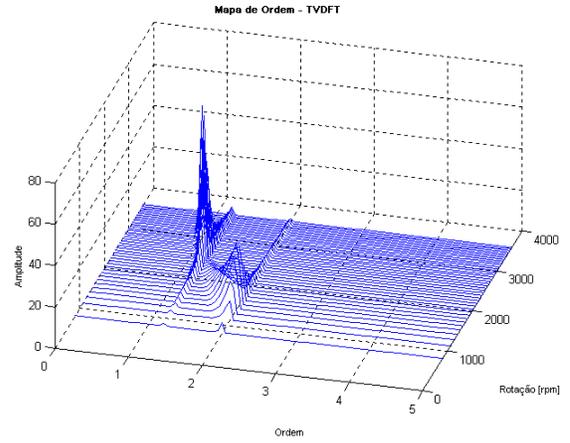
A literatura chama a atenção do método de Vold-Kalman pela capacidade de extrair ordens de sinais com múltiplas componentes (Vold, 1997b), como é verificado nestas simulações. Ao utilizar o filtro de Kalman para o mesmo sistema, verifica-se no sinal temporal extraído da primeira ordem (Figura 5.59) que as outras ordens interferem na estimativa, diferentemente da curva do filtro de Vold-Kalman na Figura 5.56(a). No caso de Kalman, manifesta-se pelo aumento de amplitude nos três cruzamentos da frequência natural com as ordens. O mesmo efeito de interferência surge quando aplicado o filtro para as outras ordens, 1,2 e 2.

O filtro de Vold-Kalman é computacionalmente mais pesado do que o filtro de Kalman, como pode ser visto pelos tempos de processamento para cada ordem apresentados na Tabela 5.2, cuja diferença no cálculo chega a valores maiores que quatro vezes.

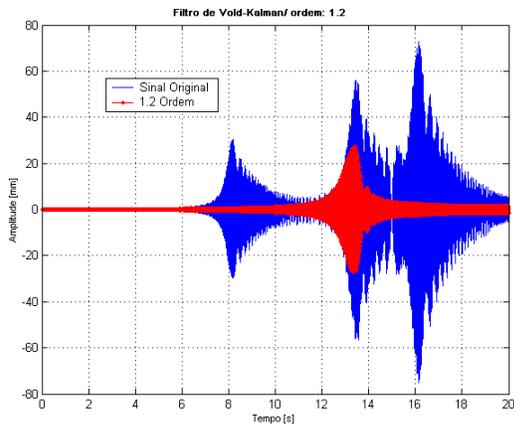
Uma outra restrição dos métodos de filtragem é o número de pontos analisável, sem que atinja a capacidade máxima do processador. Para as características do microcomputador utilizado (Pentium 3, 768 MB de RAM e processador de 1,1 GHz), na geração da simulação e processamento dos dados, o máximo é de 5.500 pontos para ambos os métodos de filtragem.



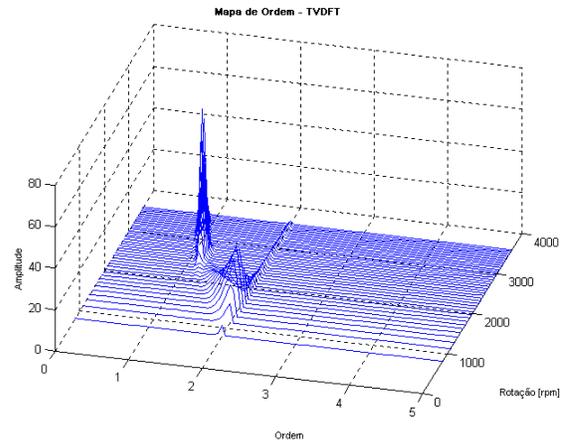
(a)



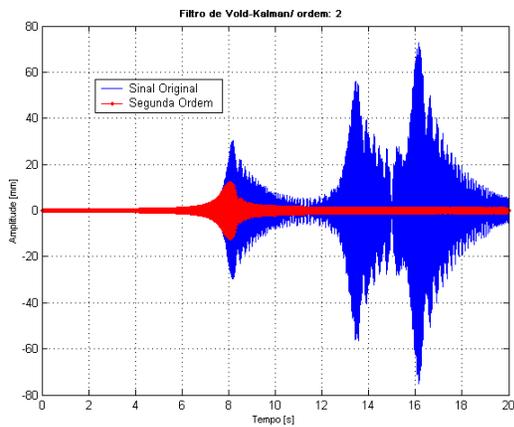
(a)



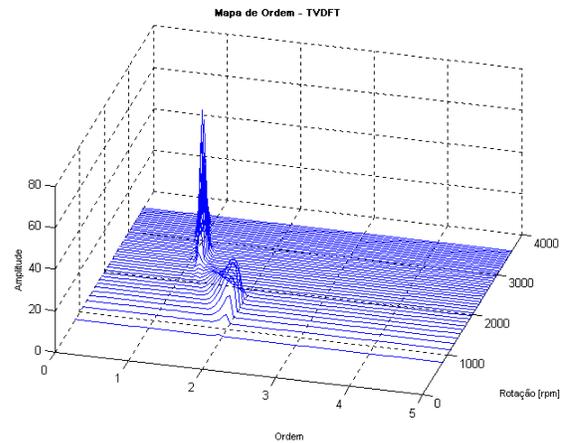
(b)



(b)



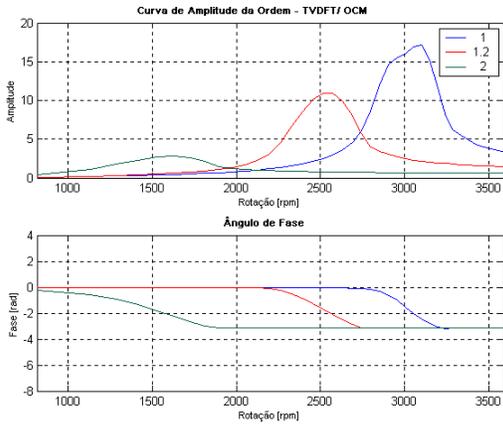
(c)



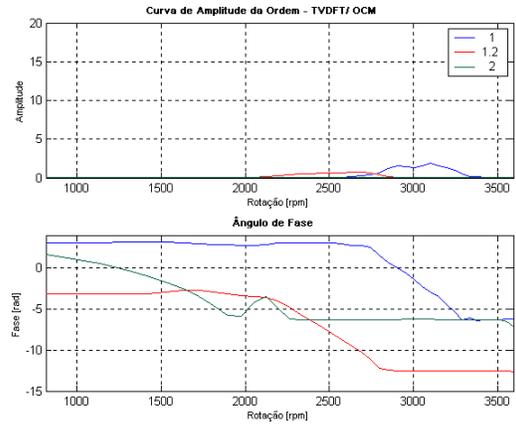
(c)

Figura 5.56: Resposta filtrada do rotor por Vold-Kalman com HCF de 100 na ordem (a) 1, (b) 1,2 e (c) 2.

Figura 5.57: Mapa de ordem pelo método da TVDFT filtrado com Vold-Kalman na ordem (a) 1, (b) 1,2 e (c) 2.



(a)



(b)

Figura 5.58: Amplitude e fase das ordens por TVDFT/ OCM na direção x do rotor isotrópico (a) sem filtragem e (b) todas as ordens filtradas.

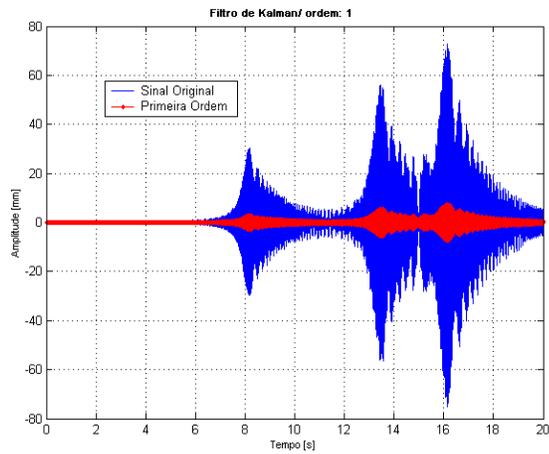


Figura 5.59: Resposta filtrada do rotor por Kalman com HCF de 10 na primeira ordem.

Tabela 5.2: Tempo de processamento para filtrar as ordens nos métodos de filtragem por Kalman e Vold-Kalman.

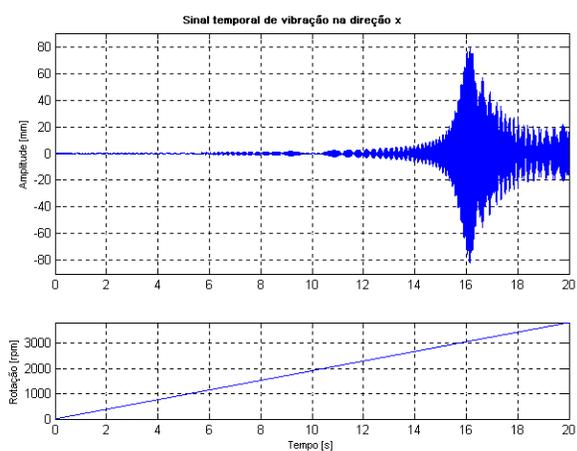
<i>Método</i>	Ordem 1	Ordem 1,2	Ordem 2
Filtro Kalman	355 s	362 s	384 s
Filtro Vold-Kalman	1689 s	690 s	1036 s

5.5. Rotor com Ordens Cruzadas

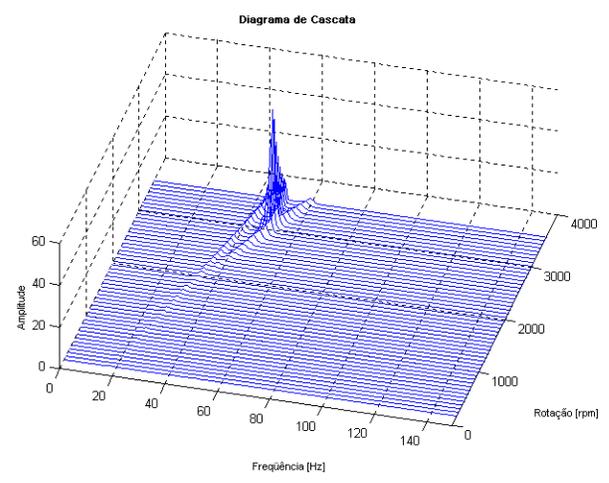
Os trabalhos a respeito de filtros destacam também a eficiência do filtro de Vold-Kalman em seguir ordens cruzadas, situação em que o filtro de Kalman não obteria bons resultados. Portanto, para averiguar a capacidade de extração de ordens nesta condição, simula-se uma resposta – Figura 5.60(a) – do mesmo rotor de múltiplas componentes, isotrópico e frequência natural em 50 Hz, com duas ordens. A primeira ordem tem uma aceleração constante de 20 rad/s^2 com condições iniciais nulas, e uma outra ordem de aceleração em 10 rad/s^2 com velocidade inicial em 100 rad/s . A diferença de aceleração, inclinação da curva no diagrama de cascata, Figura 5.60(b), e as condições iniciais estabelecem o cruzamento entre ordens em aproximadamente 9 segundos.

A amplitude da primeira ordem, vista pelo método da Reamostragem Digital ou pela TVDFT (Figura 5.61), indica claramente o momento de passagem da ordem sobre a frequência natural, como sendo um pico, diferente para cada um dos métodos, devido ao comprimento das faixas do sinal que os blocos englobam. Entretanto, não se distingue bem o cruzamento entre ordens, já que a amplitude é inferior ao cruzamento com a frequência natural. Neste momento (frequência natural), a fase do sinal na TVDFT tem uma inversão de zero a $-\pi$ radianos, enquanto que no cruzamento entre ordens há apenas uma tendência de altera-lo, mas retornando ao valor inicial após o cruzamento. A fase na Reamostragem Digital é influenciada também pelos cruzamentos, contudo não se verifica estabilidade do valor calculado.

A figura de amplitude/ fase da primeira ordem do sinal simulado, filtrado com filtro de Kalman e com filtro de Vold-Kalman está apresentada, respectivamente, na Figura 5.63 (a), (b) e (c). A amplitude da primeira ordem, em relação ao sinal original, diminui consideravelmente quando aplicado o filtro de Vold-Kalman, contudo há apenas uma pequena redução no filtro de Kalman. O mesmo comportamento pode ser visto nas curvas de mapa de ordem, Figura 5.62 (a), (b) e (c), gerados com 115 revoluções por volta, ordem máxima de 10 e *overlap* de 11%. Portanto, os resultados pelo filtro de Vold-Kalman, na extração de ordens que se cruzam, são muito mais eficientes do que no filtro de Kalman.



(a)



(b)

Figura 5.60: Rotor isotrópico na direção x com aceleração constante de 20 rad/s^2 passando pela frequência natural de 50 Hz. (a) resposta temporal e (b) diagrama de cascata com blocos de 1000 pontos, *overlap* de 20% e janela Hanning.

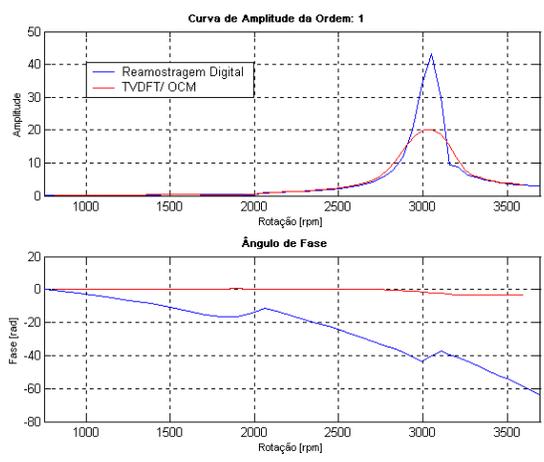
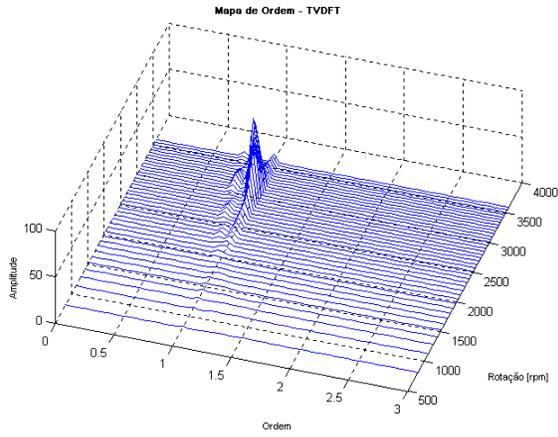
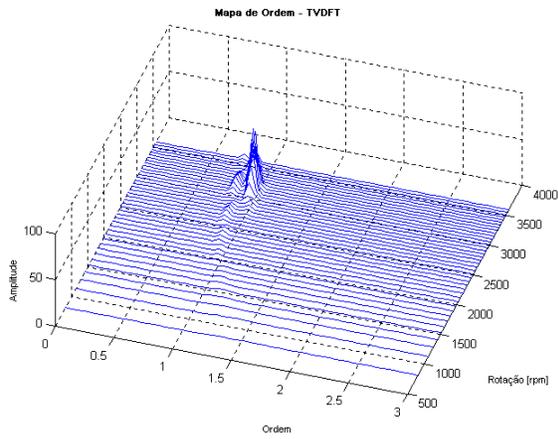


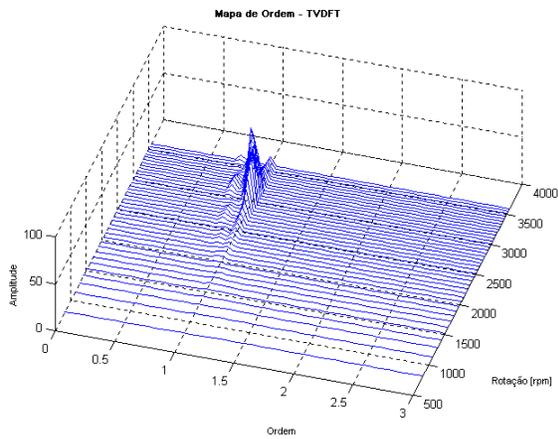
Figura 5.61: Amplitude/ fase da ordem 1 pela Reamostragem Digital e TVDFI/ OCM.



(a)

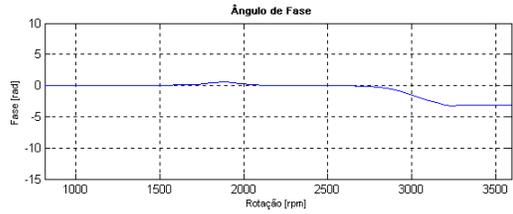
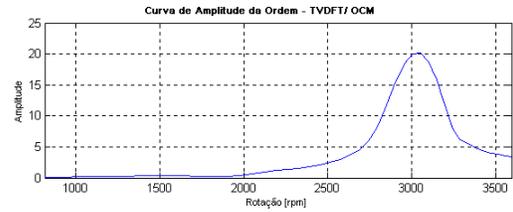


(b)

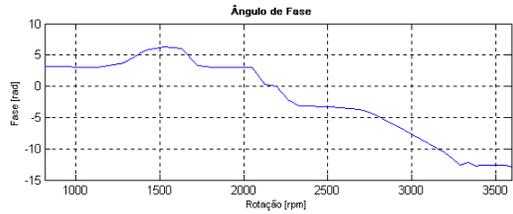
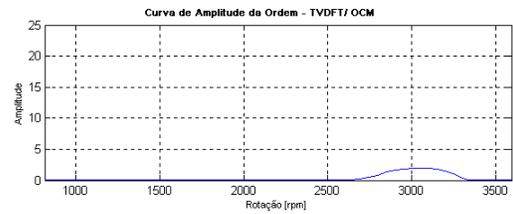


(c)

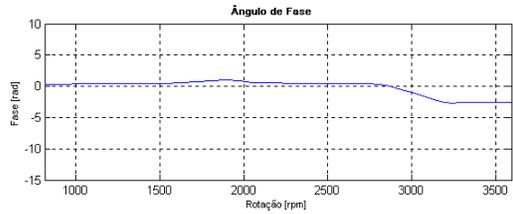
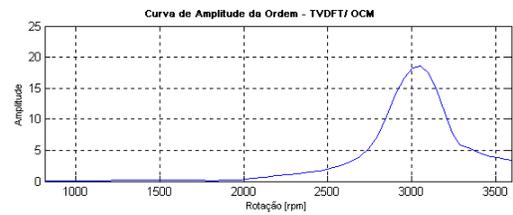
Figura 5.62: Mapa de ordem pelo método da TVDFT com 115 revoluções por bloco e *overlap* de 11%, (a) sem filtro, (b) filtro de Vold-Kalman e (c) filtro de Kalman.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.63: Amplitude/ fase da primeira ordem por TVDFT/ OCM (a) sem filtro, (b) após filtragem por Vold-Kalman (HCF 100) e (c) após filtragem por Kalman (HCF 2).

5.6. Conclusão

Os métodos implementados neste trabalho fazem parte de um conjunto de algoritmos usados comercialmente e com sucesso no mercado. Os dois principais programas comerciais da HP (*Order Tracking Computacional*) e B&K (Reamostragem Digital) mostram-se eficientes e com iguais resultados gráficos. Uma diferença no processamento de ambas técnicas é a maior complexidade da Reamostragem Digital, devido à interpolação necessária. Apesar disso, o tempo requerido de análise é aproximadamente o mesmo.

A técnica desenvolvida na Universidade de Cincinnati, *Order Tracking* com Transformada de Fourier Discreta Variável no Tempo (TVDFDT), mostra-se mais rápido do que os métodos baseados na reamostragem. Contudo, a estimativa da amplitude é ineficiente, apresentada por valores muito diferentes da real e de grande variação nas baixas rotações. O pós-processamento das ordens de interesse pela Matriz de Compensação Ortogonal (OCM) melhora em muito o resultado, como descrito nas simulações de ordens da seção 5.1. É característica do método a possibilidade de analisar os dados originais sem a necessidade de interpolação (reamostragem), com um intervalo de tempo sempre constante. Isto gera a necessidade de utilizar um número de pontos por bloco variável para obter o mesmo deslocamento angular e, conseqüentemente, uma banda de ordem fixa. Os resultados mostram que a TVDFDT estima a fase de modo mais estável do que a reamostragem, indicando o momento de passagem da frequência natural como uma inversão de π radianos.

Nos métodos de filtragem, a extração de uma ordem e sua eliminação do sinal original pode ser feita de forma completa, resultando em amplitude nula após o processo. Isto é verificado sem que haja perturbação nas outras componentes constituintes. O primeiro método de filtragem, filtro de Kalman, reduz a amplitude da componente, mas não a elimina como no filtro de Vold-Kalman. Entretanto, seu processamento é mais rápido – é verificada nas simulações uma diferença de até 25% do tempo requerido da filtragem de Vold-Kalman. Este, por sua vez, mostra-se eficiente mesmo quando testado em um sinal com diversas ordens ou ordens cruzadas. O parâmetro de “*Harmonic Confidence Factor*” (HCF) atua igualmente para os filtros: o aumento de seu valor torna-os mais lentos de forma que pode não acompanhar a mudança de amplitude, como ocorre na intersecção da frequência natural e da ordem, cuja variação de amplitude é muito brusca para o filtro.

Capítulo 6

Análise Experimental

O tratamento de sinais não estacionários de máquinas e componentes rotativos, em geral, envolve o uso do domínio da ordem. Como exemplo, pode ser citada a indústria automotiva, grande usuária das técnicas de *Order Tracking* comerciais. Os sinais analisados neste capítulo são provenientes de medições realizadas em empresas (que terão seus nomes omitidos por questões de sigilo industrial) e correspondam às medidas realmente usadas por estas no desenvolvimento ou qualificação de seus produtos.

O capítulo está subdividido em quatro partes, uma para cada tipo de ensaio: o primeiro, refere-se a um sistema de embreagem medido diretamente de um veículo automotivo. Os sinais, sonoro e de vibração nas direções radial e axial do disco da embreagem, têm componentes de ordens que são identificados nos mapas de ordem pela Reamostragem Digital e TVDFT e avaliados, componente a componente, no tempo através do filtro de Vold-Kalman; a segunda parte é composta de medidas de deformação em quatro pontos da tampa lateral de um motor de ônibus. A empresa, fabricante do motor, forneceu os dados do extensômetro, bem como a velocidade de rotação do motor, obtida de um programa comercial. Este caso apresenta um problema de múltiplas ordens com componentes próximas, oriunda de um sistema acoplado ao eixo de saída do motor; o terceiro caso analisado é o de uma bomba de injeção de água de grande porte. Quando o sistema está partindo ou parando, surgem componentes de elevada amplitude na pressão de sucção e descarga, além de apresentar altas ordens por causa do número de pás da bomba (*vane passing frequency*); na última análise, mede-se a vibração de um motor automotivo com um acelerômetro triaxial. As três direções permitem aplicar a metodologia de estimativa da frequência instantânea pela distribuição direcional de Wigner, e assim utilizar o cálculo da

rotação para fazer a análise de ordem. Os mapas apresentam as componentes relacionadas, principalmente, com o número de explosões por volta do motor, que têm elevadas amplitudes.

A forma de análise e solução dos problemas aqui apresentados depende fortemente da experiência do usuário em interpretar os resultados gerados e de seu conhecimento sobre o sistema analisado. Por isso, desenvolvem-se exaustivamente, neste trabalho, diversas condições e diferentes aplicações de tal modo que o conhecimento e experiência adquirida sirvam de base para pesquisas mais aprofundadas na área e sejam ferramentas de apoio ao grupo de trabalho do departamento.

6.1. Medição de Vibração e Som em Sistema de Embreagem

Como exemplo de uma aplicação automotiva, utilizam-se os dados coletados de um sistema de embreagem montado no próprio veículo. Visto que este sistema faz a transmissão do movimento rotativo do motor para a transmissão do veículo, servindo no acoplamento e desacoplamento dos dois subsistemas no momento da mudança de marcha, tem grande valor o estudo de seu comportamento dinâmico para avaliar o funcionamento correto ou no desenvolvimento destes.

A medição¹ consiste de dois sensores de deslocamento e um microfone, que são posicionados no interior da caixa seca, na posição em que se encontra o sistema de embreagem do veículo. A primeira medida é de deslocamento radial de um componente denominado de CSC (“colar de embreagem”)– esta peça faz o contato por atrito do eixo da transmissão com o platô da embreagem, e esta está ligada ao volante do motor (Figura 6.1). O segundo sensor de deslocamento mede a vibração axial do platô, enquanto que o microfone (General Radio Tipo 196219611 com capacidade de até 500 Hz) está posicionado próximo do CSC, medindo a pressão sonora. Para determinar a velocidade instantânea do motor, um sensor magnético (deslocamento)

¹ Os resultados apresentados nesta dissertação foram selecionados dentro de um conjunto de medições efetuadas em 4 sistemas de embreagem diferentes sendo que, para cada um, foram utilizados 14 sensores (acelerômetros, microfone, sensores de deslocamento e tacômetro), e testadas 18 condições (seis níveis de rotações constantes da marcha lenta até a máxima, aceleração e desaceleração do motor, variação de pressão no pedal).

é colocado junto ao volante. Todos os sensores de deslocamento são sensores magnéticos da Bently Nevada. Os sinais foram gravados em gravador Kyowa modelo RTP-610B e, posteriormente, reproduzidos e adquiridos com frequência de amostragem constante igual a 5000 Hz com uma placa de aquisição da *National Instruments*.

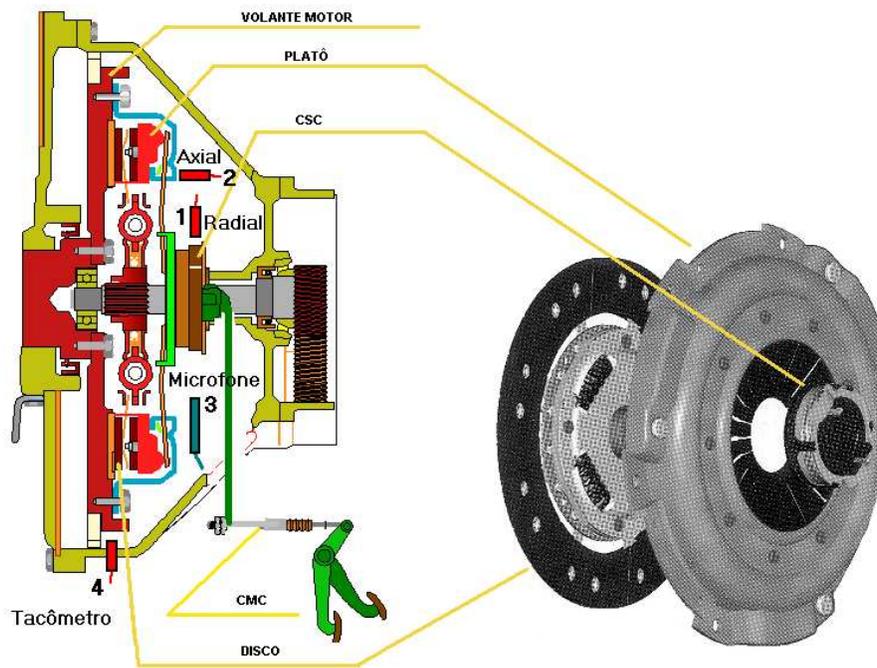


Figura 6.1: Esquema da posição dos sensores no sistema de embreagem, (1) LVDT radial do CSC, (2) LVDT axial do platô, (3) microfone e (4) LVDT no volante do motor.

6.1.1. Direção Radial

A estimativa da velocidade de rotação do motor é calculada de um sinal de tacômetro magnético do mesmo tipo do sensor de deslocamento radial e axial, colocado junto aos dentes do volante. O conjunto de dentes perfaz um número total de 59, igualmente espaçados em torno de seu perímetro; a falta de um dente para completar os 60 serve de referência de posicionamento dos pistões do motor, necessário para o controle da injeção eletrônica. O sensor magnético foi colocado ao lado do sensor de velocidade do próprio veículo.

A estimativa da rotação do motor no período de aquisição do sinal na direção radial está indicada na Figura 6.2. Conforme visto nesta figura a amplitude do sinal varia em função da velocidade. Este tipo de característica não havia sido detectado durante a análise do tacômetro no Capítulo 3. Neste caso, além da amplitude, a forma do sinal altera-se dependendo da rotação, como também pode ser visto nos gráficos da parte superior da Figura 6.2.

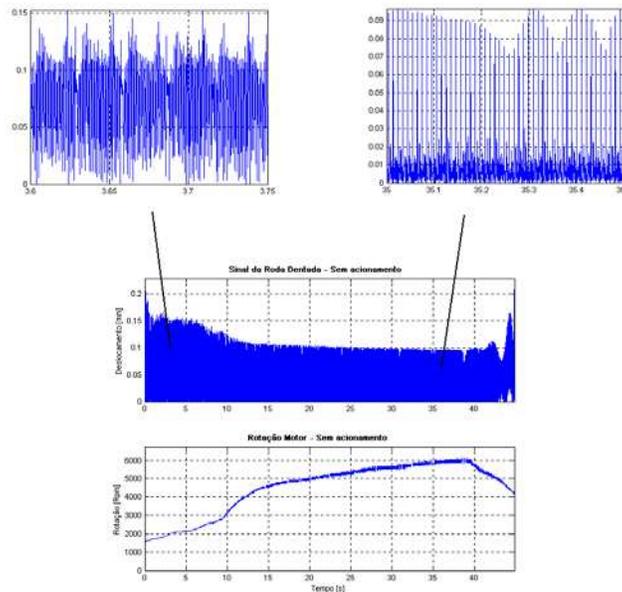


Figura 6.2: Sinal do volante do motor e estimativa da rotação.

Em rotações mais baixas, o sinal apresenta vários pulsos devido aos dentes do volante. Ao aumentar a velocidade, a amplitude relacionada com os pulsos diminui, restando um único pulso oriundo do dente faltante. O efeito é provocado pelo tempo de resposta do sensor magnético, no qual a alta velocidade de rotação não consegue acompanhar o vão entre dentes. Por isso, realiza-se a análise em duas partes: na primeira, apenas o sinal com baixa rotação é tratado com um filtro passa-baixa com frequência de corte de 200 Hz. Desta forma, eliminam-se as componentes relacionadas com os dentes do volante, de frequência que varia de 1475 Hz (59×25 Hz) a 3540 Hz (59×60 Hz), sobrando uma única componente de uma vez a rotação. O processo de filtragem digital mostra-se aplicável neste caso porquê a frequência da componente é o produto da velocidade pelo o número de dentes presentes, possibilitando o uso de um filtro de frequência de corte fixa para eliminar estas frequências altas. A segunda parte, de velocidade de rotação alta,

consiste em utilizar o próprio sinal original por já apresentar uma componente de um pulso por volta.

Obtém-se a estimativa da velocidade pela formulação indicada no Capítulo 3. Sendo a taxa de amostragem usada de 5000 Hz, ainda verifica-se que ocorre uma flutuação na estimativa da velocidade acima de aproximadamente 5000 rpm. Um valor maior na taxa não é usado devido à grande quantidade de informações já digitalizadas.

O sinal temporal medido na direção radial está ilustrado na Figura 6.3. Pode-se observar um aumento de amplitude próxima da velocidade máxima, 100 Hz, diminuindo com a redução da rotação.

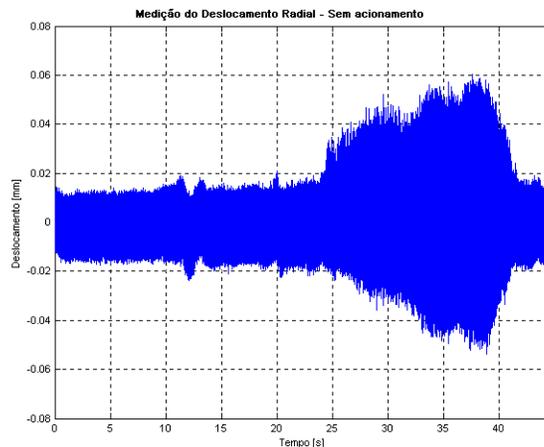


Figura 6.3: Deslocamento temporal na direção radial sem acionamento do pedal da embreagem.

Nas Figuras 6.4, 6.5(a) e (b) estão o diagrama em cascata, os mapas de ordem obtidos pela Reamostragem Digital e pela TVDFT, da direção radial, respectivamente. Estas curvas indicam a presença de uma componente na primeira ordem, relativa à velocidade de rotação, e uma na segunda ordem, por causa das explosões nos cilindros do motor (quatro tempos – duas explosões por volta do eixo do motor). A curva da Reamostragem Digital tem blocos de 5.000 pontos com *overlap* de 70% e discretização de 0,004. Trata-se o sinal temporal do bloco com uma janela Hanning de mesmo comprimento do bloco. Os parâmetros do método da TVDFT são 204 revoluções por bloco com *overlap* de 50%, 0,01 de precisão e tratamento com janela Hanning. Traça-se ambos os mapas de ordem com ordem máxima de 10.

A amplitude/ fase da primeira ordem na reamostragem e TVDFT, Figura 6.6(a) e 6.7(a), têm diferentes níveis de amplitude. A diferença entre os dois métodos chega a 10 vezes maior na

estimativa da TVDFT em relação a Reamostragem Digital. O mesmo efeito surge quando observado a amplitude/ fase da segunda ordem, Figuras 6.6(b) e 6.7(b), respectivamente, para a Reamostragem Digital e TVDFT. A imprecisão em determinar a amplitude na TVDFT pode ser reduzida utilizando o pós-processamento da matriz de ortogonalidade (OCM) aplicado na primeira e segunda ordem. As Figuras 6.8(a) e (b) mostra, para essas duas ordens, estimativa de amplitude muito próxima das obtidas pela Reamostragem Digital. Esta correção exemplifica a grande potencialidade do tratamento pela OCM dos resultados obtidos no método. Contudo, isto ainda representa uma limitação no ajuste da amplitude no próprio mapa de ordem, uma vez que não é possível corrigir a amplitude do mapa de ordem da TVDFT.

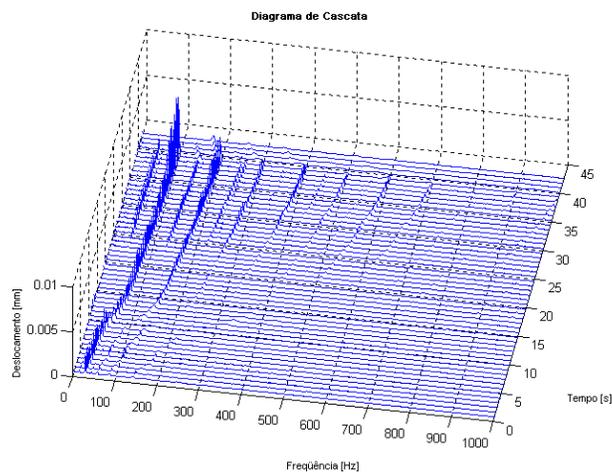


Figura 6.4: Diagrama em cascata da direção radial de 8.192 pontos por bloco, *overlap* de 50% e janela Hanning.

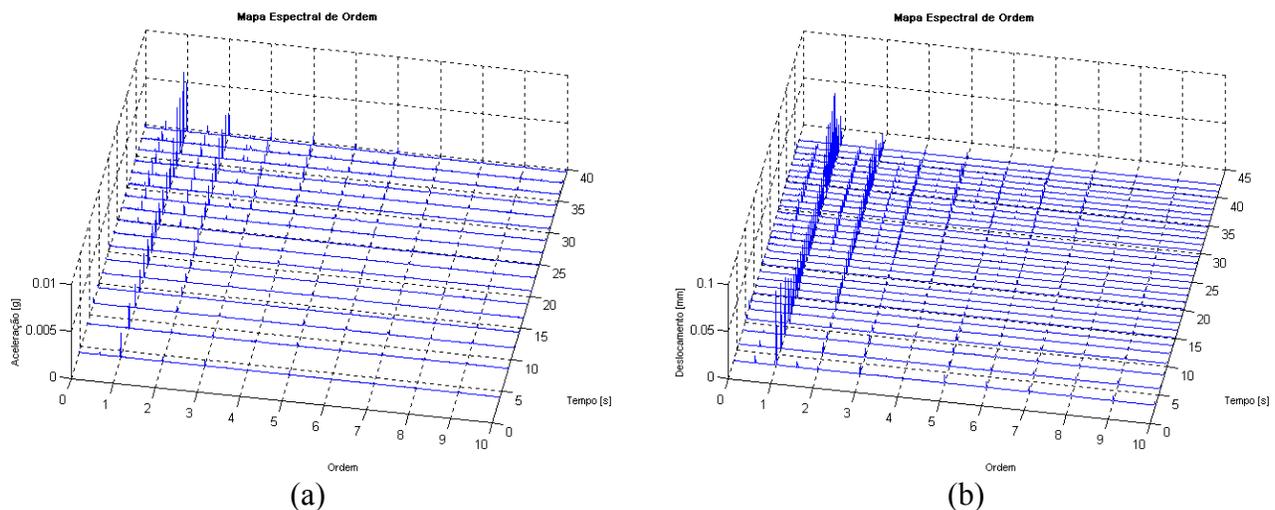
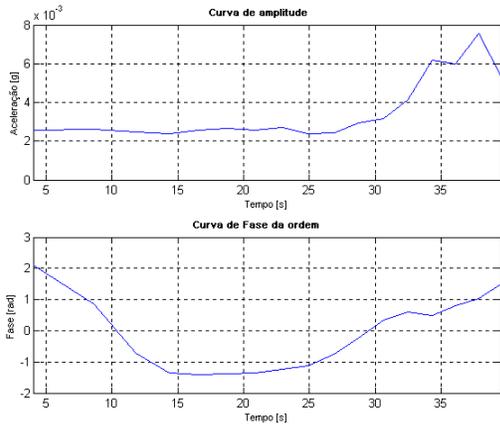
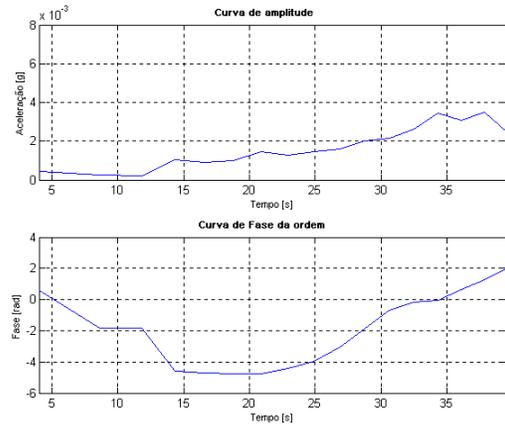


Figura 6.5: Mapas de ordem obtidos pelo método (a) da Reamostragem Digital com blocos de 5000 pontos, *overlap* de 70% e (b) da TVDFT com blocos de 204 revoluções, *overlap* de 50%.

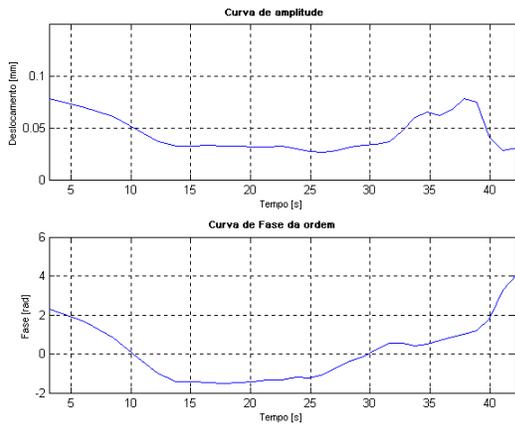


(a)

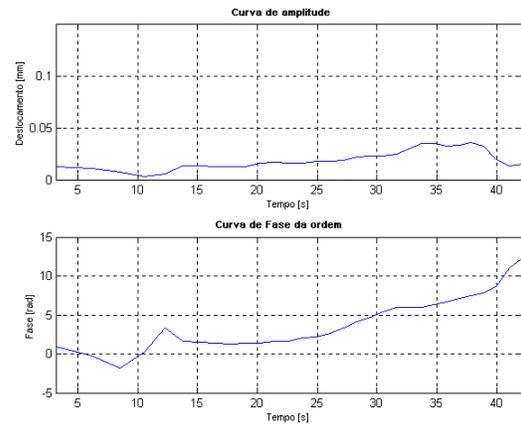


(b)

Figura 6.6: Amplitude e fase obtida pela Reamostragem Digital na direção radial. (a) ordem 1 e (b) ordem 2.

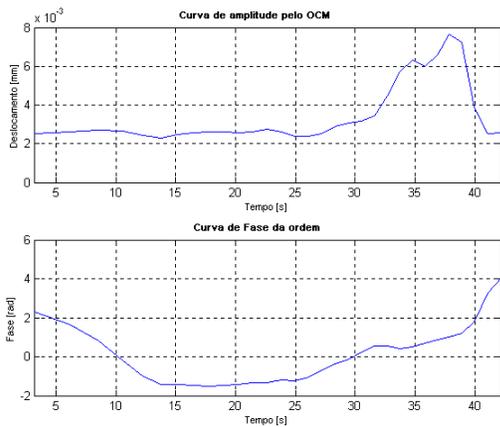


(a)

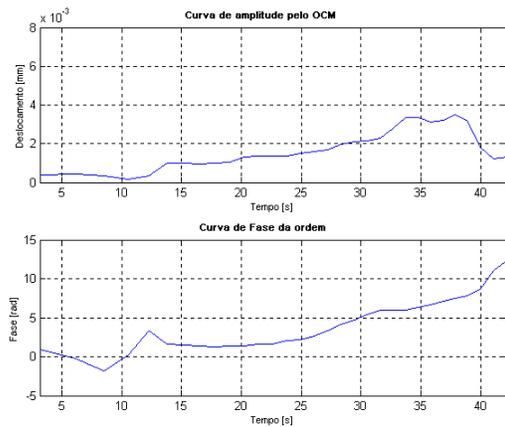


(b)

Figura 6.7: Amplitude e fase obtida pela TVDFT na direção radial. (a) ordem 1 e (b) ordem 2.



(a)



(b)

Figura 6.8: Amplitude e fase obtida pela TVDFT, com OCM, na direção radial. (a) ordem 1 e (b) ordem 2.

6.1.2. Direção Axial

Um dos ensaios realizados foi comparar uma embreagem normal de produção com outra na qual se provocou uma de falta de paralelismo nas lâminas da mola prato, onde ocorre o contato com o CSC. Metade das lâminas foram desalinhadas para fora (no sentido do disco da embreagem) de 0,9 mm, enquanto que a outra parte permaneceu inalterada. As curvas de tempo e diagramas de cascata do deslocamento axial do platô da embreagem sem acionamento, sem e com desalinhamento, estão mostrados nas Figura 6.9 e 6.11, respectivamente. Ressalta-se que este é um ensaio diferente daquele em que foi obtida a medição na direção radial apresentada na secção anterior. A Figura 6.10 apresenta estimativa da velocidade de rotação do motor e o sinal do tacômetro magnético para cada uma das embreagens.

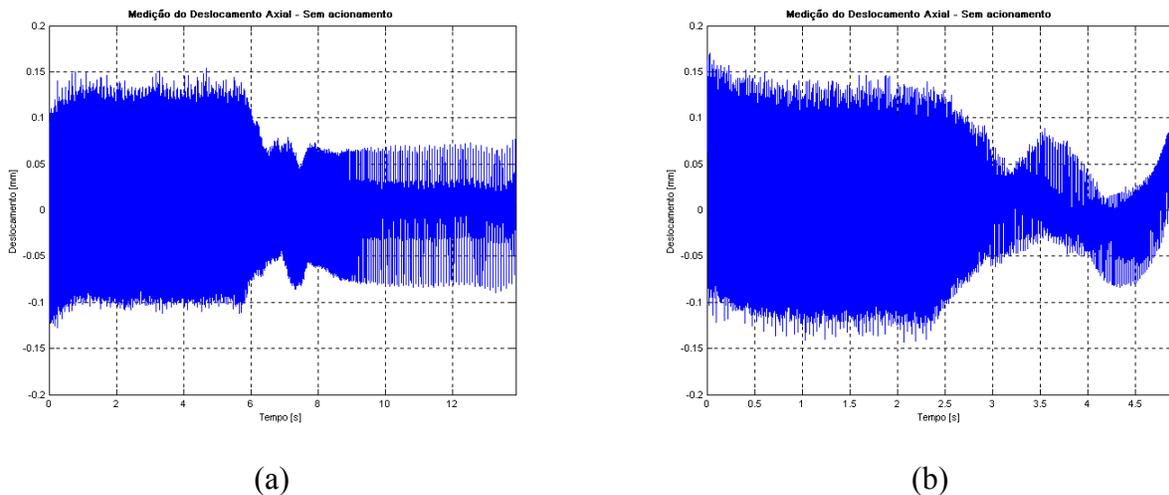


Figura 6.9: Deslocamento axial do platô da embreagem sem acionamento (a) sem desalinhamento e (b) com desalinhamento.

Os mapas de ordem calculados pelos métodos da Reamostragem Digital e da TVDFT são apresentados nas Figuras 6.12 e 6.13, respectivamente, para as duas embreagens utilizadas – com e sem desalinhamento. Estas figuras mostram claramente a vantagens de se utilizar os mapas de ordem ao invés dos diagramas em cascata na análise de sistemas rotativos uma vez que, independente do valor instantâneo da rotação, o mapa de ordem separa as componentes proporcionais a rotação (ordens), ressaltando os fenômenos dinâmicos envolvidos. Este tipo de caracterização do sinal a partir de mapas de ordem é de grande auxílio na identificação de diferentes falhas mecânicas, que excitam determinadas componentes de ordem.

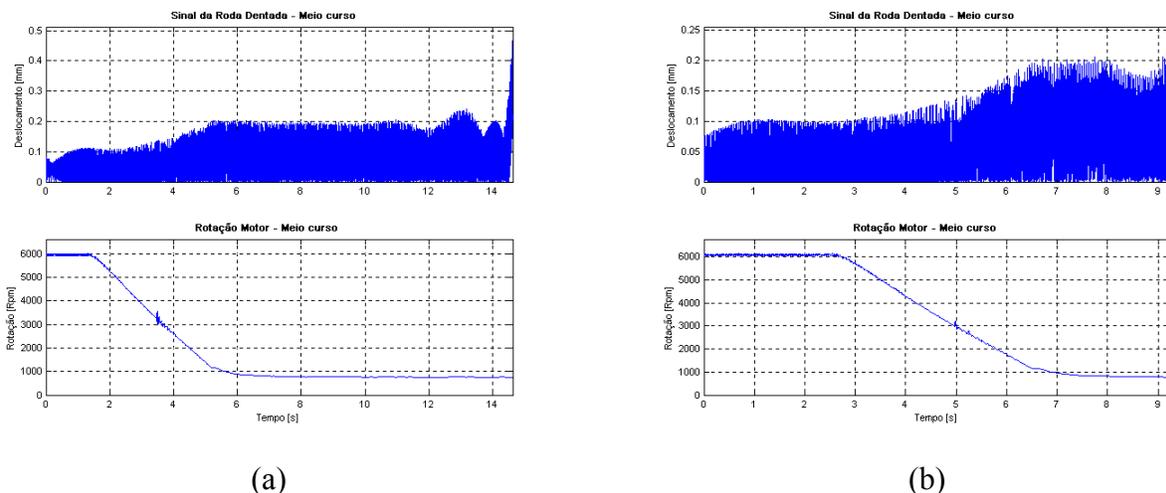
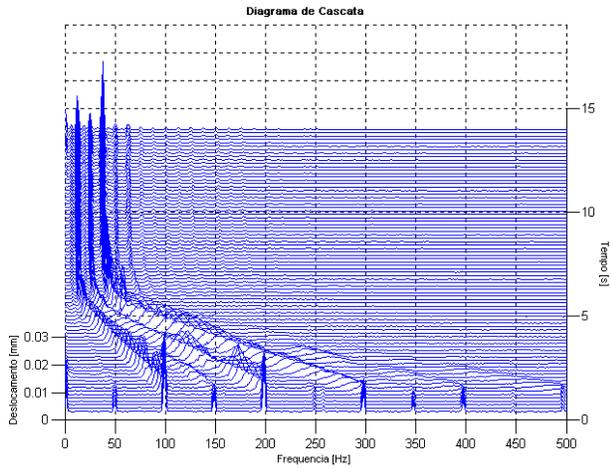


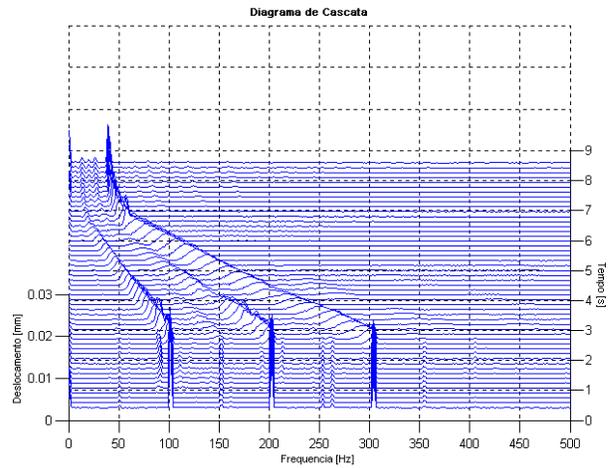
Figura 6.10: Estimativa da rotação e sinal do volante da direção axial (a) sem desalinhamento e (b) com desalinhamento.

Pode-se ver nos mapas de ordem das Figuras 6.13 e 6.14 que as componentes de maior amplitude são a primeira, segunda e terceira ordens, sendo esta última maior das três! Acredita-se que este fenômeno ocorra por causa da posição inercial do sensor, isto é, o sensor não gira com o platô da embreagem e, portanto, o ponto de medição não é o mesmo a todo instante de tempo, refletindo como uma ordem da rotação. Assim combina-se a vibração na segunda ordem, duas explosões por volta do eixo do motor, com a rotação, resultando em uma terceira ordem. Esse fenômeno é comentado em Bucher (2001).

Avaliando-se os mapas da reamostragem e da TVDFT das medições com e sem desalinhamento, observa-se que este desalinhamento provoca a excitação de componentes próximos das ordens inteiras e meias ordens (além de uma componente na ordem 2,6!). Essas componentes são perceptíveis mesmo no sinal sem desalinhamento, mas aparecem com amplitudes menores. Outra característica destas ordens, no mapa da peça com desalinhamento, é a variação da amplitude ao longo do tempo (rotação). A diferença de amplitude entre os métodos ocorre novamente para este sinal. Contudo, a análise qualitativa das ordens pode ser feita mesmo com a diferença na estimativa da amplitude. (Ressalta-se que a utilização da OCM é possível somente para corrigir as amplitudes das ordens isoladas obtidas pela TVDFT, e não no mapa de ordens).

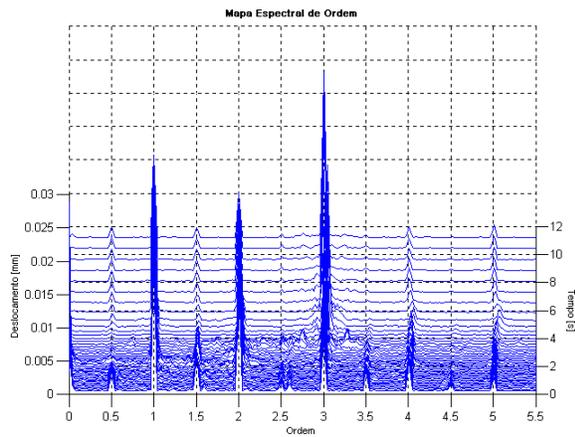


(a)

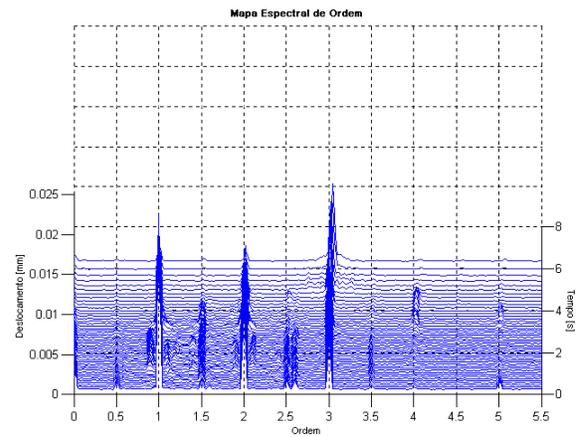


(b)

Figura 6.11: Diagrama em cascata da direção axial (a) sem e (b) com desalinhamento e gerado com 4.096 pontos por bloco, *overlap* de 20% e janela Hanning.

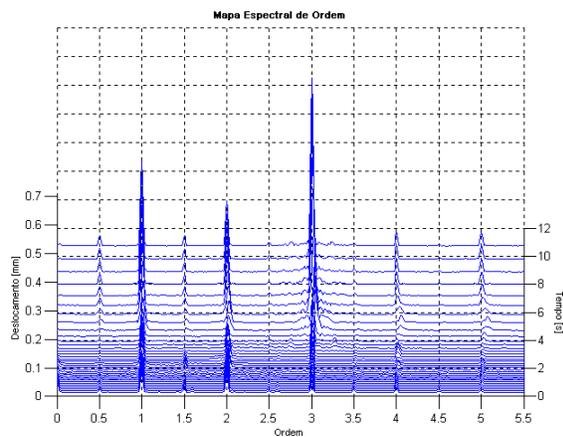


(a)

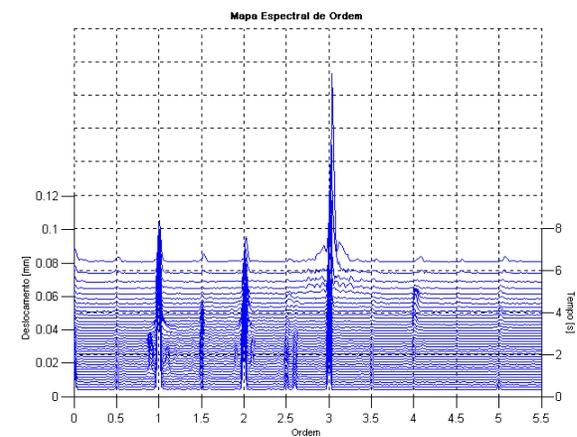


(b)

Figura 6.12: Mapa de ordem da direção axial (a) sem e (b) com desalinhamento obtido pelo método da Reamostragem Digital com blocos de 1000 pontos, *overlap* de 20% e janela Hanning.



(a)



(b)

Figura 6.13: Mapa de ordem na direção axial (a) sem e (b) com desalinhamento obtido pelo método da TVDFT com blocos de 60 revoluções, *overlap* de 20% e janela Hanning.

6.1.3. Pressão sonora

O sinal analisado nesta seção foi adquirido simultaneamente com o sinal na direção radial analisado da seção 6.1.1 e, portanto, obedece à mesma curva de velocidade de rotação apresentada na Figura 6.2.

O sinal temporal da pressão acústica, medido pelo microfone no interior da caixa seca, é apresentado na Figura 6.14 enquanto que o diagrama em cascata e os mapas de ordem obtidos pela Reamostragem Digital e TVDFT são mostrados nas Figura 6.15, 6.16(a, b), respectivamente.

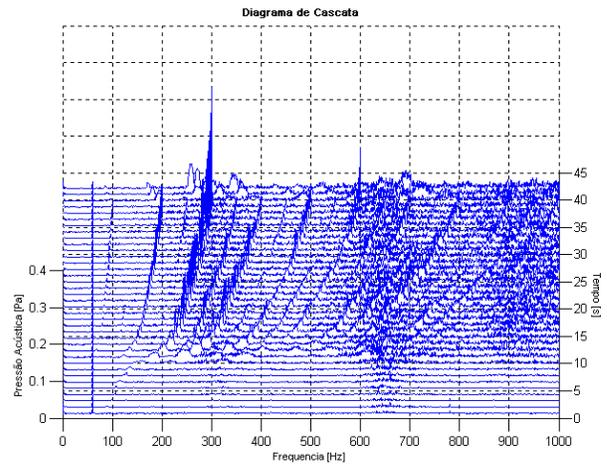
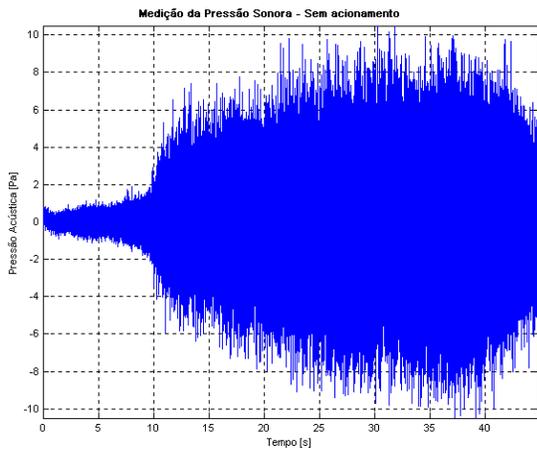
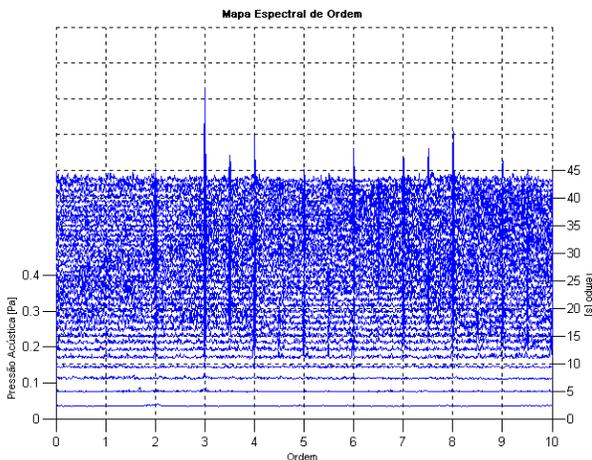
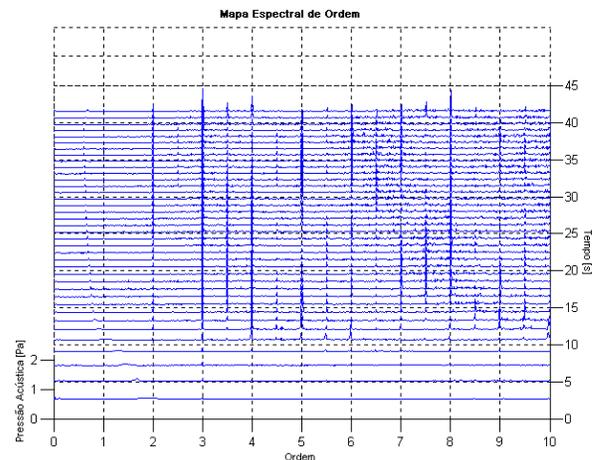


Figura 6.14: Registro temporal da pressão sonora medida no interior da caixa seca com taxa de amostragem de 5000 Hz.

Figura 6.15: Diagrama em cascata da pressão sonora de 8.192 pontos por bloco, *overlap* de 70% e janela Hanning.



(a)



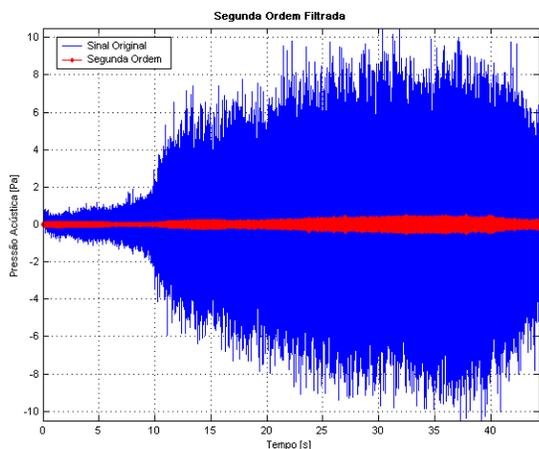
(b)

Figura 6.16: Mapa de ordem da pressão sonora obtida pelo método (a) da Reamostragem Digital com blocos de 5000 pontos e (b) da TVDFT com blocos de 204 revoluções, ambos com *overlap* de 70% e janela Hanning.

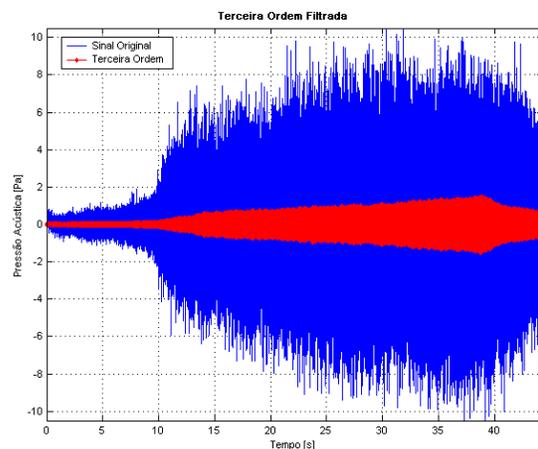
A frequência constante que surge no diagrama em cascata ou a linha assintótica (decrecente em ordem) presente nos mapas é a componente da frequência da rede de 60 Hz, que não foi possível eliminar totalmente das medições devido a problemas de aterramento. Por causa da diferença entre as escalas das curvas dos mapas de ordem obtidos por ambos os métodos, o gráfico da reamostragem aparenta possuir um nível de ruído maior. Contudo, isto é somente efeito da forma de apresentação dos resultados e ocorre porque as escalas são definidas em função das amplitudes das ordens estimadas e as amplitudes do mapa da TVDFT são maiores.

Este sinal sonoro pode ser filtrado através dos filtros adaptativos implementados neste trabalho. Esta opção traz uma enorme gama de alternativas na análise de sinais sonoros utilizando os conceitos da psicoacústica. Para verificar a eficácia desta filtragem, apresenta-se, nas Figuras 6.17, uma comparação do sinal original e das componentes, segunda e terceira ordens, extraídas com o filtro de Vold-Kalman com HCF igual 100. A contribuição de cada ordem na composição do sinal total, para cada instante de tempo (rotação), pode ser vista claramente. As Figuras 6.18 mostram os mapas de ordem gerados a partir dos sinais filtrados: na Figura 6.18(a) tem-se o mapa do sinal sem a segunda ordem e, para gerar a Figura 6.18(b), extraiu-se as ordens 2 e 3. Em ambos os casos os sinais foram filtrados com o filtro de Vold-Kalman com HCF igual a 100 utilizou-se o método da TVDFT com *overlap* de 50% e janela Hanning. Em vista de restrições computacionais, esta filtragem foi realiza-se por partes, utilizando-se 5.400 pontos de cada vez, pois este era o valor máximo que podia ser analisado sem que ocorresse problema de falta de memória. Salienta-se que a divisão do sinal não pode ser realizada sem que ocorram descontinuidades entre as partes filtradas.

Como já foi dito, uma alternativa de continuidade deste estudo seria fazer uma análise acústica/psicoacústica com as componentes extraídas pelo filtro adaptativo. Como o desconforto sonoro em um ser humano não pode ser determinado objetivamente pela intensidade da pressão sonora, o sinal medido pode ser avaliado subjetivamente para cada componente, verificando aquela que é mais crítica em termos de qualidade sonora. A metodologia já é aplicada por algumas empresas que necessitam de maior controle de ruído sobre seus produtos, como na indústria automobilística.

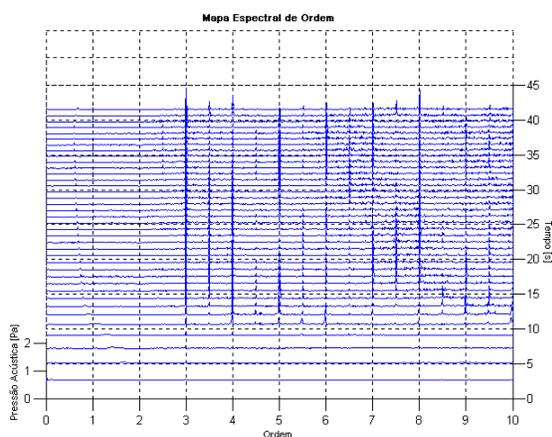


(a)

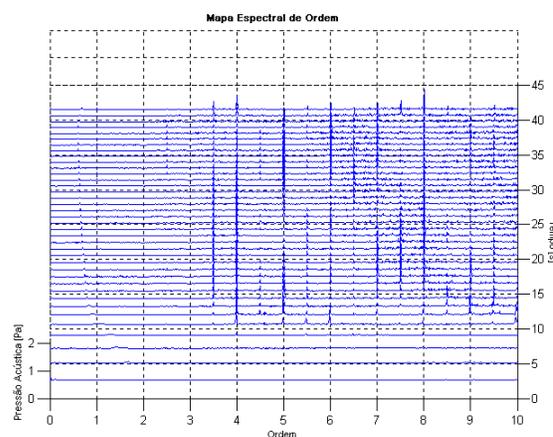


(b)

Figura 6.17: Sinal temporal original e ordem extraída por Vold-Kalman. (a) segunda ordem e (b) terceira ordem.



(a)



(b)

Figura 6.18: Mapa de ordem da pressão sonora obtida pelo método da TVDFT com blocos de 163 revoluções, *overlap* de 50% e janela Hanning, filtradas as ordens (a) 2 e (b) 2 e 3.

6.2. Medição de Deformação em Tampa de Motor de Veículo Automotivo

Neste caso, estuda-se a tampa do motor de um veículo automotivo, ilustrada na Figura 6.19, que, devido aos esforços dinâmicos gerados pelo motor em operação e pelo veículo em movimento, apresentava quebra prematura devido aos níveis excessivos de vibração.

É importante ressaltar que a elaboração dos procedimentos de teste, a escolha dos pontos de medição e a realização de todas as medições foram feitas pela empresa responsável pela

fabricação do motor e, obviamente, também da tampa. Os dados, gentilmente cedidos, tinham todos ótima qualidade e foram muito úteis para a verificação da qualidade dos algoritmos implementados.

Para a realização deste ensaio, a tampa foi instrumentada com quatro extensômetros, cujas localizações podem ser vistas na Figura 6.19, nos locais em que ocorreram as quebras ou que apresentaram elevados níveis de tensões através da análise por elementos finitos. Os dados foram amostrados a uma taxa de amostragem de 2.400 Hz e medidos com a tampa instalada no próprio motor do veículo e em condições operacionais. A velocidade instantânea de rotação do motor está apresentada na Figura 6.20 e verifica-se uma repentina queda da rotação em 1300 rpm causada, provavelmente, pela perda de algum pulso. Os dados temporais da deformação nos quatro pontos medidos estão apresentados nas Figura 6.21. Através destes resultados pode-se perceber que os pontos 3 e 2 apresentaram os maiores níveis de deformação neste ensaio.



Figura 6.19: Tampa do motor de ônibus analisada e localização dos sensores.

A questão que se apresenta neste caso e se estes níveis de deformação estão sendo causados por níveis excessivos de excitação proveniente dos componentes rotativos do motor ou da pista ou pela existência de alguma frequência natural da tampa na faixa de operação. Utilizando o método da TVDFT, obtém-se os mapas de ordem apresentados nas Figuras 6.22. A divisão dos blocos é feita com 84 revoluções com *overlap* de 50% e janela Hanning. Através destes mapas de ordem, pode-se perceber que a maior parte do sinal de deformação é composta por componentes proporcionais a rotação (ordens). A componente na ordem 1,1 é excitada por um compressor fixado junto ao bloco do motor e acionado pelo próprio motor, com uma relação de transmissão em torno de 1,1.

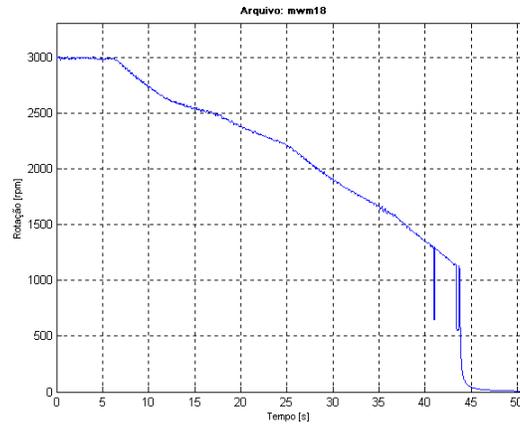
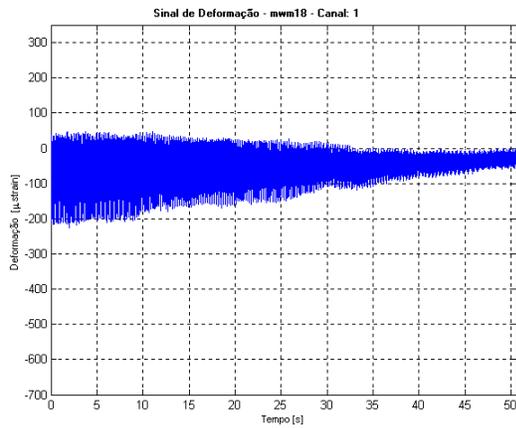
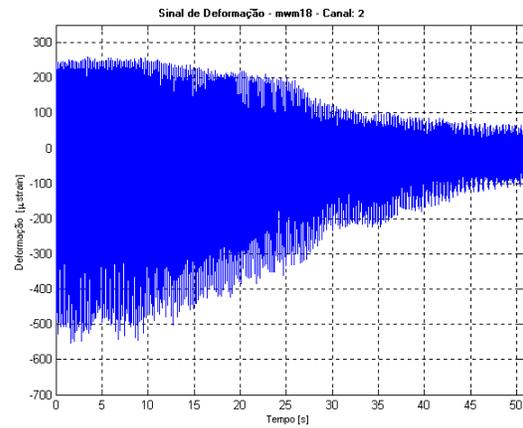


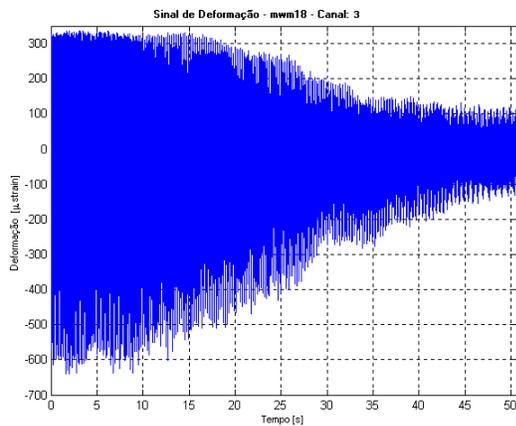
Figura 6.20: Velocidade de rotação do motor.



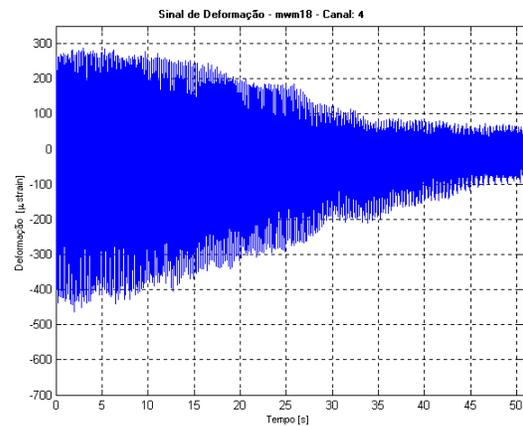
Ponto 1



Ponto 2

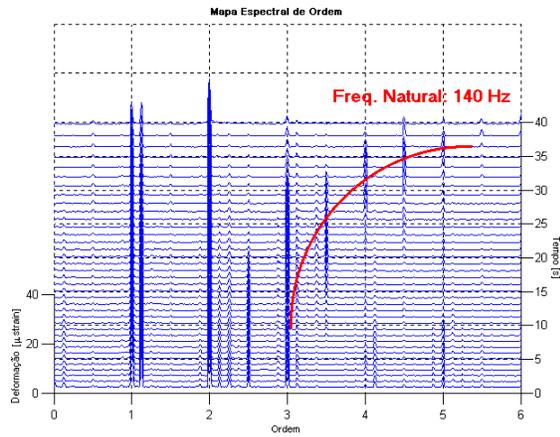


Ponto 3

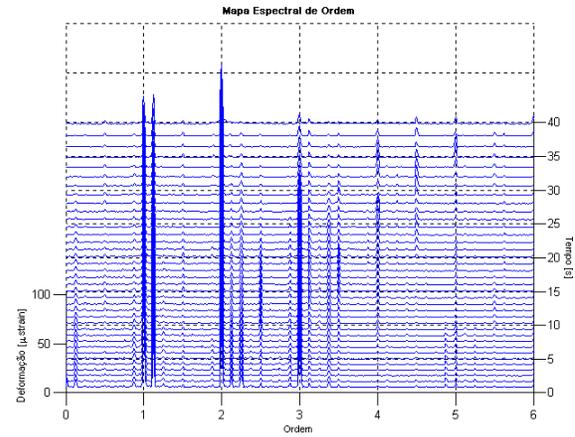


Ponto 4

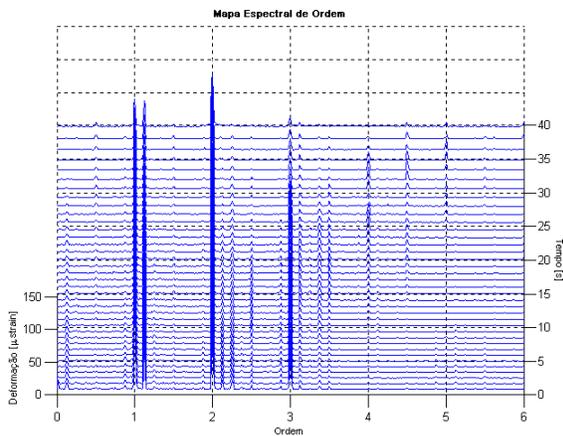
Figura 6.21: Sinal temporal da deformação na tampa do motor nos 4 pontos de medição.



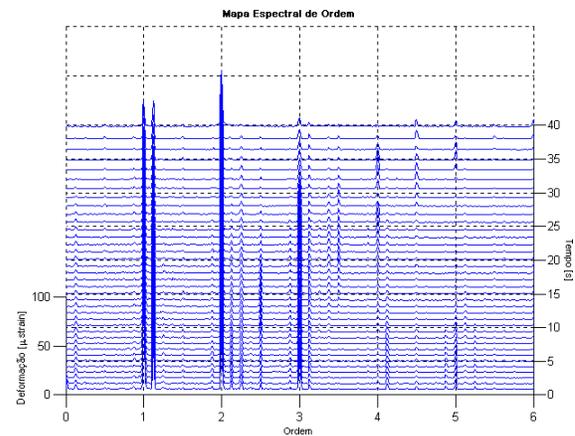
Ponto 1



Ponto 2



Ponto 3



Ponto 4

Figura 6.22: Mapas de ordem das deformações obtidas pelo método da TVDFT com blocos de 84 revoluções, *overlap* de 50% e janela Hanning.

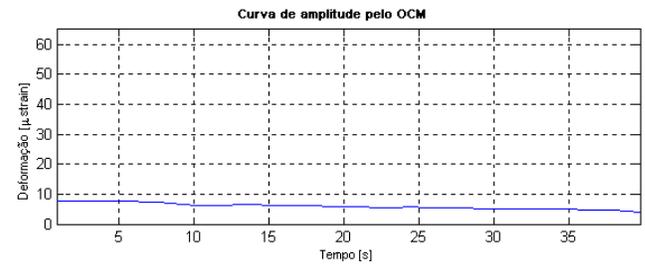
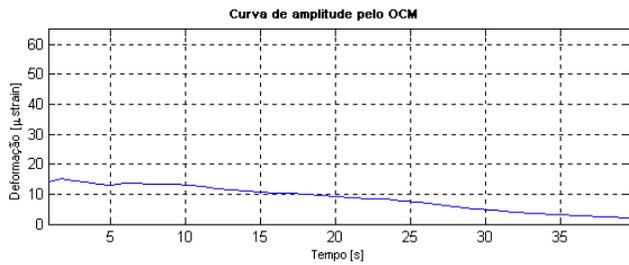
Contudo, é possível observar, na Figura 6.22 – Ponto 1 – principalmente, a existência de uma frequência natural, em torno de 140 Hz, que é excitada por ordens cada vez maiores conforme a rotação do motor diminui. Para verificar a intensidade com que cada ordem contribui no nível global de deformação de cada um dos pontos medidos, e interessante isolar cada uma das ordens mais significativas estimadas. As Figuras 6.23 mostram as amplitudes da primeira e segunda ordens estimadas das medições em cada um dos pontos medidos da tampa.

Como foi visto nesta seção, a identificação das componentes presentes em um sinal (neste caso, de deformação), e a determinação das ordens de maior amplitude, pode auxiliar bastante na

localização das causas de problemas em máquinas e componentes (quebra prematura da tampa do motor, neste exemplo). A mesma idéia pode ser aplicada a outros tipos de sinais, como o de vibração, quando se tem diversas componentes contribuindo ao mesmo tempo para gerar o sinal. Determinam-se as componentes e suas amplitudes, para definir a origem da ordem crítica (de maior valor) e trabalhando sobre ela para reduzir os níveis globais.

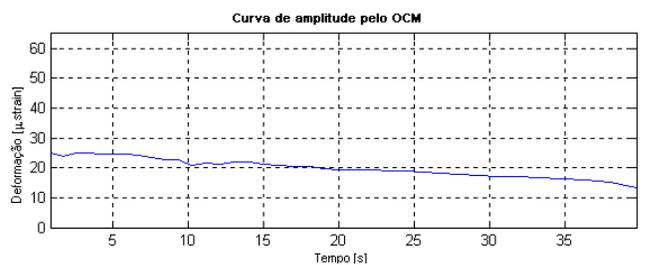
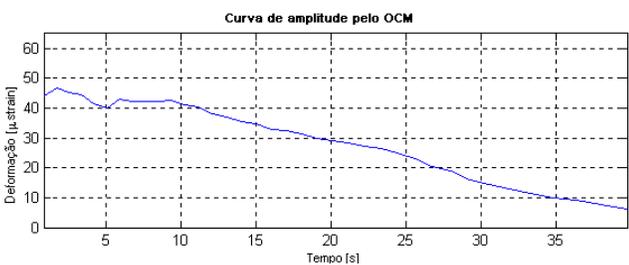
Primeira ordem

Segunda Ordem



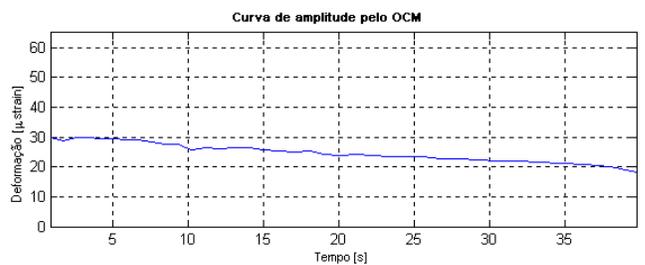
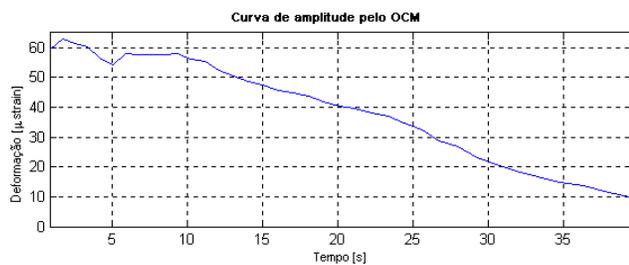
Ponto 1

Ponto 1



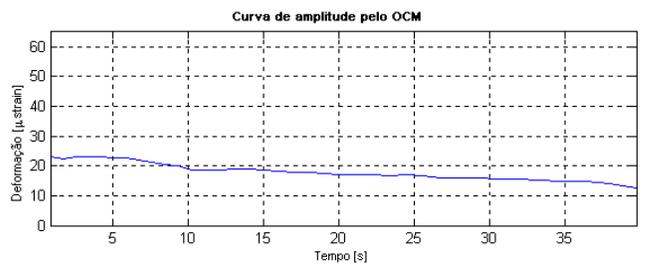
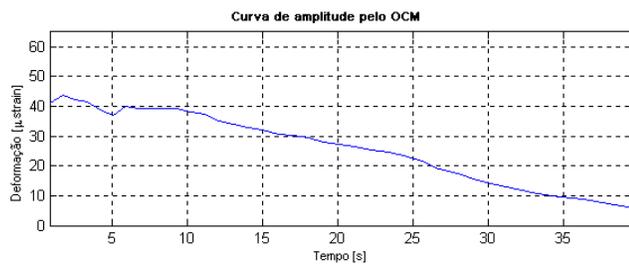
Ponto 2

Ponto 2



Ponto 3

Ponto 3



Ponto 4

Ponto 4

Figura 6.23: Amplitudes da primeira e segunda ordens dos pontos 1 a 4.

6.3. Sistema de bombeamento de água

Nesta secção, analisa-se uma das bombas de um sistema de bombeamento composto por quatro bombas em paralelo (nomeados de A a D), responsáveis pela injeção de água para o interior de um poço de petróleo. Vários ensaios foram realizados com o intuito de verificar o efeito da abertura e fechamento da válvula de acesso à linha (na descarga) no comportamento vibratório da bomba. Durante os ensaios, diversos sinais foram adquiridos (deslocamentos radiais nos LA e LNA da bomba, deslocamento radial do rotor, pressões estáticas e dinâmicas nas tubulações de sucção e descarga da bomba B e rotação), mas são analisados nesta dissertação apenas os sinais de pressão dinâmica na saída (descarga) e entrada (sucção) da bomba. O objetivo deste exemplo é demonstrar a eficácia dos algoritmos implementados neste trabalho – obtenção da velocidade de rotação instantânea e geração dos mapas de ordem.

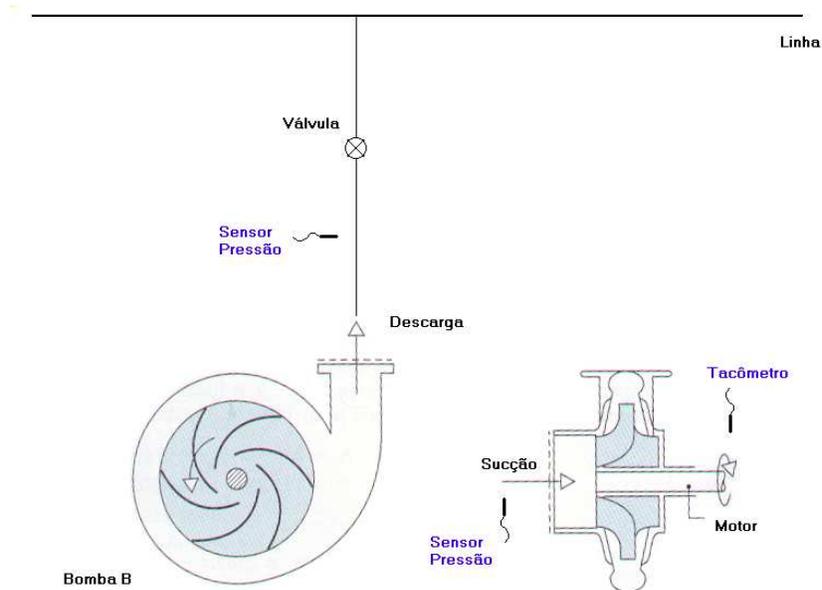
A Figura 6.24 apresentam uma imagem parcial da bomba B e uma vista de parte da instrumentação utilizada nas medições (condicionadores de sinal, sistema de aquisição de dados e gravador analógico).



Figura 6.24: Bomba hidráulica analisada e vista geral da instrumentação utilizada nas medições.

Foram utilizados um sensor magnético como tacômetro, posicionado próximo ao rasgo de chaveta do eixo da bomba no lado acoplado, e dois sensores dinâmicos de pressão da PCB Piezotronics (modelo 113A24 na sucção e 113A22 na descarga). Os sinais foram adquiridos em um gravador Kyowa modelo RTP-610B e, posteriormente, reproduzidos e digitalizados com

frequência de amostragem constante igual a 5000 Hz com uma placa de aquisição da *National Instruments*. Um esquema da posição dos sensores de pressão e velocidade está ilustrado na Figura 6.25.

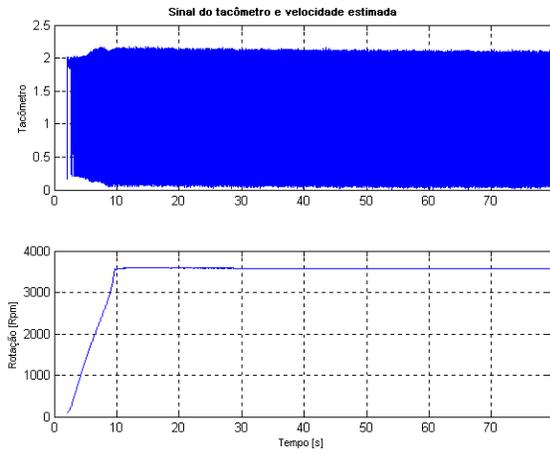


Esquema do Sistema de Bombeamento de Água

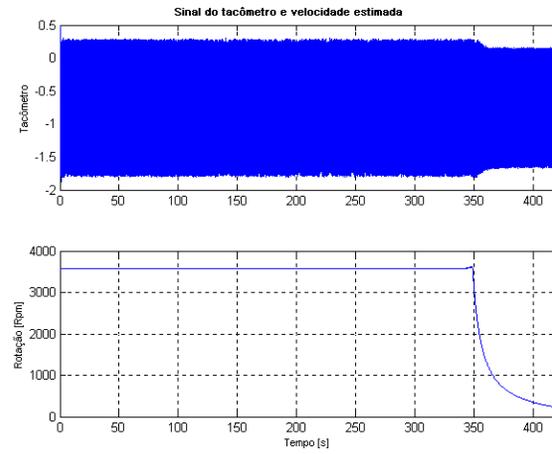
Figura 6.25: Esquema do sistema de bombeamento de água e posicionamento dos sensores.

Na Figuras 6.26 estão os sinais dos tacômetros e as respectivas velocidades instantâneas de rotação. A boa estimativa da rotação, a partir dos dois sinais, deve-se à ótima qualidade do sinal do tacômetro. Os registros temporais da pressão na sucção e descarga durante a partida e parada da bomba são apresentadas nas Figuras 6.27. Pode-se observar claramente que o efeito da abertura da válvula tem uma influência maior sobre a pressão na saída. No caso da parada do sistema, o pulso de pressão verificado na saída continua sendo maior que o da entrada, no entanto, neste caso, a pressão dinâmica atinge valores ainda maiores que no acionamento da bomba. Portanto, a situação mais crítica encontra-se no momento de desligamento o sistema.

As Figuras 6.28 e 6.29 mostram os mapas de ordem dos sinais de pressão de sucção e descarga durante o acionamento e parada da bomba, respectivamente. Como a quantidade de dados amostrados era muito grande e requeria muito tempo de processamento, utilizou-se apenas a TVDFT para a análise de ordem.



(a)



(b)

Figura 6.26: Sinal do tacômetro e estimativa da velocidade de rotação durante a (a) partida e (b) parada da bomba B.

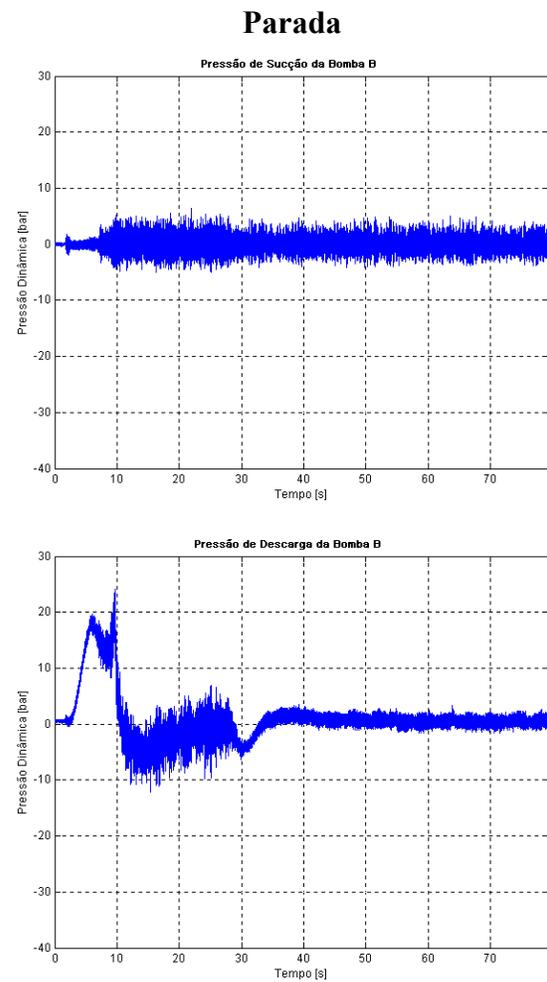
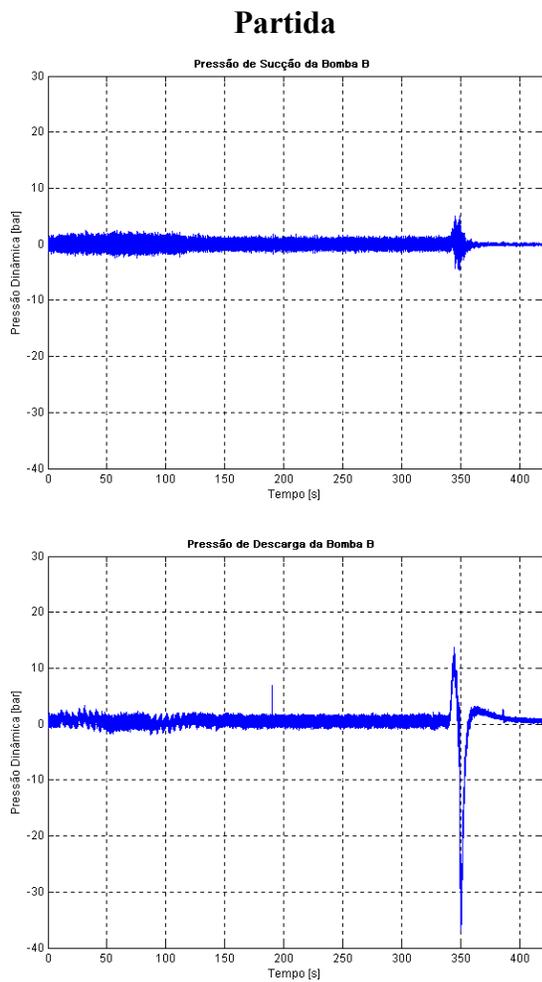


Figura 6.27: Pressões dinâmicas de sucção e descarga medidas na partida e parada da bomba B.

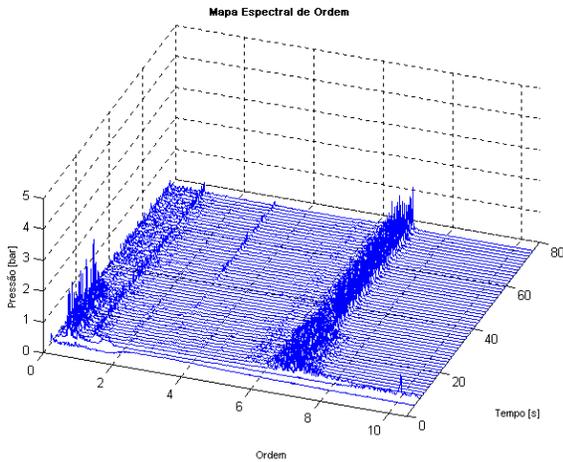
Através das Figuras 6.28 pode-se perceber que a abertura da válvula provoca uma interferência no fluxo dentro da bomba e, principalmente, na tubulação de descarga (ver Figura 6.27) – neste caso com duração aproximada de 30 segundos – que excita fortemente as baixas frequências (ordens mais baixas). Além destas componentes transientes, a sétima ordem surge de forma expressiva. Esta componente está associada à frequência de passagem das pás (*vane passing frequency*). Também se nota uma componente na décima ordem com considerável energia. Na sucção, encontra-se um comportamento similar ao descrito anteriormente. Contudo, entre a sexta e oitava ordens verifica-se a presença de uma nuvem de ordens com amplitude elevada (tal como nas de ordens baixas), mas que se mantém constante ao longo de todo o registro.

No ensaio de parada do sistema, Figura 6.29, a evolução das componentes assemelha-se com a observada no acionamento e abertura da válvula da bomba. Na sucção, percebe-se claramente a presença da primeira ordem e as componentes de baixa ordem no momento de fechamento da válvula (por volta de 350 segundos). Neste caso, é possível verificar a sétima ordem sem o encobrimento da nuvem de ordens, cuja posição está mais próxima e concentrada na sexta ordem. A pressão de descarga possui picos também nas baixas ordens no final do histórico, além da sétima ordem com amplitude menor que nas curvas anteriores. Em contraste, a décima ordem surge com maior amplitude. Observa-se a presença de uma componente na nona ordem, que pouco aparecia na Figura 6.28.

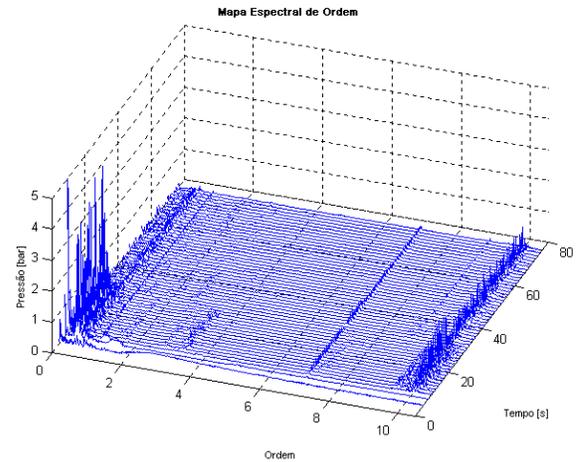
A avaliação destas curvas indica que picos provocados pela abertura ou fechamento da válvula aparecem nas ordens menores que um, sem que haja alterações significativas de amplitude nas outras componentes.

6.4. Motor a Combustão

Com o intuito de demonstrar a utilidade do procedimento apresentado no Capítulo 3 deste trabalho, apresenta-se, a seguir; um exemplo de análise de ordem sem a medição do sinal de um tacômetro. A velocidade instantânea de rotação, essencial para a realização da *Order Tracking*, é obtida, neste caso, através da análise tempo-frequência dos próprios sinais de vibração medidos. Este tipo de metodologia é adequado – ou talvez a única opção – em casos em que é difícil ou impossível instalar algum sensor no equipamento para obter um sinal de referência.

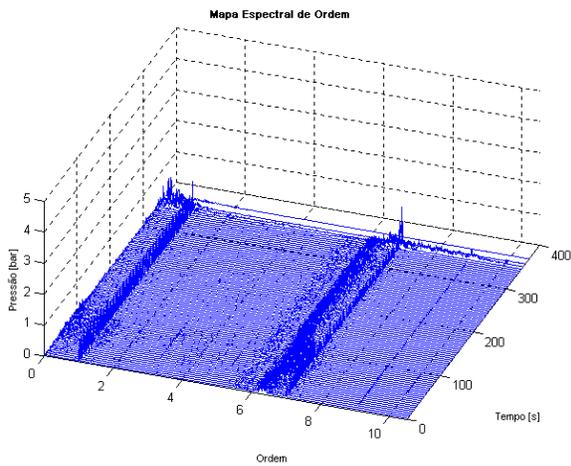


(a)

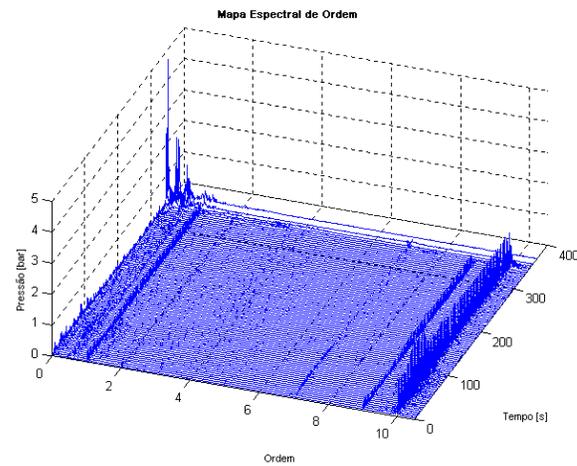


(b)

Figura 6.28: Mapa de ordem da pressão na (a) sucção e (b) descarga na partida da bomba B obtida pelo método da TVDFT com blocos de 120 revoluções, sem *overlap* e janela Hanning.



(a)



(b)

Figura 6.29: Mapa de ordem da pressão na (a) sucção e (b) descarga na parada da bomba B obtida pelo método da TVDFT com blocos de 241 revoluções, sem *overlap* e janela Hanning.

A Figura 6.30(a) mostra o veículo utilizado neste ensaio bem como um sistema de referência indicando as três direções adotadas no texto, que são: longitudinal – x, transversal – y e vertical – z. Para medição dos níveis de vibração do motor deste veículo foi instalado um acelerômetro triaxial sobre o cabeçote, conforme ilustra a Figura 6.30(b). O ensaio consistiu simplesmente de acelerações do motor (desengatado) da rotação de marcha lenta até a rotação máxima e retorno à marcha lenta.

A Figura 6.31 esquematiza o processo de aquisição dos sinais do acelerômetro triaxial. Os sinais de vibração foram adquiridos por uma placa de aquisição da *National Instruments*, de 16 canais, modelo MIO-16/LPM-16 controlada a partir de um PC com Matlab v.5.1 e *toolbox* de aquisição de dados. O transdutor usado foi um acelerômetro ICP da PCB *Piezotronics* modelo N° 356A11 S/N 7601 com sensibilidade de 1,020 mV/g na direção x, 1,027 mV/g na direção y e 0,9410 mV/g em z.



Figura 6.30: Carro utilizado no experimento com indicação dos eixos x (longitudinal), y (transversal) e z (vertical) e posição do acelerômetro triaxial fixado no cabeçote motor.

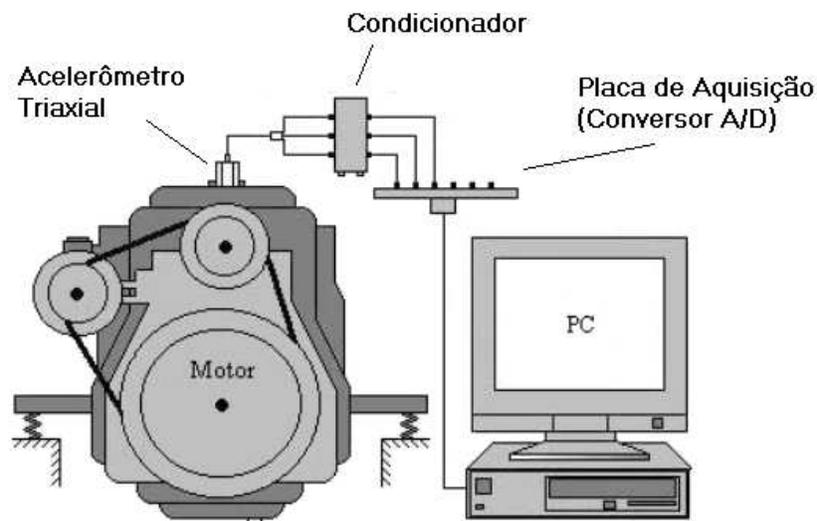


Figura 6.31: Esquema de uma aquisição da vibração do motor via placa de aquisição.

A obtenção da velocidade instantânea pela distribuição *Directional Smoothed Wigner*, como indicado no trabalho de Han (1999), requer uma grande capacidade de processamento, seja em velocidade ou em memória RAM. Portanto, nas condições disponíveis para o processamento dos dados deste trabalho foi preciso estima-los em partes, utilizando um número de pontos mínimos de forma a poder completar a análise. Além da versão *smoothed* desta distribuição, também foi utilizada a distribuição de Wigner Direcional. A diferença entre os métodos é que a primeira utiliza uma janela de observação no processamento dos dados melhorando a identificação da componente ao longo do tempo (ver Miranda, 2002). As Figuras 6.32 ilustram os mapas tempo-freqüência gerados pelas distribuições de Wigner Direcional e *Smoothed Wigner Direcional*, utilizando os sinais de vibração nas direções vertical e longitudinal. Pode-se perceber que a componente de duas vezes a rotação aparece mais nítida (devido a duas explosões por ciclo do motor – 4 tempos), em todos os instantes de tempo, na distribuição fornecida pela *Smoothed Wigner Direcional*. Por este motivo, a estimativa da rotação instantânea do motor gerada por esta distribuição foi utilizada para a obtenção dos mapas de ordem dos sinais de vibração. Vale ressaltar que foram utilizadas outras combinações de direções (vertical/transversal e longitudinal/transversal) na estimativa da freqüência instantânea mas os resultados foram muito parecidos e, por isso, não são apresentados.

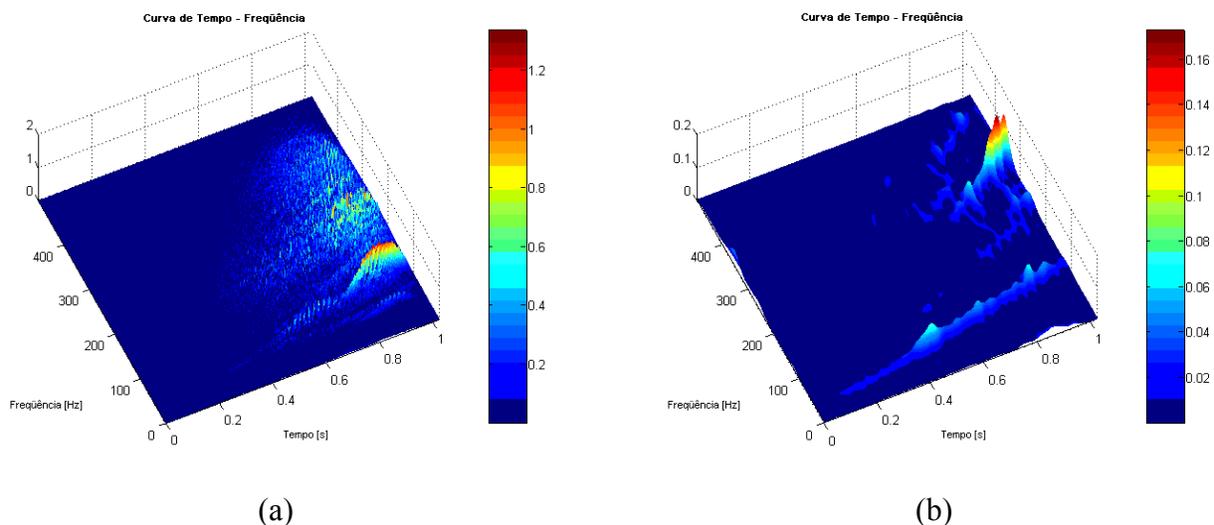


Figura 6.32: Mapas tempo-freqüência, utilizando os sinais de vibração nas direções vertical e longitudinal, gerados pela distribuição (a) Wigner Direcional e (b) *Smoothed Wigner Direcional*.

Para gerar a curva completa de velocidade instantânea, o sinal completo foi processado em partes de 1024 pontos, num total de 8 blocos, e utilizou-se aproximação por um polinômio de ordem cinco. Devido a este processamento independente dos blocos, a intersecção entre as partes não é contínua, e por isso teve que ser melhorada a partir de um ajuste polinomial ou *spline* na região da descontinuidade. Isto ocorre por causa da imprecisão do método nos valores iniciais e finais da análise e não por descontinuidades na curva de rotação x tempo. O resultado final está apresentado na Figura 6.33.

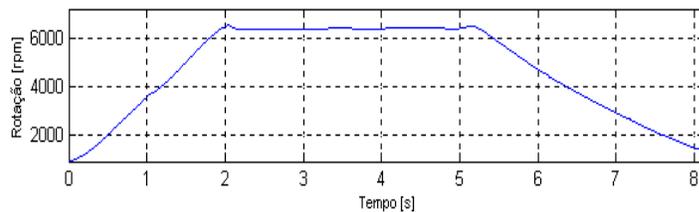
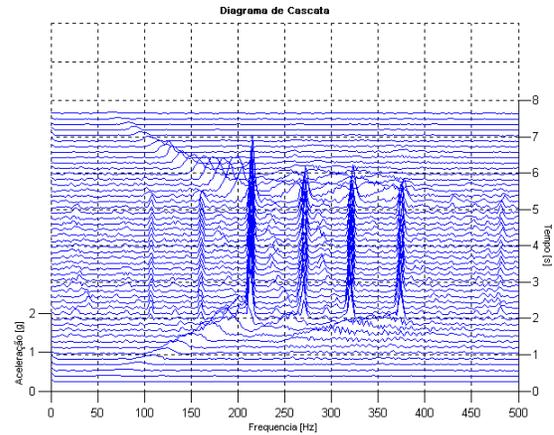
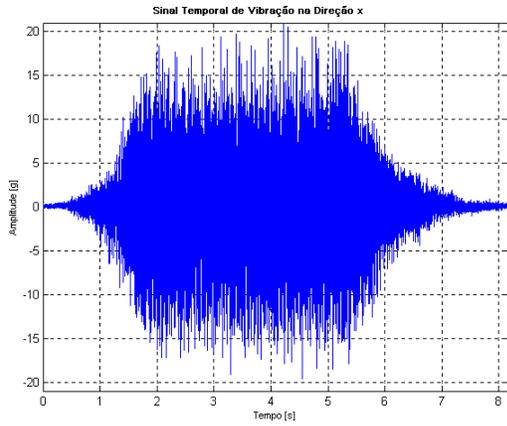


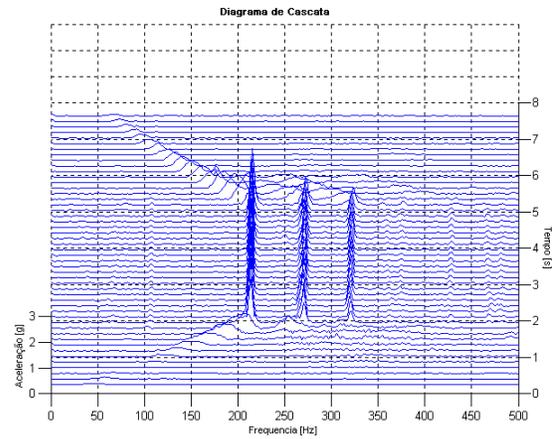
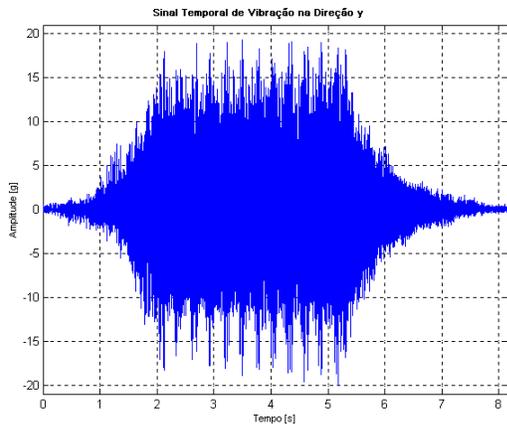
Figura 6.33: Estimativa da rotação instantânea a partir da distribuição *Smoothed Wigner Direcional*.

As Figuras 6.34 mostram os registros temporais dos sinais de vibração (aceleração) para as direções x, y e z, e os diagramas de cascata para estas mesmas direções. Os mapas de ordem obtidos pela Reamostragem Digital – utilizando-se 800 pontos por bloco, com *overlap* de 25%, janela Hanning, filtrado na oitava ordem por um filtro passa-baixa, discretização em ordem de 0,025 com ordem máxima de 10 – e pela TVDFT – usando-se 109 revoluções, com *overlap* de 25%, janela Hanning, com precisão de 0,01 e ordem máxima de 10 – são apresentados nas Figuras 6.35. Percebe-se uma boa semelhança entre os mapas de ordem obtidos pelos dois métodos e a forma que eles se apresentam indicam que a estimativa da velocidade de rotação do motor foi feita com precisão.

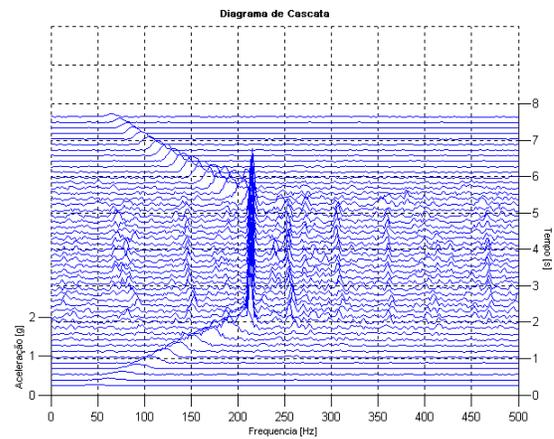
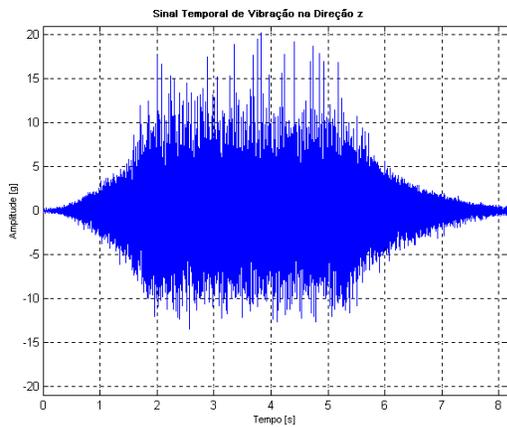
Também foram comparadas as amplitudes das ordens 2, 2,5, 3 e 3,5 obtidas pelos métodos da Reamostragem Digital e TVDFT (resultado não apresentado neste trabalho). Após a aplicação da Matriz de Ortogonalidade (OCM) nas ordens estimadas por este último método, obteve-se uma considerável aproximação das amplitudes de todas as ordens geradas por ambos os métodos.



Direção Longitudinal (x)



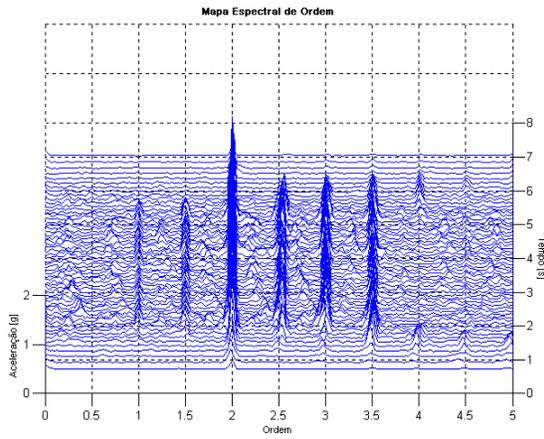
Direção Transversal (y)



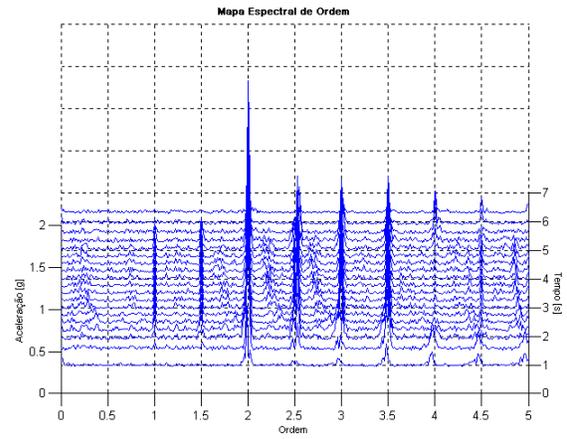
Direção Vertical (z)

Figura 6.34: Vibração do veículo em cada direção, estimativa da rotação e respectivo diagrama em cascata gerada com 512 pontos por bloco, *overlap* de 30% e janela Hanning.

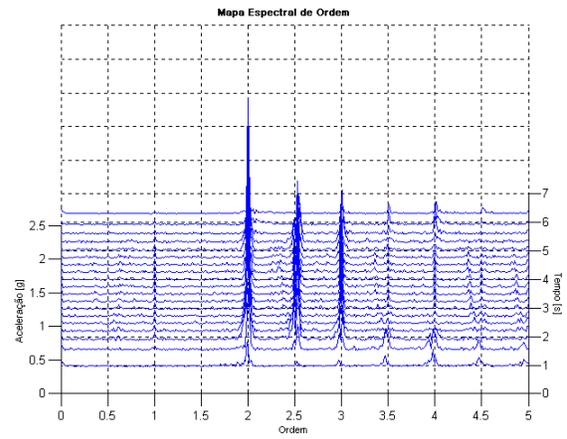
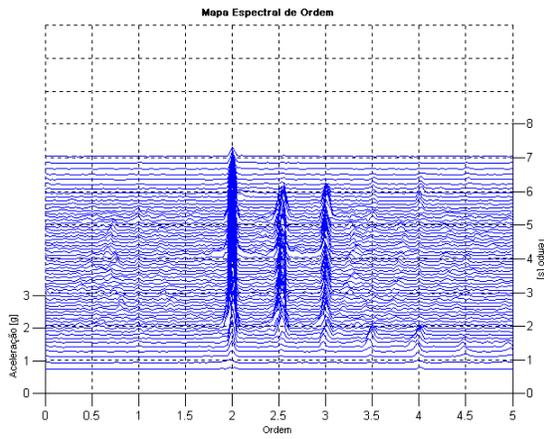
Reamostragem Digital



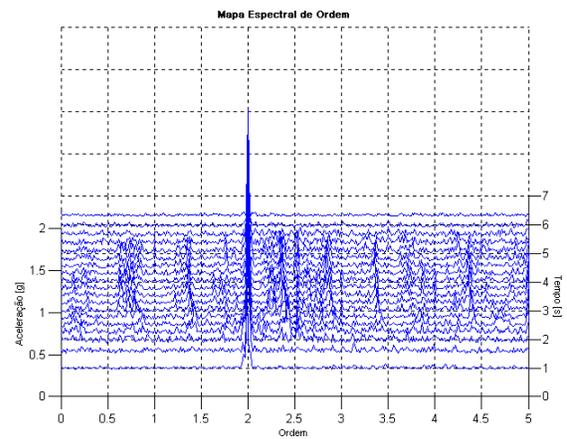
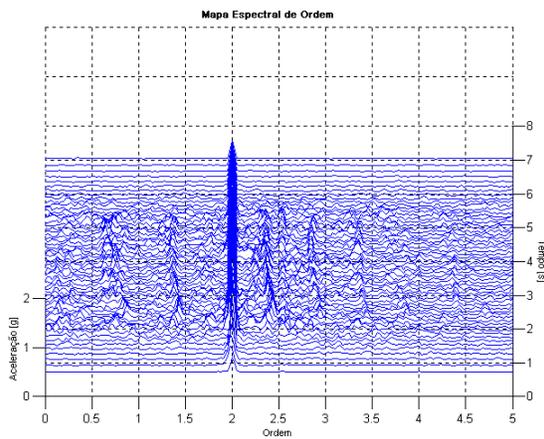
TVDFFT



Direção Longitudinal (x)



Direção Transversal (y)



Direção Vertical (z)

Figura 6.35: Mapas de ordem obtidos pelos métodos da Reamostragem Digital com blocos de 800 pontos, e TVDFFT com blocos de 109 revoluções, ambos com *overlap* de 25% e janela Hanning.

6.5. Conclusão

O conjunto de medições experimentais, citados neste capítulo, mostra o uso dos métodos de *Order Tracking* para diversos tipos aplicações no dia a dia das empresas. Os resultados obtidos dos algoritmos permitem ao usuário ter conhecimento da amplitude de cada uma das componentes relacionadas com a rotação da máquina, não apenas do valor, mas a forma com que se altera a cada instante de tempo. Este tipo de análise nos diagramas de cascata é muito difícil de ser feito pela proximidade entre as ordens nas baixas rotações ou em seguir uma determinada ordem.

Os mapas de ordem obtidos pela Reamostragem Digital e TVDFT diferem em amplitude, mas após o pós-processamento da OCM sobre as ordens estimadas da TVDFT, esta diferença diminui sensivelmente. Apesar de não ser possível fazer uma análise quantitativa pelo mapa da TVDFT, o método ainda é vantajoso pela rapidez no processamento. Outro ponto importante está na confiabilidade da amplitude da ordem na curva bidimensional em relação ao método comercial (baseado na reamostragem), tendo grandes aplicações em avaliações na acústica ou em sinais de deformação, como discutido nas seções anteriores.

A eficiência da filtragem de componentes por Vold-Kalman é apresentada nos sinais acústicos da embreagem, e comprovada pela amplitude/ fase obtida pelo mapa da TVDFT, cuja ordem filtrada é eliminada. Apesar de ter sido utilizado a filtragem juntamente com as técnicas de *Order Tracking*, elas não necessariamente dependem uma da outra. Os métodos de filtragem têm características próprias que permitem fazer diversas análises independentemente como é o caso da análise modal realizada em estruturas ou máquinas em operação em que é possível eliminar qualquer influência da rotação nos sinais de força e resposta medidos, restando somente a resposta devido à excitação aplicada pelo excitador eletromagnético (*shaker*).

Em duas das medições analisadas, usa-se o processamento do tacômetro do Capítulo 3. A estimativa da rotação é calculada com boa precisão na maioria dos sinais, apesar de ter pequenas flutuações por causa da taxa de amostragem, que não foi suficiente para descrever corretamente a posição dos pulsos nas altas rotações. Ainda assim, estas não influenciaram nas ordens estimadas nos mapas.

O procedimento de estimação da frequência instantânea apresentado no Capítulo 3 é utilizado no processamento de dados de aceleração adquiridos do motor de um veículo. Os mapas de ordem são obtidos com sucesso para os métodos da Reamostragem Digital e TVDFT. A metodologia testada indica a possibilidade de reunir duas formas de processamento distintas, o tempo-frequência e análise de ordem, com ótimos ganhos pela eliminação da necessidade do sinal de tacômetro, que representa um custo a mais de tempo e recursos para sua instalação, calibração e processamento.

Capítulo 7

Conclusão e Perspectivas Futuras

7.1. Conclusão e Comentários

Neste trabalho buscou-se apresentar as técnicas relacionadas com o domínio da ordem, que fundamentalmente fazem a conversão de sinais do domínio do tempo para o do ângulo, e têm diversas vantagens, tais como: uma melhor visualização das componentes que variam com a rotação da máquina ou componente rotativo, sendo possível segui-las em amplitude e fase; identificação do instante de tempo ou velocidade de rotação em que ocorrem picos de amplitude, entre outras. Neste tipo de sinal, em que a frequência varia com o tempo, a análise torna-se muito complexa e ineficiente quando utilizadas ferramentas tradicionais de processamento de sinais, como a Transformada Rápida de Fourier.

Três algoritmos de cálculo dos mapas de ordem – Reamostragem Digital, *Order Tracking Computacional* e TVDFT (Transformada de Fourier Discreta Variante no Tempo) – foram implementados e testados, sendo que os resultados simulados e experimentais mostram-se bons para as três técnicas. O valor de amplitude decomposta das ordens estimadas pelos métodos da *Order Tracking Computacional* e Reamostragem Digital é muito próximo, como já era esperado, uma vez que se diferenciam apenas na forma de cálculo do tempo de reamostragem (processo de interpolação para um intervalo angular constante). Por outro lado, as amplitudes no mapa de ordem da TVDFT diferem dos métodos baseados na reamostragem devido à influência entre as ordens estimadas, mas esta diferença pode ser minimizada ou eliminada através da OCM (Matriz de Compensação Ortogonal) que considera a ortogonalidade das ordens.

Verifica-se que a TVDFT tem uma performance na velocidade de processamento muito superior ao da Reamostragem Digital. Isto está relacionada com os processos de interpolação usados na amostragem síncrona, que não é requerida na TVDFT, uma vez que o método atua diretamente sobre o sinal original, de taxa de amostragem temporal constante. O ganho no processamento abre espaço para que análises de vários sinais adquiridos simultaneamente sejam viáveis, isto é, aquisição de múltiplos canais de medição. Esta é uma das limitações dos procedimentos baseados na reamostragem.

Ao contrário dos métodos de *Order Tracking* que apresentam os resultados no domínio da ordem, as técnicas de filtragem adaptativa baseadas na formulação do filtro de Kalman são capazes de extrair de um sinal cada uma das ordens no domínio do tempo. Neste trabalho foram implementados os filtros de Kalman e Vold-Kalman, os quais revelaram-se particularmente eficientes na extração de uma componente de ordem de um sinal. O filtro de Vold-Kalman obteve resultados ainda melhores que o primeiro, evitando muitas de suas restrições quanto à decomposição de ordens próximas. Os filtros são influenciados pelo valor de HCF que o usuário adota (termo de incerteza da participação da ordem filtrada no conjunto do sinal completo). Quanto menor esse número, mais rápido o filtro atua sobre o sistema, possibilitando-o de estimar mudanças mais bruscas de amplitude ou frequência. Entretanto, mesmo variando largamente este parâmetro, o filtro de Kalman apenas atenua as ordens, enquanto que o filtro de Vold-Kalman elimina-as totalmente.

Acredita-se que os objetivos estabelecidos para esta dissertação de mestrado foram cumpridos integralmente e de forma satisfatória. Dois tópicos se destacam no conteúdo deste trabalho, pelo seu caráter inovador, que são: a *Order Tracking* Direcional e o método alternativo para obtenção da velocidade de rotação instantânea através das distribuições tempo-frequência direcionais. O trabalho contribui ainda com resultados que servem de base aos pesquisadores/engenheiros que tencionam utilizar as técnicas de filtragem adaptativa e *Order Tracking* no desenvolvimento de novos trabalhos. Além disso, os algoritmos aqui implementados e testados já estão servindo de ferramentas de análise e tratamento de dados para outras pesquisas atualmente em desenvolvimento no grupo de trabalho do DPM, como a estimação das características dinâmicas de sistemas rotativos, a identificação de defeito em máquinas a partir da *Order Tracking* direcional, entre outras

7.2. Trabalhos Futuros

Como já foi discutido, este trabalho representa um passo inicial para que pesquisas mais profundas com integração de outras áreas possam ser realizadas. A seguir apresentam-se algumas perspectivas de trabalhos futuros:

- utilizar os filtros de Kalman e Vold-Kalman em conjunto com ferramentas e métodos da acústica/ psicoacústica. Esse tipo de análise permite que uma determinada componente seja suprimida do sinal sonoro original pelo processo de filtragem e verificar deste resultado, de quanto foi à melhora subjetiva na audição humana; ou mesmo identificar sinais que causam não apenas desconforto acústico, mas atinjam níveis perigosos à saúde humana. Isto deve ser realizado por métodos que convertam impressões subjetivas (audibilidade, altura e timbre) em parâmetros mais objetivos.
- obter os parâmetros modais de uma estrutura a partir da resposta ao desbalanceamento, também usando os filtros de Kalman para isolar a primeira ordem (relacionada com o desbalanceamento). Além da análise temporal, é possível, com o auxílio de métodos na frequência, extrair parâmetros dos mapas de ordem. Um procedimento com estas medidas pode servir de controle da manutenção em equipamentos industriais mesmo durante a sua operação, pois a excitação do sistema vem do funcionamento da máquina.
- ainda que as curvas de tempo-frequência sejam usadas neste trabalho para estimar a rotação no lugar do sinal do tacômetro, melhores resultados e performances podem ser obtidas com outras técnicas de estimativa da frequência instantânea diretamente do *kernel* (núcleo) das distribuições tempo-frequência ou técnicas como as discutidas no início do trabalho, desenvolvido pelos pesquisadores da Volvo.
- pela *Order Tracking Direcional*, espectro completo com ordens negativas e positivas, consegue-se verificar a presença de precessão direta e retrógrada de componentes rotativos. Como determinados defeitos em máquinas excitam de forma diferenciada os movimento de precessão, é possível definir uma metodologia para identificar defeitos no monitoramento e diagnóstico de máquinas, tais como: roçamento entre rotor e estator ou carcaça, trincas em eixos, entre outros.

- durante o processamento do sinal do tacômetro, estima-se a velocidade de rotação da máquina ou componente rotativo, e em um passo posterior, a posição angular do eixo a partir de uma integração numérica. Já que é possível estimar a cada instante de tempo a posição do eixo, então, medindo-se em mais pontos, pode-se obter o movimento relativo entre as diversas estações (locais medidos) e realizar a análise de vibração torcional em sistemas girantes (este trabalho já está em desenvolvimento).
- uma questão que ainda precisa ser mais bem estudada na técnica da TVDFT é o limite máximo de ordem que pode ser estimado e a mínima discretização em ordem. Esta análise não é clara, uma vez que a amostragem em ângulo não é uniforme no bloco, de forma que não é possível utilizar uma relação direta entre ângulo e ordem como na Reamostragem Digital. Os trabalhos que citam o método não indicam a forma de determinar estes limites, sendo preciso estudá-los com mais cuidado.

Referência Bibliográfica

- ALLMAN-WARD, M., BALAAM, M. P., WILLIAMS, R. Source decomposition for vehicle sound simulation. *NVD Technical Paper*, 2002.
- BANDHOPADHYAY, D. K., GRIFFITHS, D. Methods for analyzing order spectra. In: *Proceedings of the Noise and Vibration Conference*, SAE Technical Paper 951273, p. 313-318, Traverse City, MI, USA, 1995.
- BLOUGH, J. R., BROWN, D. L., VOLD, H. Order tracking with time variant discrete Fourier transform. In: *Proceedings of the 21st International Seminar of Modal Analysis - Noise and Vibration Engineering*, p. 1515-1525, Leuven, Belgium, 1996.
- BLOUGH, J. R., BROWN, D. L., VOLD, H. The time variant discrete Fourier transform as an order tracking method. In: *Proceedings of the Noise and Vibration Conference*, SAE Technical Paper 972006, p. 1073-1081, Traverse City, MI, USA, 1997.
- BLOUGH, J. R., VANKARSEN, C. Independent operating shape determination on rotating machinery, based on order track measurements. In: *Proceedings of the 16th Annual International Modal Analysis Conference*, p. 1516-1525, Santa Barbara, USA, Feb. 1998.
- BLOUGH, J. R. *Improving the analysis of operating data on rotating automotive components*. 1998. 210p. Tese (Doutorado) – Department of Mechanical, Industrial, and Nuclear Engineering of the College of Engineering, University of Cincinnati, Cincinnati.

- BLOUGH, J. R., GWALTNEY, G. Post-processing analysis of large channel count order track tests and estimation of linearly independent operating shapes. In: *Proceedings of the Noise and Vibration Conference*, SAE Technical Paper 1999-01-1827, p. 1-9, Traverse City, MI, USA, 1999a.
- BLOUGH, J. R., GWALTNEY, G. Development of an FRF based order tracking technique to separate close and/ or crossing orders. In: *Proceedings of the Noise and Vibration Conference*, SAE Technical Paper 1999-01-1828, p. 1-6, Traverse City, MI, USA, 1999b.
- BLOUGH, J. R., BROWN, D. L. Separating close and crossing orders with frequency domain order tracking. In: *Proceedings of the 17th Annual International Modal Analysis Conference*, p. 1113-1118, Orlando, USA, 1999c.
- BOSSLEY, K. M. Hybrid computed order tracking. *Mechanical System and Signal Processing*, v.13, (4), p. 627-641, 1999.
- BUCHER, I., EWINS, D. J. Modal analysis and testing of rotating structures. *Phil. Trans. Roy. Society Lond. A*, 359, p. 61-96, 2001.
- COHEN, L. *Time-frequency analysis*. New Jersey, Prentice-Hall, 1995, 299p.
- FYFE, K. R., MUNCK, E. D. S. Analysis of Computed Order Tracking. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.11, (2), p. 187-205, 1997.
- GOLDMAN, P., MUSZYNSKA, A. Application of full spectrum to rotating machinery diagnostics. *Orbit*, Bently Nevada Corporation, v.19, n.1, p. 17-21, 1999.
- HÅKANSSON, H., LAGÖ, T., OLSSON, S. A non-tachometer based order analysis method for interior noise measurements in cars. In: *Proceedings of the 12th Annual International Modal Analysis Conference*, p. 1491-1495, Hawaii, USA, Feb. 1994.

- HAN, Y., LEE, C. Directional Wigner distribution for order analysis in rotating/ reciprocating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.13, (5), p. 723-737, 1999.
- HERLUFSEN, H. Bruel & Kjaer Sales training note: digital tracking using the 3550. Denmark, *Bruel & Kjaer Note*, 1993.
- HERLUFSEN, H., et al. Characteristics of the Vold/Kalman order tracking filter. In: *Proceeding of the 17th Annual International Modal Analysis Conference*, Orlando, USA, 1999.
- HEWLETT-PACKWARD COMPANY, Palo Alto, CA, Ronald W. Potter. *Tracking and resampling method and apparatus for monitoring the performance of rotating machines*. I. C. G06F 015/46; G01H 001/00 USA n.4,912,661. March 27, 1990.
- HUSSAIN, Z. M., BOASHASH, B. Multicomponent IF estimation: a statistical comparison in the quadratic class of time-frequency distributions. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, p. 5091-5102, Sydney, Australia, 2001.
- JOH Y. D., LEE C. W. Excitation methods and modal parameter identification in complex modal testing of rotating machinery. *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, p. 179-203, v. 8, n. 3, Jul. 1993.
- KALMAN, R., E. A New approach to linear filtering and prediction problems. Transaction of the ASME, *Journal Basic Engineering*, 82, p. 32-45, 1960.
- KALMAN, R., E., BUCY, R. S. New results in linear filtering and prediction theory. Transaction of the ASME, *Journal Basic Engineering*, 83, p. 95-108, 1961.
- LALANNE, M., FERRERIS, G. *Rotordynamics prediction in engineering*. John Wiley & Sons, 1990.

- LEE, C. W., JOH, C. Y. Development of the use of directional frequency response functions for the diagnosis of anisotropy and asymmetry in Rotating Machinery: Theory. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.8, (6), p. 665-678, 1994.
- LEURIDAN, J., VAN DER AUWERAER, H., VOLD, H. The analysis of nonstationary dynamic signals. *Sound and Vibration Magazine*, p. 14-26, Aug. 1994.
- LEURIDAN, J., et al. High resolution order tracking using Kalman tracking filters – Theory and Applications. In: *Proceedings of the Noise and Vibration Conference*, SAE Technical Paper 951332, Traverse City, MI, USA, 1995.
- MCDONALD, D., GRIBLER, M. Digital resampling a viable alternative for order domain measurements of rotating machinery. In: *Proceedings of the 9th Annual International Modal Analysis Conference*, part 2, p. 1270-1275, Florence, Italy, April 1991.
- MIRANDA, U. A. *Aplicação de métodos de análise Tempo-Frequência ao estudo de sistemas rotativos*. 2002. 123p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- OPPENHEIM, A. V., SCHAFER, R. W. *Discrete-time signal processing*. New Jersey, Prentice-Hall, 1989, 879p.
- POTTER, R., GRIBLER, M. Computed order tracking obsoletes older methods. In: *Proceedings of the Noise and Vibration Conference*, SAE Technical Paper 891131, p. 63-67, Traverse City, MI, 1989.
- POTTER, R. A new order tracking method for rotating machinery. *Sound and Vibration Magazine*, p. 30-34, Sep. 1990.
- QIU, L., KOT, A. C., LUM, S. H. Comparative study of some discrete instantaneous frequency estimators. *IEEE*, 95TH8061, p. 608-612, 1995.

- RABINER, L. R. *Digital signal processing*. Ieee Audio and Electroacoustic Group, 1994, 518p.
- RABINOWICZ, E. *Physical measurement and analysis*. Addison-Wesley Publishing Co, Inc. Philipines, 1970.
- VAN DE PONSEELE, P., VAN DER AUWERAER, H., MERGEAY, M. Performance evaluation of advanced signature analysis techniques. In: *Proceeding of the 7th International Modal Analysis Conference*, p. 154-158, Las Vegas, USA, 1989.
- VAN DER AUWERAER, H., et al. A global approach to the acquisition and analysis of harmonic waveforms. In: *Proceeding of the 7th International Modal Analysis Conference*, p. 1290-1299, Las Vegas, USA, 1989.
- VAN DER AUWERAER, H., LEURIDAN, J., VOLD, H. The analysis of nonstationary noise and vibration signals. *Proceedings of the 19th International Seminar of Modal Analysis*, p. 385-405, Leuven, Belgium, 1994.
- VOLD, H., CROWLEY, J., NESSLER, J. Tracking sine waves in systems with high slew rates. In: *Proceeding of the 6th International Modal Analysis Conference*, p. 189-193, Orlando, Florida, USA, 1988.
- VOLD, H., LEURIDAN, J. High resolution order tracking at extreme slew rates, using Kalman tracking filters. In: *Proceedings of the Noise and Vibration Conference*, SAE Technical Paper 931288, Tranverse City, MI, USA, 1993.
- VOLD, H., MAINS, M., BLOUGH, J.R. Theoretical foundations for high performance order tracking with the Vold-Kalman filter. In: *Proceedings of the Noise and Vibration Conference*, SAE Technical Paper 972007, Traverse City, MI, USA, 1997a.
- VOLD, H., et al. Multi axle order tracking with the Vold-Kalman tracking filter. *Sound and Vibration Magazine*, p.30-34, May 1997b.

VOLD, H., DEEL, J. Vold-Kalman order tracking: new methods for vehicle sound quality and drive-train NVH applications. In: *Proceedings of the Noise and Vibration Conference*, SAE Technical Paper 972033, Traverse City, MI, USA, 1997c.