

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DETECÇÃO E ANÁLISE DINÂMICA DE FALHAS EM ROLAMENTOS

Antonio Almeida Silva, Eng. M. Sc.



Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Mario Francisco Mucheroni

São Carlos
1999



Class.	TCCF-EESC
Curt.	5482
Tombo	0041/99

31100006842

S/S 1030196

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S586d Silva, Antonio Almeida
Detecção e análise dinâmica de falhas em
rolamentos / Antonio Almeida Silva. -- São Carlos,
1999.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Mario Francisco Mucheroni.

1. Manutenção preditiva. 2. Análise de vibração.
3. Falhas em rolamentos. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ANTONIO ALMEIDA SILVA**

Tese defendida e aprovada em 10.02.1999
pela Comissão Julgadora:



Prof. Doutor **MARIO FRANCISCO MUCHERONI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Titular **ROSALVO TIAGO RUFFINO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **BENEDITO DI GIACOMO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



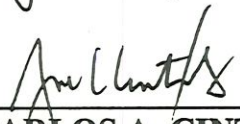
Prof. Doutor **LINILSON RODRIGUES PADOVESE**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



Prof. Titular **FRANCISCO PAULO LÉPOIRE NETO**
(Universidade Federal de Uberlândia - UFU)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus pais (*in memoriam*)

À minha esposa Soniete e nossos filhos Ítalo, Ettore e Pedro, pelo incentivo e apoio dados durante esta agradável estadia em São Carlos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. **Mario Francisco Mucheroni**, pela orientação, postura profissional e ensinamentos transmitidos ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Aos professores colaboradores **Benedito di Giacomo**, **Paulo Sérgio Varoto** e **Paulo Selegim Jr.** pelas discussões proveitosas ao longo do trabalho.

Aos colegas de laboratório **Helder Barbieri Lacerda**, **Roberto Hideaki Tsunaki**, **Luiza Yoko Taneguti**, **Fernando Garcia Santoro**, **Aguinaldo Soares de Oliveira**, **Marcelo Dalla Torre Garcia**, **Alessandro Marques**, **Denise Pizarro Vieira Sato**, **Renata Belluzzo Zironi**, **Roxana Maria Martinez Orrego**, **Vagner Augusto Souza** e **Rosenda Valdés Arencibia** pela amizade e incentivo.

Aos técnicos do LAMAFE, **Adão Santo Bolzan**, **José Carlos Botelho**, **Luiz Carlos Bruno**, **Odair Alves Viana**, **José Carlos Rissardi**, e **Luiz Carlos Neves** pelo apoio dado na construção e montagem do banco de ensaios.

Às secretárias da Pós-Graduação, **Ana Paula Bueno Bardelotte** e **Elisabeth Maria Alves Alexandre** pela presteza no atendimento e amizade demonstrada.

À CAPES / PICDT pelo apoio financeiro através da bolsa concedida.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, pelo apoio e incentivo dados no decorrer do trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	VII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIV
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
1. INTRODUÇÃO	01
1.1 Monitoramento e Análise de Vibrações	01
1.2 Objeto de Estudo	03
1.3 Objetivos do Trabalho	05
1.4 Descrição do Trabalho	06
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	08
2.1 Critérios Gerais de Severidade de Vibrações	08
2.2 Critérios Específicos de Severidade de Vibrações	15
2.3 Métodos de Monitoramento e Análise de Vibrações Aplicados a Rolamentos	18
2.4 Métodos de Análise Conjunta Tempo-Frequência Aplicados no Monitoramento e Análise de Vibrações	30
3. MODELOS DE VIBRAÇÕES PARA FALHAS EM ROLAMENTOS	36
3.1 Teoria Básica	36
3.2 Vibrações e Frequências Características de Defeitos	37
3.3 Modelo de Vibração para Falhas na Pista Externa	41
3.4 Modelo de Vibração para Falhas na Pista Interna	44
3.5 Modelo de Vibração para Falhas em Rolamentos Sujeitos a Vários Tipos de Carregamento	57

4. MÉTODOS DE ANÁLISE CONJUNTA TEMPO-FREQUÊNCIA	64
4.1 Breve Histórico	64
4.2 Transformada de Fourier de Curto Tempo (STFT)	66
4.3 Distribuição de Wigner-Ville (WVD)	70
4.4 Classificação das Distribuições Tempo-Frequência (TFDs)	75
4.5 Novas Distribuições Tempo-Frequência	79
4.6 Exemplos Teóricos de TFDs para Análise de Sinais	82
4.7 Procedimentos para Implementação das (TFDs)	89
4.8 Exemplos da PWVD aplicada em Modelos de Sinais Sintetizados	92
5. SIMULAÇÃO DE MODELOS DE FALHAS EM ROLAMENTOS	101
5.1 Metodologia	102
5.2 Descrição dos Parâmetros Indicadores	104
5.3 Simulação nos Modelos de Falhas	110
6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	143
6.1 Bancada de Ensaios	143
6.2 Instrumentação para Aquisição dos Sinais de Vibração	146
6.3 Resposta Estrutural da Bancada de Ensaios	147
6.4 Ensaios de Curta Duração	151
6.5 Ensaios de Longa Duração	181
7. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	194
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	203
APÊNDICE 1 – Fotos da bancada de ensaios experimentais	A-1
APÊNDICE 2 – Fotos de falhas em rolamentos de testes	A-4
APÊNDICE 3 – Manual de utilização dos programas	A-8

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CPD - Cohen-Posch Distribution (distribuição de Cohen-Posch)
- CWD - Choi-Williams Distribution (distribuição de Choi-Williams)
- EA - Emissão Acústica
- FFT - Fast Fourier Transform (transformada rápida de Fourier)
- HFRT - High Frequency Resonance Technique (técnica do envelope HFRT)
- FRF - Função de Resposta em Frequência
- JTFA - Joint Time-Frequency Analysis (análise conjunta tempo-frequência)
- PDF - Probability Density Function (função densidade de probabilidade)
- PWVD - Pseudo-Wigner-Ville Distribution (distribuição Pseudo-Wigner-Ville)
- SPM - Shock Pulse Meter (método do pulso de choque)
- SNR - Signal-Noise Rate (relação sinal-ruído)
- STFT - Short Time Fourier Transform (transf. de Fourier de curto tempo)
- TW - Transformada de Wavelets (transformada de “wavelets”)
- TFD - Time-Frequency Distribution (distribuição tempo-frequência)
- WVD - Wigner-Ville Distribution (distribuição de Wigner-Ville)
- ZAM - Zao-Atlas-Marks Distribution (distribuição de Zao-Atlas-Marks)

LISTA DE SÍMBOLOS

- $a(t)$ - função de transferência no tempo (entre a falha e o transdutor)
- $A(\omega)$ - função de transferência em frequência (entre a falha e o transdutor)
- $A(\nu, \tau)$ - função de ambiguidade simétrica no plano tempo-frequência
- d - diâmetro das esferas ou rolos (mm)
- dt - intervalo de tempo de discretização (s)
- D - diâmetro médio do círculo primitivo do rolamento (mm)
- De - diâmetro efetivo da pista externa do rolamento (mm)

- D_i - diâmetro efetivo da pista interna do rolamento (mm)
 $d(t)$ - função trem de impulsos no tempo
 $D(\omega)$ - função trem de impulsos em frequência
 $e(t)$ - função de decaimento exponencial de um impulso no tempo
 $E(\omega)$ - função de decaimento exponencial de um impulso em frequência
 f_g - frequência de rotação da gaiola (Hz)
 f_s - frequência de rotação do eixo (Hz)
 f_{sb} - frequência de rotação da esfera ou “spin” (Hz)
 f_e - frequência característica de defeito na pista externa (Hz)
 f_i - frequência característica de defeito na pista interna (Hz)
 f_b - frequência característica de defeito nas esferas (Hz)
 f_c - frequência central de ressonância (Hz)
 f_d - frequência característica do defeito (Hz)
 F_c - parâmetro do fator de crista
 $g(v,\tau)$ - função de núcleo ou “kernel”
 $G(t,\omega)$ - janela Gaussiana no plano tempo-frequência
 $h(t)$ - resposta impulsiva no tempo
 $H(\omega)$ - resposta impulsiva em frequência
 $H[x(t)]$ - transformada de Hilbert do sinal no tempo
 K - fator K
 K_t - fator de curtose
 $M(v,\tau)$ - função de ambiguidade generalizada tempo-frequência
 n_b - número de esferas ou rolos
 N_l - número de linhas espectrais em frequência
 n_{win} - número de pontos por janela TFD
 q_o - intensidade de carga máxima na zona de carga
 $q(\theta)$ - função de distribuição da carga de Stribeck
 $q(t)$ - função de distribuição de carga no tempo

- $Q(\omega)$ - função de distribuição de carga em frequência
 rms - root mean square (raiz média quadrática)
 $r(t)$ - ruído de banda larga no tempo
 $R(\omega)$ - ruído de banda larga em frequência
 R_{pic} - razão de picos no espectro do envelope HFRT
 T - período de análise no tempo
 T_d - período característico da falha (s)
 T_e - período característico da falha na pista externa (s)
 T_i - período característico da falha na pista interna (s)
 T_s - período de rotação do eixo (s)
 T_{pic} - razão de picos no plano tempo-frequência PWVD
 $U(t)$ - função degrau unitário no tempo
 $v(t)$ - sinal de resposta no domínio do tempo (medido)
 $V(\omega)$ - sinal de resposta no domínio da frequência (medido)
 V_{rms} - nível "rms" da PWVD no eixo de tempo
 x_{rms} - nível "rms" do sinal no tempo
 x_{pic} - nível de pico do sinal no tempo
 $x(t)$ - sinal medido no domínio do tempo
 $X(\omega)$ - sinal de resposta vibratória no domínio da frequência
 $z(t)$ - sinal analítico no domínio do tempo

 α - parâmetro de amortecimento
 β - ângulo de contato no elemento (°)
 δ - função delta de Dirac (impulso unitário)
 Δf - resolução em frequência (Hz)
 ε - fator de distribuição de carga no rolamento
 ξ - erro calculado em porcentagem
 $\sigma(t, f)$ - distribuição conjunta tempo-frequência
 $\bar{\sigma}(t)$ - densidade marginal no tempo

$\bar{\sigma}(f)$	- densidade marginal em frequência
$\varphi(t)$	- ângulo de fase do sina no tempo
$\varphi'(t)$	- derivada do ângulo de fase (frequência instantânea do sinal)
τ_e	- constante de tempo de decaimento de um impulso
θ	- posição angular da falha em relação à linha de referência
ω	- velocidade angular (rad/s)

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	- Carta de severidade de vibrações segundo Rathbone	10
FIGURA 2.2	- Critério de severidade baseado na norma VDI 2056	12
FIGURA 3.1	- Geometria básica de rolamento de esferas	37
FIGURA 3.2	- Modelo de vibrações em rolamentos com falha na pista externa. (a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência	43
FIGURA 3.3	- Rolamento com falha na pista interna	46
FIGURA 3.4	- Impulsos produzidos por uma falha na pista interna sob carga unitária. (a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência	47
FIGURA 3.5	- Distribuição de carga radial na pista interna do rolamento	48
FIGURA 3.6	- Distribuição de carga radial na pista interna do rolamento. (a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência	49
FIGURA 3.7	- Impulsos modulados por falha na pista interna do rolamento. (a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência	50
FIGURA 3.8	- Transmissão da vibração do rolamento para o transdutor	51
FIGURA 3.9	- Função de resposta ao impulso e função de transferência do sistema. (a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência	51
FIGURA 3.10	- Variações de amplitude da função de transferência. (a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência	52
FIGURA 3.11	- Resposta não amortecida no rolamento devido a falha na pista interna. (a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência	53
FIGURA 3.12	- Função de decaimento exponencial de um impulso. (a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência	54

FIGURA 3.13 - Resposta no rolamento devido a falha na pista interna. (a) Envelope no tempo; (b) Espectro em frequência	56
FIGURA 3.14 - Resposta no rolamento devido a falha na pista interna. (a) Sinal no tempo; (b) Sinal no tempo com 10% de ruído	57
FIGURA 3.15 - Espectro discreto típico de frequências e bandas laterais	62
FIGURA 4.1 - WVD para um “chirp” linear	83
FIGURA 4.2 - Representações no tempo e em frequência de um “chirp”	84
FIGURA 4.3 - WVD para soma de dois “chirps”	86
FIGURA 4.4 - Comparação entre TFDs: (a) Wigner-Ville; (b) Page	87
FIGURA 4.5 - Comparação entre TFDs (a) WVD; (b) CWD	89
FIGURA 4.6 - Esquema para cálculo da PWVD)	91
FIGURA 4.7 - Representações de sinal harmônico do tipo estacionário	92
FIGURA 4.8 - Representações de sinal harmônico do tipo “stepwise”	93
FIGURA 4.9 - Representações de um sinal do tipo “sweep frequency”	94
FIGURA 4.10 - Representações de um sinal de varredura linear	95
FIGURA 4.11 - Representações de um sinal para partidas	96
FIGURA 4.12 - Representações de um sinal para contatos intermitentes	97
FIGURA 4.13 - Representações de um sinal com decaimento exponencial	99
FIGURA 5.1 - Representação de parâmetros de sinal senoidal no tempo	104
FIGURA 5.2 - Ilustração dos principais passos da técnica do envelope	108
FIGURA 5.3 - Falha na pista externa: sinais de vibração de referência	111
FIGURA 5.4 - Falha na pista externa: sinais simulados no tempo	112
FIGURA 5.5 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo	113
FIGURA 5.6 - Aplicação da técnica do envelope HFRT (c2).	115
FIGURA 5.7 - Espectros FFT e HFRT de sinais em frequência.	115
FIGURA 5.8 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo e na frequência	116
FIGURA 5.9 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c1	119
FIGURA 5.10 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c2	119
FIGURA 5.11 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c3	120
FIGURA 5.12 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c4	120
FIGURA 5.13 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c5	121
FIGURA 5.14 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c6	121
FIGURA 5.15 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c7	122

FIGURA 5.16 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c8	122
FIGURA 5.17 - Falha na pista externa: comparação de parâmetros	123
FIGURA 5.18 - Falha na pista interna: sinais de vibração de referência	125
FIGURA 5.19 - Falha na pista interna: sinais simulados no tempo	126
FIGURA 5.20 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo	127
FIGURA 5.21 - Espectros FFT e HFRT de sinais em frequência	128
FIGURA 5.22 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo e na frequência	129
FIGURA 5.23 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c1	131
FIGURA 5.24 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c2	131
FIGURA 5.25 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c3	132
FIGURA 5.26 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c4	132
FIGURA 5.27 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c5	133
FIGURA 5.28 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c6	133
FIGURA 5.29 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c7	134
FIGURA 5.30 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c8	134
FIGURA 5.31 - Falha na pista interna: comparação de parâmetros	135
FIGURA 5.32 - Falhas combinadas: sinais de vibração de referência	137
FIGURA 5.33 - Falhas combinadas: sinais de simulação no tempo	138
FIGURA 5.34 - Espectros FFT e HFRT dos sinais ($f_c = 1300$ Hz)	139
FIGURA 5.35 - Espectros FFT e HFRT dos sinais ($f'_c = 3300$ Hz)	139
FIGURA 5.36 - Mapa PWVD obtido para condição de falhas combinadas c3	141
FIGURA 5.37 - Mapa PWVD obtido para condição de falhas combinadas c6	141
FIGURA 5.38 - Falhas combinadas: comparação de parâmetros	142
FIGURA 6.1 - Vista geral da bancada de ensaios experimentais	144
FIGURA 6.2 - Vista geral do sistema de aquisição de sinais	146
FIGURA 6.3 - Medidas obtidas para condição estática	149
FIGURA 6.4 - Medidas obtidas para condição dinâmica (rolamento novo)	150
FIGURA 6.5 - Medidas obtidas para condição dinâmica (rol. defeituoso)	150
FIGURA 6.6 - Montagem utilizada para usinagem de falhas no rolamento	152
FIGURA 6.7 - Diagrama esquemático: análise dos sinais de vibração	154
FIGURA 6.8 - Falha na pista externa: sinais medidos no tempo	156
FIGURA 6.9 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo	157
FIGURA 6.10 - Espectros FFT dos sinais em frequência	159

FIGURA 6.11 - Espectros FFT e HFRT filtrados em frequência	160
FIGURA 6.12 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo e frequência	162
FIGURA 6.13 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c1	164
FIGURA 6.14 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c2	164
FIGURA 6.15 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c3	165
FIGURA 6.16 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c4	165
FIGURA 6.17 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c5	166
FIGURA 6.18 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c6	166
FIGURA 6.19 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c7	167
FIGURA 6.20 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c8	167
FIGURA 6.21 - Falha na pista externa: comparação de parâmetros	168
FIGURA 6.22 - Falha na pista interna: sinais medidos no tempo	170
FIGURA 6.23 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo	171
FIGURA 6.24 - Espectros FFT dos sinais em frequência	172
FIGURA 6.25 - Espectros FFT e HFRT filtrados em frequência	173
FIGURA 6.26 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo e frequência	174
FIGURA 6.27 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c1	176
FIGURA 6.28 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c2	176
FIGURA 6.29 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c3	177
FIGURA 6.30 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c4	177
FIGURA 6.31 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c5	178
FIGURA 6.32 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c6	178
FIGURA 6.33 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c7	179
FIGURA 6.34 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c8	179
FIGURA 6.35 - Falha na pista interna: comparação de parâmetros	180
FIGURA 6.36 - Falha na pista externa: sinais medidos no tempo	185
FIGURA 6.37 - Espectros FFT dos sinais em frequência	185
FIGURA 6.38 - Espectros FFT e HFRT filtrados em frequência	187
FIGURA 6.39 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c4	188
FIGURA 6.40 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c6	188
FIGURA 6.41 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c3	189
FIGURA 6.42 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c4	190
FIGURA 6.43 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c6	190
FIGURA 6.44 - Falha na pista externa: comparação de parâmetros	192

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Classificação de máquinas segundo a norma VDI 2056	11
TABELA 2.2 - Classificação de máquinas segundo a ABNT (NBR 10.082)	14
TABELA 2.3 - Faixas de severidade segundo a ABNT (NBR 10.082)	14
TABELA 2.4 - Valores x_{rms} e F_c segundo os critérios da SEECO (1975)	21
TABELA 2.5 - Valores de curtose para vários tipos de sinais (GERGES, 1992)	23
TABELA 3.1 - Períodos característicos de falhas em rolamentos	59
TABELA 3.2 - Espaçamentos das linhas espectrais principais e das bandas laterais para diferentes tipos de falhas e de carregamentos	63
TABELA 4.1 - Distribuições gerais ou classes de COHEN (1992)	77
TABELA 5.1 - Parâmetros adotados para simulação nos modelos de falhas	110
TABELA 5.2 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo	113
TABELA 5.3 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo e frequência	116
TABELA 5.4 - Falha na pista externa: comparação de parâmetros	123
TABELA 5.5 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo	127
TABELA 5.6 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo e frequência	129
TABELA 5.7 - Falha na pista interna: comparação de parâmetros	135
TABELA 5.8 - Falhas combinadas: comparação de parâmetros	142
TABELA 6.1 - Especificações do rolamento de teste (FAG E-20)	145
TABELA 6.2 - Condições de falhas introduzidas nas pistas dos rolamentos	152
TABELA 6.3 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo	157
TABELA 6.4 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo e frequência	162
TABELA 6.5 - Falha na pista externa: comparação de parâmetros	168
TABELA 6.6 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo	171
TABELA 6.7 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo e frequência	174
TABELA 6.8 - Falha na pista interna: comparação de parâmetros	180
TABELA 6.9 - Especificações e estimativa de vida útil dos rolamentos	182
TABELA 6.10 - Frequências características de defeitos	183
TABELA 6.11 - Condições de falhas para análise	184
TABELA 6.12 - Falha na pista externa: comparação de parâmetros	192

RESUMO

SILVA, A. A. (1999). *Detecção e análise dinâmica de falhas em rolamentos*. São Carlos, 1999. 239p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O objetivo principal deste trabalho é a detecção e o diagnóstico de falhas em rolamentos através da análise dinâmica de sinais de vibração visando a sua manutenção preditiva. É dada ênfase aos métodos de análise conjunta tempo-frequência através da distribuição Pseudo-Wigner-Ville (PWVD) que são comparados a alguns métodos de análise nos domínios do tempo e da frequência. Inicialmente são simuladas diversas condições de falhas com sinais sintetizados a partir de modelos de falhas nas pistas externa e interna. Em seguida, os resultados obtidos a partir dos modelos são comparados com as medidas experimentais realizadas num banco de ensaios através de falhas introduzidas artificialmente e geradas naturalmente em rolamentos de testes para validação dos modelos. As medidas foram realizadas num banco de ensaios especialmente construído de modo a permitir boa flexibilidade na variação de parâmetros como velocidade de rotação e carga aplicada, além da facilidade de montagem e introdução de falhas nos rolamentos de testes. Os resultados obtidos para as diversas condições de falhas testadas nos rolamentos foram confrontados com os valores obtidos a partir dos modelos adotados, onde mostraram que o método de análise conjunta tempo-frequência utilizando a representação PWVD é superior em quantidade de informações e desempenho em relação às técnicas convencionais de análise.

Palavras-chave: manutenção preditiva; análise de vibração; falhas em rolamentos

ABSTRACT

SILVA, A. A. (1999). *Detection and dynamic analysis of ball bearing's failure*. São Carlos, 1999. 239p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The main objective of this work is the detection and the diagnosis of ball bearing's failures using dynamic analysis of vibration signals to support its predictive maintenance. Emphasis is given to the methods of joint time-frequency analysis through the Pseudo-Wigner-Ville distribution (PWVD) which are compared with some analysis methods in time and frequency domains. Initially there are simulated several conditions of failures with synthesised signals from models of outer and inner race faults. The results obtained from these models are compared with measurements accomplished in a experimental set-up through artificial and natural failures in test ball bearings for validation of the models. These measurements were accomplished in a set-up built in a way that allows good flexibility in the variations of parameters as rotation speed and applied loads, besides the assembling facilities and easiness of introduction of failures in test ball bearings. The results obtained for several conditions of failures in the tested ball bearings were confronted with the values obtained from the adopted models. They showed that the method of joint time-frequency analysis, using the PWVD representation, is more efficient in amount of information and performance than the conventional techniques of analysis.

Keywords: condition monitoring; vibration analysis; ball bearing's failure.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MONITORAMENTO E ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

O estudo dos conceitos relacionados às vibrações mecânicas é de fundamental importância para a engenharia moderna. O campo de monitoramento e análise de vibrações permite um conhecimento mais detalhado das máquinas, principalmente nos aspectos relativos à melhoria da qualidade, produtividade, desenvolvimento, etc. As máquinas em geral são passíveis de falhas que provocam a redução de desempenho durante o seu funcionamento. Estas falhas são precedidas pelo desenvolvimento de pequenos defeitos em componentes cuja detecção e diagnóstico podem ser realizados através do monitoramento de grandezas físicas como pressão, temperatura e vibração. A partir das mudanças observadas nos padrões característicos dos sinais medidos é possível prever comportamentos anormais ou falhas do sistema e, então, planejar a manutenção preditiva com segurança. Dentre as várias grandezas que podem ser monitoradas, as vibrações mecânicas têm sido muito utilizadas por apresentarem boa correlação com a condição relativa da máquina. É bem conhecido que a falha de uma máquina é precedida por um aumento no seu nível de vibração em mais que 90 % dos casos (COLLACOTT, 1977).

O monitoramento de máquinas a partir da análise de sinais vibratórios vem sendo bastante utilizado em instalações industriais de médio e grande porte, principalmente em situações onde uma parada imprevista de algum equipamento possa causar grandes prejuízos financeiros ou ambientais. Por outro lado, detectar falhas e julgar a sua severidade requer conhecimento e

habilidade do especialista no domínio das técnicas e na interpretação das medidas realizadas. Dentre as várias técnicas de análise de vibrações destaca-se a análise espectral clássica, baseada na aplicação da transformada de Fourier. É uma ferramenta bastante útil para grande parte dos problemas, especialmente na análise de sinais com características periódicas e estacionárias. Em situações mais complexas, onde tem-se a combinação de mais de uma fonte de excitação somada aos ruídos transmitidos através dos suportes e das fundações das máquinas, os sinais medidos podem apresentar algumas dificuldades de análise, especialmente quando ocorrem mudanças abruptas do sinal no tempo, efeitos locais transientes ou mesmo quando os sinais apresentam características do tipo não-estacionárias. Nestes casos, faz-se necessário o uso de ferramentas mais poderosas como as transformadas bidimensionais no domínio tempo-frequência, capazes de prover informações sobre o comportamento de diferentes componentes em frequência de uma vibração para cada instante de tempo (GONZÁLEZ, 1996).

As técnicas de análise conjunta tempo-frequência já vêm sendo empregadas com sucesso em vários campos da engenharia como processamento de imagens, dados sísmicos, reconhecimento de sinais de voz, e engenharia biomédica. Mais recentemente estas técnicas também estão sendo aplicadas na engenharia mecânica, no campo de detecção e diagnóstico de falhas em sistemas. A idéia fundamental da análise conjunta tempo-frequência é entender e descrever situações em que o conteúdo em frequência do sinal esteja mudando com o tempo. Estas representações podem ser classificadas como lineares, bilineares ou outras não-lineares. Dentre as transformadas lineares mais conhecidas estão as transformadas de Fourier de curto tempo (STFT), a transformada de Gabor e a transformada de "wavelets". Nas representações bilineares estão as distribuições de Wigner-Ville (WVD), Choi-Williams (CWD) e Cohen-Posch (CPD), dentre outras. No campo de monitoramento e análise de vibrações em sistemas mecânicos, o uso destas ferramentas pode permitir um melhor entendimento de fenômenos como desgastes, trincas e ressonâncias estruturais em componentes de máquinas. Pode também assegurar um diagnóstico mais

preciso de falhas transientes, geralmente mencionadas como componentes espúrias ou picos fantasmas numa análise espectral clássica. No caso em que os sinais medidos apresentam características multi-componentes, isto é, possuem várias fontes de excitação contidas no sinal, estas representações podem fornecer novas pistas para se conhecer a causa do fenômeno físico através da separação dos vários componentes do sinal e permitir um diagnóstico confiável sobre o tipo de falha e sua localização, oferecendo subsídios para a manutenção preditiva.

1.2 OBJETO DE ESTUDO

Nos sistemas mecânicos rotativos, os rolamentos se apresentam como um dos componentes mais sensíveis ao desenvolvimento de falhas devido aos problemas a que estes são expostos como desalinhamentos e desbalanceamentos, montagens inadequadas, lubrificação deficiente, sobrecargas imprevistas, desgastes por contaminação e fadiga superficial das pistas ou elementos rolantes. Estes fatores justificam as razões pelas quais grande parte dos rolamentos atingem apenas 10 a 20 % da vida útil de projeto (BERRY, 1991). Por causa desta alta porcentagem de falha, e devido à sua contribuição fundamental para a conservação da precisão da máquina, verifica-se o interesse pela manutenção preditiva de rolamentos.

A escolha de rolamentos como objeto de estudo também se deve ao fato deste apresentar um conhecimento bastante significativo dentro do campo de monitoramento e análise de vibrações, viabilizando estudos do comportamento dinâmico das grandezas físicas que ainda não encontram legitimidade junto às técnicas usuais. Existem diversas técnicas de detecção e diagnóstico de falhas que foram criadas especialmente para rolamentos. A maioria delas são baseadas no caráter impulsivo introduzido pelo choque entre os elementos rolantes e as pistas defeituosas, gerando um espectro típico onde as frequências características relacionadas aos defeitos são identificadas e quantificadas, permitindo um diagnóstico sobre o tamanho e a localização da falha.

Em condições normais de operação os rolamentos estão sujeitos a várias fontes de excitação gerando sinais que apresentam características relacionadas com o estado do elemento. Inicialmente, quando o rolamento se encontra em bom estado, o sinal se apresenta como um ruído aleatório de banda larga com baixa amplitude de vibração. Em seguida, com o surgimento e desenvolvimento de uma pequena falha originada na pista externa estacionária o sinal obtido mostra alguns transientes periódicos com amplitudes praticamente invariantes no tempo, o que facilita sua análise pelos métodos baseados na aplicação da transformada de Fourier. Porém quando a falha se desenvolve na pista interna ou no elemento rolante, o efeito do carregamento e do meio de transmissão entre a falha e o transdutor irão causar uma modulação na amplitude de vibração gerando um sinal cujo espectro apresenta bandas laterais mistas que dependem da posição angular da falha. Além disso, a presença de ruídos e de outras fontes de vibrações internas da máquina ou transmitidas através das fundações podem aumentar a complexidade dos sinais, dificultando a sua análise. Em situações onde ocorre a extensão da falha, ou seja, num estágio mais avançado em que acumulam-se várias falhas nas pistas e nos elementos rolantes, o sinal volta a apresentar características típicas de ruído aleatório somado a pequenos transientes. O seu espectro apresenta uma configuração de banda larga em frequências, não permitindo fazer um diagnóstico confiável da frequência característica de defeito. Neste caso, o maior impacto irá dominar o espectro e a sua amplitude se torna alta em relação às amplitudes de vibração medidas quando os rolamentos estavam em bom estado.

Observa-se que em grande parte dos problemas envolvendo falhas mecânicas causadas pela deterioração progressiva de materiais e superfícies de contato ocorrem fenômenos do tipo transientes ou não-estacionários que são difíceis de serem investigados através das técnicas usuais. Dentro dos processos físicos de desenvolvimento de falhas existem os sinais que se repetem de forma estacionária e os sinais não-estacionários que se apresentam com múltiplas componentes relacionadas com as frequências características de engrenamento, falhas transientes, ressonâncias dos suportes

e meios de transmissão entre a fonte de vibração e o sensor. Nestes casos, a análise conjunta tempo-frequência pode ser uma ferramenta capaz de fornecer informações adicionais para melhor interpretação dos fenômenos envolvidos devido à sua capacidade de analisar sinais multi-componentes, além de possibilitar mais detalhes sobre a natureza e forma destas variações.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem como principal objetivo a aplicação de um método de análise conjunta tempo-frequência para detecção e diagnóstico de falhas em rolamentos visando a sua manutenção preditiva. Numa primeira abordagem pretende-se investigar algumas técnicas de monitoramento e análise de vibrações no domínio do tempo e da frequência, visando detectar suas vantagens e limitações, especialmente em situações consideradas como de análise mais complexa. Em seguida, pretende-se aplicar algumas técnicas de análise conjunta tempo-frequência para a comprovação de sua eficiência e para a indicação como ferramenta de detecção e diagnóstico em problemas relacionados a falhas em componentes de máquinas rotativas.

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, foram necessários desenvolver procedimentos com os seguintes objetivos específicos:

- i) investigar parâmetros de detectibilidade e sensibilidade através de alguns métodos de análise de vibrações no domínio do tempo e da frequência, aplicados na detecção e diagnóstico de falhas em rolamentos;
- ii) investigar o potencial de alguns métodos de análise conjunta tempo-frequência como ferramenta de detecção e diagnóstico de falhas em rolamentos, e selecionar uma transformada como, por exemplo, a distribuição pseudo-Wigner-Ville (PWVD) para aplicação;
- iii) investigar o desempenho das representações conjunta tempo-frequência em relação às técnicas usuais quanto às suas potencialidades de aplicação no monitoramento e análise de vibrações em sistemas mecânicos rotativos, visando sua indicação como técnica de detecção e diagnóstico de falhas.

1.4 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

O desenvolvimento da tese está dividido em sete capítulos, que serão apresentados claramente e cujo resumo segue:

Este capítulo inicial apresenta uma visão geral sobre a importância do tema “monitoramento e análise de vibrações” na área de engenharia mecânica, e delimita o problema da predição de falhas em máquinas rotativas e seus componentes visando a manutenção preditiva.

O capítulo 2 faz uma revisão abrangente sobre os critérios gerais de severidade de vibrações aplicados a máquinas rotativas e, em seguida, estende a revisão para critérios mais específicos de severidade como os métodos de análise de vibrações aplicados a rolamentos. Dentro da proposta de trabalho são revistas as pesquisas mais recentes no campo de monitoramento aplicando métodos de análise conjunta tempo-frequência para detecção e diagnóstico de falhas em componentes mecânicos.

O capítulo 3 trata dos diversos modelos matemáticos existentes na literatura sobre vibrações geradas por falhas em rolamentos. É dada ênfase aos aspectos de visualização gráfica dos sinais representando vários fenômenos como periodicidade dos impactos e frequências características relacionadas aos defeitos, frequências de ressonância excitadas e efeito do amortecimento estrutural.

O capítulo 4 apresenta um estudo detalhado sobre os principais métodos de análise conjunta tempo-frequência atualmente empregados, juntamente com o procedimento geral adotado para cálculo das distribuições, incluindo alguns exemplos teóricos e simulados de sinais típicos obtidos em máquinas rotativas.

O capítulo 5 mostra os resultados de simulação obtidos a partir dos modelos de falhas nas pistas externa e interna de rolamentos, onde são simuladas várias condições de falhas que possam ser reproduzidas experimentalmente. São comparados os desempenhos de alguns métodos de

análise no tempo e em frequência em relação ao método proposto PWVD, para três casos de modelos de falhas adotados.

O capítulo 6 apresenta os resultados experimentais obtidos através das medidas realizadas no banco de ensaios para diversas condições de falhas introduzidas artificialmente ou geradas naturalmente nas pistas dos rolamentos, sendo dada ênfase à capacidade de detecção e desempenho das diversas técnicas implementadas. Os resultados comprovam a validação dos modelos de falhas, e acrescentam informações adicionais sobre alguns fenômenos de análise mais complexa, como o deslocamento das faixas de frequências de ressonância mais excitadas pela falha com o tempo.

O capítulo 7 apresenta as discussões finais e resume as principais conclusões e contribuições obtidas a partir dos resultados alcançados pela investigação, destacando o bom desempenho do método de análise conjunta tempo-frequência PWVD aplicado na detecção e diagnóstico de falhas em rolamentos, o que permite estender a sua indicação para outros componentes de sistemas mecânicos rotativos.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CRITÉRIOS GERAIS DE SEVERIDADE DE VIBRAÇÕES

Para tornar os sinais de vibração ferramentas das técnicas de predição de falhas é necessário desenvolver métodos baseados em critérios quantitativos. Segundo ENGJA & LIPPE (1977), o problema de monitoramento da condição mecânica de máquinas rotativas pode ser dividido em duas fases:

- i) Seleção de técnicas adequadas para detecção e diagnóstico de falhas num determinado componente através das características dos sinais e padrões vibratórios. Isto significa extrair de um sinal complexo de vibração, sujeito a várias fontes de excitação interna ou externa, características que estejam altamente correlacionadas à falha, evitando-se a possibilidade de falsos alarmes que reduzem a confiabilidade do programa de monitoramento;
- ii) Estabelecimento de critérios e limites para condições aceitáveis de operação de máquinas e necessidade de manutenção. Dentre estes limites, destacam-se os limites absolutos e os limites qualitativos. Os limites absolutos advertem sobre as condições que podem resultar em falhas, sendo baseados em restrições físicas como a folga máxima admissível entre eixo-mancal sem que ocorra contato. Os limites qualitativos são baseados em grandezas físicas como vibração, temperatura e pressão cujos valores são estabelecidos pela experiência e dependem do tipo de máquina, onde e como as medições são efetuadas, grau de precisão e tolerâncias dimensionais, etc.

Recentemente, a aplicação destes critérios tem recebido bastante atenção por parte das indústrias, especialmente aquelas que operam com equipamentos críticos onde uma parada inesperada possa trazer conseqüências desastrosas de natureza econômica e ambiental, ou mesmo quando há necessidade imperiosa de que o sistema se mantenha em operação contínua, o que justifica um programa de manutenção preditiva através do monitoramento permanente. Investimentos nestes programas têm alcançado realizações importantes como o aumento da disponibilidade e produtividade dos equipamentos, redução de custos de manutenção, e maior segurança da planta (MOBLEY, 1990).

Critérios de Yates e Rathbone

Os primeiros critérios de severidade de vibrações conhecidos foram propostos por Yates (1949) e Rathbone (1963) *apud* COLLACOTT (1977), sendo baseados em opiniões de vários engenheiros e inspetores de máquinas rotativas com experiência prática de campo. Além das medidas terem sido feitas com instrumentos de pouca precisão, Rathbone limitou sua avaliação para máquinas operando na faixa de velocidade entre 900 e 5.000 rpm e considerou razoável a extrapolação das curvas para velocidades mais elevadas (até 12.000 rpm). Ele estava consciente de que estes níveis não produziram um critério geral, válido para todas as máquinas. Yates elaborou seu critério baseado em numerosos testes de instalação de turbinas em navios. Como as máquinas foram instaladas em suportes mais flexíveis, observa-se algumas diferenças em relação ao critério usado por Rathbone que trabalhou com máquinas de fundação mais rígida. A idéia de Rathbone de traçar níveis de vibrações admissíveis contra a frequência foi refinado ao longo dos anos, resultando no gráfico da FIGURA 2.1. Observa-se que o critério é puramente subjetivo classificando as máquinas de extremamente suave a muito irregular e que no limite existe uma relação direta entre a frequência de rotação do eixo e a amplitude de deslocamento.

A qualidade de funcionamento de cada máquina é tomada em função do nível de vibração em termos da amplitude de velocidade (mm/s), conforme mostram as retas limites em escalas logarítmicas.

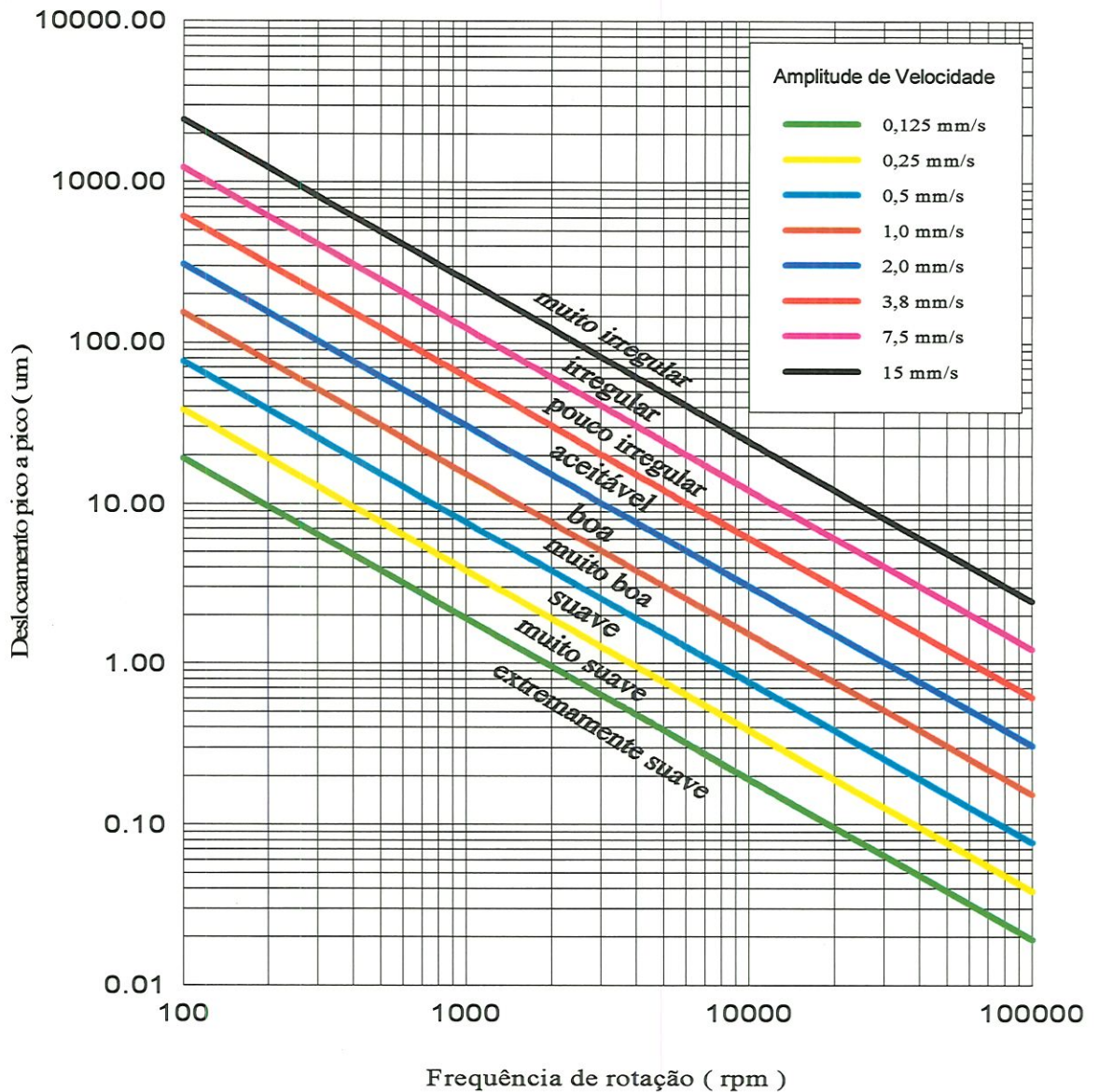


FIGURA 2.1 - Carta de severidade de vibrações segundo Rathbone.

Normas e Recomendações Gerais

A norma VDI 2056 (1964) representa um dos estudos mais exaustivos na elaboração dos critérios de severidade de vibrações aplicados a máquinas

rotativas, dividindo-as em seis grupos conforme a potência de acionamento e o tipo de trabalho a ser realizado. A TABELA 2.1 mostra esta classificação, onde observa-se que não existe uma distinção muito clara entre os tipos de máquinas que se encontram nos dois últimos grupos, o que exige experiência e bom senso no julgamento a ser adotado na prática de campo.

TABELA 2.1 - Classificação de máquinas segundo a norma VDI 2056.

Grupo	Classificação de máquinas
K	Máquinas pequenas com potência de até 15 kW
M	Máquinas de tamanho médio com potência entre 15 kW e 75 kW
G	Máquinas grandes montadas em fundações rígidas e com massas girantes elevadas
T	Máquinas rotativas de elevada potência suportadas em fundações leves, como turbocompressores e turbomáquinas
D	Máquinas de fundações pesadas e rígidas e com massas distribuídas de maneira não uniforme
S	Máquinas especiais que operam de maneira desbalanceada, como peneiras vibratórias e compactadores

A FIGURA 2.2 ilustra as curvas relacionando os níveis de severidade de vibração recomendados para máquinas do grupo K, conforme mostram as retas. A qualidade das máquinas é definida de acordo com as faixas de tolerâncias A, B, C e D, conforme o quadro em anexo. É interessante observar que as especificações da norma VDI 2056 estabelecem os níveis de vibração em função da amplitude de velocidade. Ao passar de um nível vibratório para o seguinte, a velocidade é multiplicada pelo fator 2.5, o que corresponde a um aumento de aproximadamente 8 dB. Os valores especificados para máquinas do grupo G, aplicadas em geradores de energia e máquinas de processo com fundações muito rígidas, foram obtidos a partir do trabalho de Rathbone. Neste gráfico a velocidade máxima foi estendida.

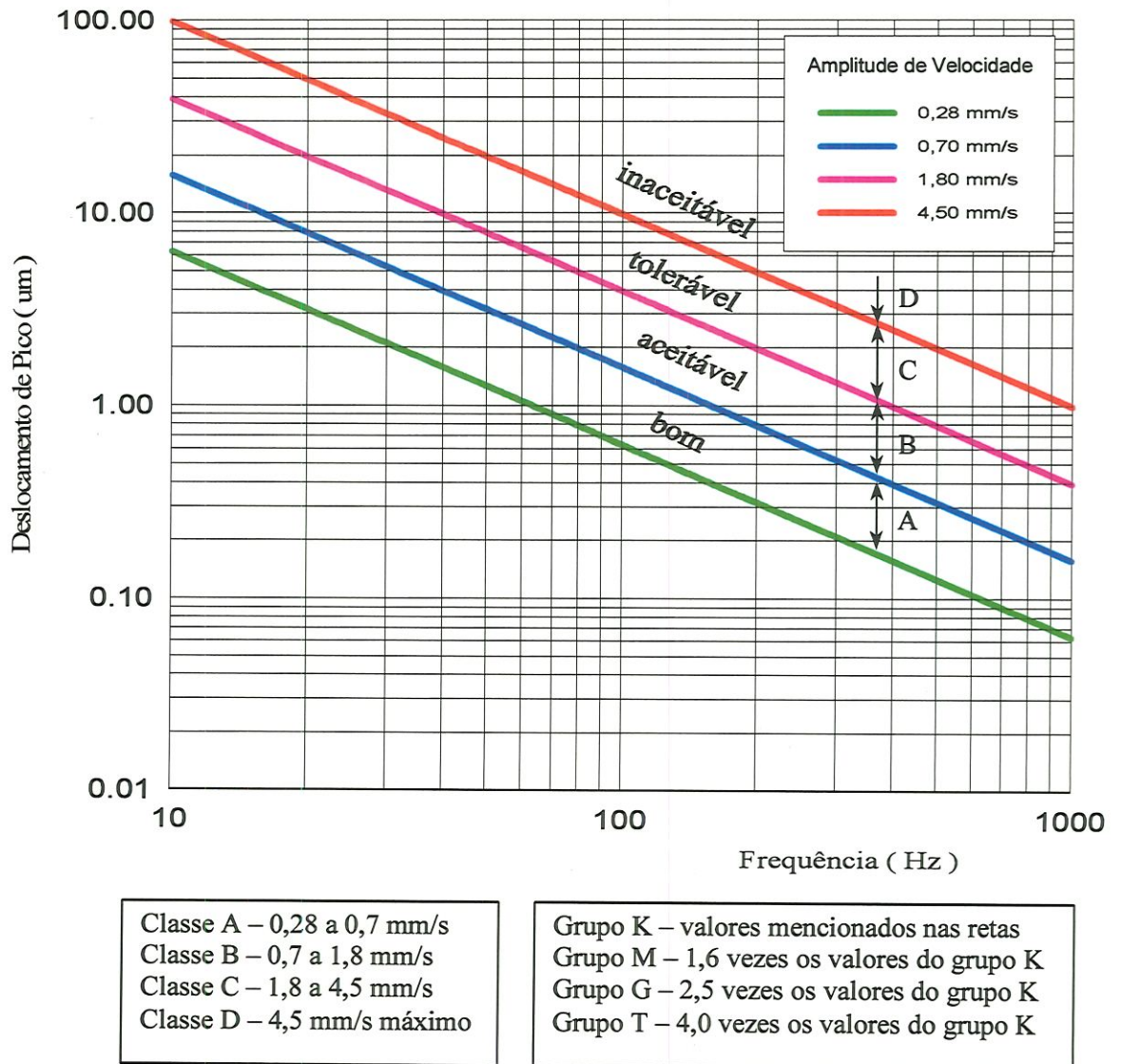


FIGURA 2.2 - Critério de severidade baseado na norma VDI 2056.

Num estudo realizado por Downham & Woods (1971) *apud* COLLACOTT (1977) foram comparados alguns critérios e apontadas algumas deficiências da norma VDI 2056 em vários casos práticos, principalmente pelo fato desta não levar em conta as peculiaridades de cada máquina e as técnicas de medição adotadas. Utilizando-se das técnicas de impedância mecânica, propuseram uma correção aos critérios adotados pela norma VDI 2056 em função da impedância do mancal onde é feita a medida. Verificaram que assim procedendo grande parte das distorções nos resultados obtidos por esta norma podem ser evitados.

Duas importantes normas para avaliação da severidade de vibrações em máquinas rotativas foram publicadas pela ISO. Largamente utilizada na Europa, as normas ISO 2372 (1974) e ISO 3945 (1980) contém critérios para avaliação da condição de máquinas a partir da amplitude de velocidade em pontos específicos de cada mancal. Essas normas aplicam-se a máquinas operando dentro da faixa de velocidades de 10 a 200 Hz (600 a 12.000 rpm) e especificam uma medição na faixa de frequências de 10 a 1.000 Hz.

Com relação aos procedimentos as duas normas requerem a medição da amplitude de velocidade em termos do nível *rms* verdadeiro, o que nem sempre é fácil de ser obtido na prática. Esse é talvez um dos pontos mais controvertidos das normas ISO 2372 e 3945 para amplitude de velocidade de vibração em mancais. COELHO JR & HANSEN (1993) acreditam que o valor de *pico* é uma medida de severidade melhor que o nível *rms*. A favor da medição do nível *rms* está o fato deste estar mais estreitamente relacionado com o conteúdo de energia do sinal. Um sinal pode possuir um elevado valor de *pico* com pouco conteúdo de energia, se a duração do pico for pequena.

No Brasil a ABNT publicou a norma NBR 10.082 (1987) especificando critérios para avaliação da severidade de vibrações em máquinas rotativas baseados nas normas ISO 2372 e 3945. São adotadas as mesmas restrições de velocidades de operação entre 600 a 12.000 rpm e medições da amplitude de velocidade de vibração na faixa de análise entre 10 a 1.000 Hz. Outros fatores importantes para esta avaliação tais como características da máquina, tensões devido às vibrações induzidas pelos mancais e suportes, condições de operação e instrumentação necessária para medição e análise das vibrações, também são discutidas. A TABELA 2.2 mostra a classificação geral de máquinas segundo a norma ABNT (NBR 10.082) que considera principalmente o tamanho da máquina e tipo de trabalho realizado. Os níveis de severidade de vibração recomendados para as quatro primeiras classes de máquinas, agora designados como faixas de severidade, são apresentadas na TABELA 2.3 em termos do valor eficaz da velocidade de vibração (mm/s), onde foram atribuídos os seguintes conceitos: A (Bom); B (Satisfatório); C (Insatisfatório); D (Inaceitável).

TABELA 2.2 - Classificação de máquinas segundo a ABNT (NBR 10.082).

Classes	Tipo de máquina
I	Motores e máquinas pequenas com potência de até 15kW
II	Máquinas de tamanho médio com potência entre 15 kW e 75 kW
III	Máquinas motrizes grandes com massas rotativas montadas em fundações rígidas
IV	Máquinas motrizes grandes com massas rotativas montadas em fundações relativamente flexíveis, como as turbomáquinas
V	Máquinas com forças de inércia não-balanceáveis, montadas em fundações relativamente rígidas
VI	Máquinas com forças de inércia não-balanceáveis, montadas em fundações flexíveis, como peneiras vibratórias

TABELA 2.3 - Faixas de severidade segundo a ABNT (NBR 10.082).

Faixas de severidade	Velocidade efetiva de vibração, v (mm/s)	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0,28	0,28	A	A	A	A
0,45	0,45				
0,71	0,71				
1,12	1,12	B	B	B	B
1,8	1,8				
2,8	2,8	C	C	C	C
4,5	4,5				
7,1	7,1	D	D	D	D
11,2	11,2				
18	18				
28	28				
45	45				
71					

Recentemente a ISO publicou duas séries de normas e procedimentos para avaliação da severidade de vibrações em máquinas. A série de normas ISO 10.816 (1995) é recomendada para medidas realizadas em partes *não-rotativas* de máquinas como superfícies de mancais e carcaças, enquanto que a série de normas ISO 7.919 (1995) é indicada para medidas de vibrações em *eixos rotativos*. Cada série é dividida em cinco partes contendo padrões individuais para classes gerais de máquinas e definindo informações específicas e critérios que são únicos para cada grupo. Uma listagem mais completa destas normas é dada por HARRIS (1996).

Em linhas gerais a série ISO 10.816 (1995) segue as normas ISO 2372 (1974) e 3945 (1980) e acrescenta alguns novos tópicos visando atualizar o assunto. Por exemplo, o Anexo E da norma ISO 10.816-1 (1995) trata sobre técnicas especializadas aplicadas a rolamentos. A falta de informações disponíveis para o estabelecimento de critérios de níveis e padrões vibratórios se deve à necessidade de conhecimento especializado dos métodos e técnicas empregadas. São sugeridas algumas técnicas que podem ser utilizadas de forma isolada ou combinadas quando se faz necessário um diagnóstico mais preciso sobre o tipo e localização da falha em rolamentos:

- i) Nível global de vibrações no domínio do tempo para medidas de aceleração utilizando os níveis *rms* e de *pico*;
- ii) Análise no domínio da frequência para medidas de aceleração utilizando o espectro direto, técnica do envelope HFRT e do “cepstrum”;
- iii) Método do pulso de choque (SPM);
- iv) Técnicas alternativas (ruído acústico, termografia, e ferrografia).

2.2 CRITÉRIOS ESPECÍFICOS DE SEVERIDADE DE VIBRAÇÕES

Limites genéricos são aceitáveis para uma grande parte das máquinas em operação. Entretanto, existem situações onde é desejável refinar o processo e conceber critérios mais específicos e detalhados para um propósito particular ou para uma máquina específica. Como os limites

recomendados pelas normas não fornecem informação sobre o que deve ser a causa do problema nem são detalhados o suficiente para capacitar um reconhecimento antecipado de pequenas mudanças na condição, deve-se recorrer a métodos mais específicos para obtenção das características de vibração (MITCHELL, 1993).

Estabelecimento de Limites Estatísticos

Existem três métodos principais para o estabelecimento de características que definem os limites aceitáveis de vibração numa máquina. Inicialmente, estes limites podem ser obtidos a partir das características de um grupo de máquinas idênticas e, em seguida, comparados às características de uma unidade do grupo em boas condições. Se maior precisão é desejada, podem ser calculadas médias estatísticas para cada componente importante. Este resultado junto com valores máximos e mínimos são usados como uma linha de referência. O conceito da análise estatística é relativamente simples. Uma série de quatro ou mais medidas coletadas num ponto específico são combinadas estatisticamente para produzir um representante médio do valor normal μ mais um desvio padrão σ . Finalmente, no caso em que um grupo de amostras não é disponível os mesmos resultados podem ser alcançados pela comparação dos espectros gerados por uma única máquina em um determinado período de tempo.

Embora o estabelecimento de limites estatísticos não seja muito representativo para uma máquina, estes fornecem um modelo quantitativo idealizado e detalhado para comparação de desempenho com máquinas similares. Esse método também fornece subsídios de performance, em lugar de se basear em critérios gerais que podem ou não ser válidos para uma determinada máquina. Além disso, os limites estatísticos fornecem valores de operação realísticos sem a necessidade de longos programas de testes para determinar uma série de funções de transferência. Porém, para que o método estatístico funcione adequadamente deve-se assumir que o grupo de amostras

não possua alguma falha escondida e que as medidas sejam obtidas em condições idênticas de operação.

Gráficos de Tendência no Tempo

Para o reconhecimento de alterações na condição de máquinas pode-se também verificar se os valores medidos são estáveis ou estão mudando com o tempo. Um valor estável de qualquer parâmetro implica em condições mecânicas estáveis mas uma tendência de aumento indica uma mudança na condição que levará, ao final, a dificuldades se a situação permanecer não controlada. Assumindo que numa vistoria de vibração feita em uma máquina na véspera de sua desativação para manutenção preventiva todos os níveis de vibração estão dentro dos limites aceitáveis, é uma boa decisão não fazer qualquer serviço na máquina? Bem, a decisão pode não ser boa caso um ou mais níveis estejam com tendência de crescimento numa taxa em que os limites serão excedidos antes da próxima parada programada. Assim, medições isoladas não são suficientes para definir uma condição mecânica. Deve-se conhecer também como as medições estão mudando com o tempo para se chegar a uma avaliação mais conclusiva.

Outras Técnicas de Avaliação da Severidade de Vibrações

CEMPEL (1990) define duas questões importantes para detecção do sintoma correspondente à condição da máquina: s_a é o limite de alarme, valor acima do qual a máquina tem problema de desgaste acelerado e s_b é o valor de parada, acima do qual indica alta probabilidade de falha. Para determinação destes limites, é utilizada a distribuição do sintoma $p(s)$ ou sua função distribuição, que pode ser estimada através da desigualdade de Chebyshev ou aproximada pelas distribuições de Weibull ou Pareto. Neste trabalho foram comparados os três procedimentos e verificou-se que o método de Pareto é superior em precisão e simplicidade de estimação.

SHIN *et al* (1994) sugerem dois procedimentos para a obtenção de níveis de alarme para a vibração de um conjunto de bombas centrífugas. É proposta a análise estatística para examinar a distribuição das amplitudes de vibração utilizando medidas de *pico-a-pico*, *pico* ou *rms* dos deslocamentos medidos. Para uma distribuição normal, o valor de $\mu+2\sigma$ é sugerido como um bom nível de alarme. No domínio da frequência, utilizam-se análises de bandas de oitavas. Uma simulação de falha artificial foi conduzida para comparar os métodos, obtendo-se um comportamento no domínio do tempo que segue a distribuição gaussiana de probabilidades com o valor $\mu+2\sigma$ apresentando 98% do nível de aceitação.

Discussões sobre os Critérios de Severidade de Vibrações

O estabelecimento de limites e níveis de alarme para o monitoramento de máquinas não é uma tarefa simples e apresenta os mesmos problemas que a tentativa de normalização dos critérios. Se por um lado eles trazem a vantagem de prevenir quanto a um funcionamento anormal da máquina, por outro não permitem por si só que se estabeleça um diagnóstico confiável. Estes não dependem apenas da qualidade das medidas feitas e das potencialidades das técnicas empregadas, mas também do criterioso armazenamento dessas informações tanto no nível interno nas indústrias como em nível nacional na forma de banco de dados.

2.3 MÉTODOS DE MONITORAMENTO E ANÁLISE DE VIBRAÇÕES APLICADOS A ROLAMENTOS

Os rolamentos são elementos mecânicos indispensáveis na maioria das máquinas. Nos setores de manutenção ainda é grande o desperdício destes componentes seja pela falta de cuidados durante a sua montagem ou negligência quanto à limpeza e cumprimento dos períodos de lubrificação. Estes fatos têm contribuído muito no sentido de reduzir a confiabilidade

operacional dos rolamentos. Assim a expectativa de vida útil se torna tão dispersa que o intervalo entre trocas deve ser menor que sua vida média a fim de evitar a possibilidade de falha catastrófica. Como se trabalha a favor da segurança, uma grande quantidade de rolamentos são substituídos ainda em bom estado (BOTÖ, 1971). Num estudo realizado pelo centro de pesquisas e engenharia da SKF concluiu-se que os rolamentos não completam a sua vida útil calculada devido aos seguintes fatores: 34% são substituídos ainda em bom estado, 36% apresentam problemas de falta de lubrificação, 14% possuem algum tipo de contaminação e 16% estão relacionados com problemas de desalinhamento, desbalanceamento e montagens incorretas (RYCKALTS, 1992).

Face a estes motivos o monitoramento da condição de rolamentos tem sido bastante investigado nos últimos anos utilizando técnicas que visam detectar falhas em desenvolvimento e prever o final de sua vida útil com segurança. É sabido que os níveis gerais de vibrações num rolamento, medidos através dos valores *rms* ou de *pico*, é função de variáveis como velocidade de rotação, natureza do carregamento, posição de medida, tipo de montagem e lubrificação, o que dificulta uma interpretação razoável para análise e diagnóstico de falhas ainda em desenvolvimento. Outras técnicas foram sendo desenvolvidas especialmente para rolamentos, a maioria delas baseadas no caráter impulsivo devido ao choque entre elementos rolantes e a superfície defeituosa, sendo que ainda há divergências entre pesquisadores quanto ao desempenho destas técnicas em determinadas situações.

A seguir serão revistas as principais técnicas de análise de vibrações desenvolvidas nos domínios do tempo e da frequência atualmente empregadas no monitoramento da condição de rolamentos, onde enfatiza-se as suas principais vantagens e limitações. Maiores detalhes sobre algumas destas técnicas incluindo os principais conceitos matemáticos e procedimentos envolvidos na sua aplicação são apresentados no capítulo 5.

Métodos de Análise no Domínio do Tempo

Nível Global de Vibrações

O nível global de vibrações é um indicador bastante simples, e por isso as informações que fornece são sucintas, colocando muitas vezes o analista em situações embaraçosas. Mesmo com a vantagem de prevenir quanto a um funcionamento anormal da máquina, especialmente em situações onde determinados níveis não possam ser ultrapassados, os valores dos níveis *rms* x_{rms} e de *pico* x_{pic} por si só não permitem que se estabeleça um diagnóstico preciso sobre qual componente do sistema está avariado, dificultando a análise e tomada de decisão.

RUSH (1979), utilizando os parâmetros x_{rms} , x_{pic} e o fator de curtose K_t , para o monitoramento de rolamentos, observou que os níveis x_{rms} não se mostraram sensíveis durante os primeiros estágios de desenvolvimento de falhas, embora estes se mantivessem sempre crescentes à medida que a falha evoluía no tempo. Já o níveis x_{pic} se mostraram mais sensíveis nesta primeira fase, porém tendem a cair quando a falha se encontra em estágio mais avançado. Rush sugere a utilização do fator de curtose K_t para detecção de falhas incipientes por que este indicador mostrou-se mais eficiente e praticamente insensível às condições de carga e velocidade.

Fator de Crista F_c

Este método se baseia no fato que com a deterioração progressiva das superfícies de contato os níveis x_{pic} crescem mais rapidamente do que os níveis x_{rms} , devido ao aumento da impulsividade gerada pela passagem dos elementos rolantes sobre a falha. O fator de crista é definido como a razão do valor de pico de aceleração de vibração x_{pic} em relação ao valor x_{rms} medidos no rolamento numa faixa de análise em frequências entre 1 kHz e

10 kHz. Embora a medida de F_c seja simples, fornece apenas um valor de alarme e, portanto, não dá o diagnóstico de qual componente está falhando. A TABELA 2.4 de *Rolling Bearing Criteria Chart* publicada pela SEECO (1975) *apud* GERGES (1992) mostra os valores permissíveis em termos de aceleração de vibração medidas em (g) e (dB) para várias rotações e níveis qualitativos de severidades de falhas, alertando para o fato de que F_c só é válido quando o rolamento é a única fonte de vibração, e que nos casos de problemas de cavitação em bombas ou engrenagens a medida de F_c deixa de ser válida.

TABELA 2.4 - Valores x_{rms} e F_c segundo os critérios da SEECO (1975).

Rotação (rpm)	Níveis de aceleração	Condição suave	Condição normal	Alguma falha	Falha grave
750	x_{rms} (dB)	120-134	134-146	146-154	154-160
	x_{rms} (g)	0,2-0,5	0,5-2	2-5	5-10
	F_c (dB)	6-12	12-16	16-22	22-26
	F_c (g)	2-4	4-6	6-12	12-20
1500	x_{rms} (dB)	126-134	134-149	149-156	156-161
	x_{rms} (g)	0,2-0,5	0,5-3	3-6	6-15
	F_c (dB)	6-12	12-16	16-22	22-26
	F_c (g)	2-4	4-6	6-12	12-20
3000	x_{rms} (dB)	130-140	140-154	154-166	166-174
	x_{rms} (g)	0,5-1	1-5	5-20	20-50
	F_c (dB)	6-12	12-16	16-22	22-26
	F_c (g)	2-4	4-6	6-12	12-20





Fator de curtose, K_t

O fator de curtose, definido como o quarto momento estatístico normalizado pelo desvio padrão elevado à quarta potência, foi inicialmente proposto por DYER & STEWART (1978) como indicador sobre a condição de rolamentos. Foi verificado que o fator de curtose é altamente sensível a falhas incipientes com uma variação relativa de apenas 8 % nas medidas, enquanto cerca de 50 % para os níveis x_{rms} e 65 % para os níveis x_{pic} . Mostraram que, com o surgimento de falhas, o nível de impulsividade devido aos impactos entre as superfícies aumentam, junto com os parâmetros x_{rms} , x_{pic} e K_t . Porém o primeiro parâmetro que varia significativamente é o fator de curtose, daí a sua vantagem como técnica de detecção.

Assumindo-se que num rolamento sem falha as vibrações geradas pela passagem das esferas sobre as pistas são de natureza aleatória e que a distribuição de probabilidades tende à Gaussiana, o fator de curtose obtido para mancais em bom estado é igual a 3 (três). Porém com o surgimento e desenvolvimento da falha os valores de K_t tendem a aumentar devido aos impulsos gerados pela passagem dos elementos rolantes sobre a falha. A TABELA 2.5 mostra os valores de curtose para alguns tipos de sinais, onde nota-se que os sinais de rolamentos defeituosos apresentam valores $K_t > 3,0$.

MARTINS & GERGES (1985) investigando o fator de curtose aplicado a rolamentos sujeitos a diversas condições de carga e velocidade, obtiveram resultados discutíveis. Estes autores sugerem a utilização de parâmetros combinados como o fator $K = K_t \cdot x_{rms}$ visando melhorar a eficiência do método. Como K_t é seguro para detecção de falhas incipientes mas tem limite de aplicação para rotações muito altas e quando ocorre a extensão de falhas no mancal, o fator K embora não seja adequado para detecção de falhas incipientes não tem esta limitação e se apresenta sempre crescente.

TABELA 2.5 - Valores de curtose para vários tipos de sinais (GERGES, 1992).

Tipo de Sinal	Forma de onda	Curtose, K_r
Onda quadrada		1,0
Onda senoidal		1,5
Rolamento sem falha (sinal aleatório)		3,0
Rolamento com falha (sinal aleatório+impulsos)		> 3,0

Métodos de Análise no Domínio da Frequência

Análise Espectral de Vibração

A análise espectral de sinais de vibração é o procedimento mais largamente usado na detecção de falhas em rolamentos, e tem sido sugerida em várias investigações (TAYLOR, 1980) e (IGARASHI & HAMADA, 1982). Esta análise é baseada na aplicação dos conceitos da transformada de Fourier e implementada através de algoritmos FFT. Normalmente comparam-se os espectros atuais em relação àqueles obtidos quando o rolamento estava em boas condições. Porém, pesquisadores mencionam que é difícil detectar falhas ainda incipientes através do espectro direto via FFT porque as frequências relacionadas aos defeitos ocorrem na faixa de baixas frequências,

geralmente até 500 Hz, onde os espectros podem ser facilmente mascarados pelos sinais oriundos de outras máquinas ou por ruídos de baixa frequência presentes nas medidas (OSUAGWU & THOMAS, 1982).

Técnica do “cepstrum”

O “cepstrum” é definido como a transformada inversa de Fourier do logaritmo do módulo da transformada de Fourier do sinal, o que resulta num sinal de análise no domínio do tempo τ , cuja variável é denominada “quefrência”. Este método reduz o número de picos igualmente espaçados no domínio da frequência em um único pico fundamental no domínio da “quefrência”. O caráter periódico dos espectros observados em rolamentos, engrenagens, rotores desbalanceados, acoplamentos, etc., junto com a facilidade de utilização de filtros passa-baixo no espectro, tem reduzido a influência de distorções nas ressonâncias estruturais e tornado esta técnica interessante (BRAUN, 1986).

RANDAL (1982) faz uma análise comparativa entre os vários métodos de análise no domínio do tempo e da frequência para diagnóstico de falhas em engrenagens. Conclui que o método de análise pela técnica do “cepstrum” se mostrou sensível quanto às mudanças nos sinais de vibrações, especialmente para separar espectros com bandas laterais mistas oriundas de modulações em frequência, comuns na identificação do espectro relacionado ao defeito.

Técnica de Detecção por Envelope

A técnica de detecção por envelope HFRT permite a identificação de falhas em rolamentos através da extração das frequências características de defeitos a partir do sinal de vibração medido por um transdutor na faixa de altas frequências, geralmente entre 5 kHz e 20 kHz. Os impulsos de vibração gerados pelos defeitos excitam periodicamente as ressonâncias dos elementos rolantes, caixa do mancal e estrutura da máquina. Estes impulsos são gerados pela passagem dos elementos rolantes sobre a falha, tendo as amplitudes dos

sinais moduladas pelas frequências características relacionadas aos defeitos. Através da demodulação destas ressonâncias, uma indicação da condição do rolamento pode ser obtida em baixas frequências, mostrando claramente estas frequências características.

Na prática, o sinal é filtrado através de um filtro passa-banda em torno da frequência central de ressonância, eliminando a maior parte da vibração gerada por componentes da máquina, ruídos de baixa frequência que dificultam a análise pelo espectro direto via FFT. Este tipo de análise forma a base da técnica por envelope HFRT, sendo que a faixa de frequência de ressonância mais conveniente tem sido encontrada experimentalmente. O sucesso da técnica já foi demonstrado por vários investigadores especialmente quando a falha se localiza na pista externa. Porém apresenta espectro confuso com muitas linhas adicionais quando a falha se localiza na pista interna ou nos elementos rolantes, bem como em situações em que ocorre a extensão da falha (MCFADDEN & SMITH, 1984a).

Num estudo realizado por NUNES (1989), utilizando rolamentos com associações de falhas nas duas pistas ao mesmo tempo, falha conjunta em uma das pistas e nas esferas ou ainda nas esferas juntamente com a gaiola, observou-se que existe o risco de não se conseguir diagnosticar todas as falhas do rolamento porque o elemento que gera maior impacto irá dominar o espectro de frequências dificultando a detecção de outras falhas no rolamento em questão.

Método do Pulso de Choque

O método do pulso de choque (SPM), baseia-se no desenvolvimento de ondas de choque mecânico de natureza ultrasônica, que são causadas pelos impactos dos elementos rolantes sobre as pistas do rolamento. A instrumentação consiste de um acelerômetro piezoelétrico com frequência de ressonância em torno de 32 kHz (alguns chegam a 100 kHz) e um detector de pico. O pulso de choque gerado por uma falha interna no rolamento será transmitido como uma oscilação na frequência de ressonância do

acelerômetro. Os inventores do método SPM alegam que a vibração normal num componente em boas condições é limitada à faixa de frequências abaixo de 20 kHz. Utilizando-se transdutores com frequências de ressonância da ordem de 32 kHz, os distúrbios ou ruídos normais não afetam as amplitudes do pulso de choque (BOTÖ, 1971).

Os valores padronizados dos pulsos de choque têm sido obtidos após testes empíricos e são utilizados como indicativo da condição do rolamento. Valores obtidos entre 0 e 20 dB são classificados para os rolamentos que estão em boas condições, de 20 a 35 dB são toleráveis e de 35 a 60 dB são considerados como elementos sujeitos a falhas.

O método SPM tem ganho larga aceitação industrial e obtido sucesso como técnica de detecção de falhas em rolamentos sob diversas condições (KIM, 1984). No entanto, alguns investigadores têm questionado a sua eficiência mostrando que a técnica se mostrou sensível às condições de operação tais como cavitação e turbulência em bombas (ENGJA & LIPPE, 1977). Também em situações onde os rolamentos operam a baixas velocidades ou estão sujeitos a distúrbios como falta de lubrificação, os resultados são discutíveis, não indicando crescimento de falhas efetivamente (MATHEW & ALFREDSON, 1984).

Métodos Acústicos (Pressão e Intensidade do Som)

A pressão do som gerada por rolamentos em boas condições tem sido estudada por vários pesquisadores, mas pouco tem sido publicado como técnica de detecção de falhas. A medida da pressão sonora pode ser uma alternativa conveniente, porém a detectibilidade das falhas em rolamentos pode ser afetada por outras fontes de ruído externo (NAGAMATSU & FUKUDA, 1978). O uso das medidas de pressão sonora para detecção de falhas em rolamentos também é discutido por IGARASHI & YABE (1983).

Uma técnica mais recente para detecção de falhas em rolamentos é a medida da intensidade sonora. Como esta é uma quantidade vetorial, deve-se

utilizar sensores acoplados em dois microfones cujas características são direcionais. A intensidade do som no domínio da frequência pode ser obtida conforme mostram FAHY (1977) e CHUNG (1978). Para várias situações de análise TANDON & NAKRA (1990) mostraram que as medidas de intensidade sonora apresentam melhores resultados que as medidas da pressão sonora para a detecção de falhas em rolamentos.

Em estudo recente VARGAS (1996) comparou as medidas da pressão e de intensidade sonora com medidas de vibrações obtidas em rolamentos sujeitos a diversas condições de falhas introduzidas artificialmente na pista externa, utilizando as técnicas do espectro direto FFT e do envelope HFRT. Concluiu que as medidas de vibrações se mostraram bem superiores às medidas acústicas, sendo que entre as medidas acústicas, a da intensidade sonora apresentou melhores resultados que as medidas da pressão sonora. Para futuros trabalhos é sugerido a utilização de câmaras anecóicas para minimizar o efeito da presença de ruídos externos, que afetaram bastante as medidas acústicas realizadas, conforme relata VARGAS.

Método de Emissão Acústica (EA)

A emissão acústica é espontaneamente gerada por ondas elásticas produzidas dentro dos materiais sob tensão. A deformação plástica e o crescimento de trincas são as principais fontes de tensões nos metais. Os transdutores de EA são projetados para detectar ondas de tensão em frequências muito altas, geralmente maiores que 100 kHz, e apresentam a vantagem de detectar o desenvolvimento de trincas ainda abaixo da superfície do metal, enquanto no monitoramento por vibrações só é possível detectar falhas quando a trinca surge na superfície.

O uso da técnica de EA como medida da condição de rolamentos foi inicialmente proposta por ROGERS (1979) e aplicada por SMITH (1982) para detectar falhas na pista externa de rolamentos de baixa velocidade. TANDON & NAKRA (1992) investigaram o uso de alguns parâmetros de EA como a

amplitude de pico e contadores de nível, aplicados a rolamentos de baixa e média velocidade tendo obtido bons resultados. LI & LI (1995) empregaram duas funções discriminantes extraídas a partir de técnicas de processamento de sinais de curto tempo para a detecção de falhas em rolamentos. Concluíram que a técnica de monitoramento por Emissão Acústica é mais eficiente que as técnicas atuais de medidas acústicas (pressão e intensidade sonora) e de vibração, o que a torna uma técnica bastante promissora.

Métodos de Estimação Paramétrica

O monitoramento e análise de vibrações em rolamentos que operam a baixas velocidades (≤ 100 rpm) é repleto de dificuldades, inclusive devido à necessidade de registros de dados por longo tempo. MECHEFSKE & MATHEW (1993) propuseram um modelo paramétrico de estimação de espectros visando reduzir o tempo de aquisição para uma fração do tempo necessário pela técnica FFT. Neste caso, foram conduzidos testes num rolamento sujeito à falha induzida na pista externa e os resultados comparados com aqueles de um rolamento em boas condições. Os sinais de vibração foram obtidos para diversas configurações de velocidade de rotação (60 a 100 rpm) e de carregamento (0 e 23 kN). A partir de um modelo auto-regressivo (AR) para processos estacionários obtém-se estimativas de espectros usando-se poucos dados amostrais. Os resultados comprovam a sua eficiência e indicam a sua utilização para diagnóstico de falhas em rolamentos.

Em artigo mais recente BAILLIE & MATHEW (1996) introduzem o conceito de diagnóstico de falhas usando um banco observador de modelos auto-regressivos de séries temporais de sinais de vibração. Esta técnica de modelagem aplicada ao diagnóstico de falhas em rolamentos requer amostras de dados coletados bem menores que as técnicas de classificação de padrões usadas no campo de monitoramento de condição de máquinas. Os resultados da investigação indicam que desenvolvimentos futuros destes modelos são

justificáveis, especialmente no diagnóstico de falhas em máquinas rotativas de baixa velocidade e de velocidade variável.

Discussões sobre os Métodos de Análise de Vibrações

A partir da revisão de literatura sobre as técnicas de monitoramento e análise de vibrações aplicadas na detecção e diagnóstico de falhas em rolamentos, algumas considerações podem ser destacadas:

- i) As vibrações detectadas num mancal de rolamento dependem não apenas das fontes de vibração, mas também do meio de transmissão entre a excitação e o transdutor. Quando o sinal de vibração é transmitido através da estrutura da máquina, seus componentes de alta frequência são mais rapidamente amortecidos que as componentes de baixa frequência. Isto significa que nas baixas frequências a vibração no rolamento possui maior conteúdo de ruído de outras partes da máquina que nas altas frequências. Este fato explica porque o rolamento com falha incipiente apresenta maior facilidade de identificação na região de altas frequências;
- ii) As técnicas de análise no domínio do tempo através dos níveis x_{rms} e x_{pic} , fatores de crista F_c e curtose K , podem ser usadas para detectar falhas em rolamentos, porém apresentam algumas limitações. Estas técnicas são melhor empregadas na fase de estabelecimento de critérios e limites de condições aceitáveis de operação uma vez que alertam para o desenvolvimento de uma falha, porém dificilmente permitem um diagnóstico confiável do tipo e da localização da falha;
- iii) As técnicas de análise no domínio da frequência são capazes de detectar falhas através das componentes espectrais e diagnosticar sua localização com base nas frequências características relacionadas aos defeitos. Destaca-se como técnica já consagrada a detecção por envelope HFRT de ampla aceitação industrial. Esta técnica porém requer conhecimento

- especializado do analista quanto à escolha adequada da faixa de frequência de ressonância onde será aplicado o filtro passa-banda e apresenta limitações quando ocorre aumento generalizado da falha;
- iv) Dentre as técnicas que utilizam parâmetros acústicos, as medidas de emissão acústica EA parece ser uma boa técnica para detecção e diagnóstico de falhas em rolamentos, especialmente nos primeiros estágios de desenvolvimento de falhas, quando as medidas de vibrações podem não indicar falhas efetivamente. Porém para estágios de falhas mais avançados este método apresenta resultados controversos;
 - v) Recentemente têm surgido novas técnicas que parecem ser promissoras, especialmente aquelas que combinam detecção e diagnóstico automático de falhas em rolamentos. Dentre estas destacam-se as técnicas de reconhecimento e classificação de padrões, baseadas em teorias como inferência indutiva e testes de hipóteses, que utilizam modelos paramétricos para a estimação de espectros. Algumas pesquisas demonstram que a combinação de várias técnicas pode ser a solução mais adequada para os problemas encontrados no monitoramento de condição de máquinas.

2.4 MÉTODOS DE ANÁLISE CONJUNTA TEMPO-FREQUÊNCIA APLICADOS NO MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES

As limitações dos métodos usuais para detecção e diagnóstico de falhas em rolamentos já foram destacadas. Mesmo os métodos do domínio da frequência, baseados na aplicação da transformada de Fourier, não permitem discriminar falhas decorrentes de efeitos locais transientes e, por isso, causam perda de informações sobre a natureza e forma destas variações. Enquanto a representação do espectro em frequência obtido via FFT é uma função unidimensional que representa a potência média do sinal de vibração em função da frequência, as representações tempo-frequência são funções bidimensionais que fornecem informações de como se comportam as diferentes componentes em frequência de um sinal a cada instante de tempo.

Esta dependência pode ser linear, quadrática ou outras não-lineares. Dentre as transformadas lineares se destacam as transformadas de Fourier de curto tempo (STFT), a transformada de Gabor e a transformada de “wavelets”. Nas representações bilineares as distribuições de Wigner-Ville (WVD), Choi-Williams (CWD) e Cohen-Posch (CPD) são as mais conhecidas. Maiores detalhes sobre a formulação matemática destas distribuições, bem como algumas de suas propriedades e procedimentos de implementação são apresentados no capítulo 4. Uma revisão matemática mais completa é feita por COHEN (1989).

No campo de monitoramento e análise de vibrações aplicado a máquinas rotativas várias contribuições têm sido publicadas recentemente demonstrando que o uso destas representações pode se tornar uma ferramenta bastante promissora na análise de sinais que apresentam características transientes ou não-estacionários.

FORRESTER (1992) iniciou suas investigações analisando o comportamento de alguns tipos de falhas em redutores de engrenagens aplicando as distribuições STFT e WVD através das mudanças na amplitude e na fase do sinal. É feita uma breve revisão sobre os métodos usuais de monitoramento de engrenagens sendo enfatizada a análise espectral, o método de análise dos resíduos e da demodulação do sinal no domínio do tempo. Como aplicação foram estudados os efeitos da introdução de falhas em dentes de engrenagens do tipo trincas e crateras superficiais devido à fadiga. O método STFT apesar de ser mais simples possibilitou melhores resultados em termos de facilidade de interpretação do fenômeno, mostrando-se mais sensível na identificação de sinais cujas mudanças sejam relativamente lentas. A distribuição WVD também detectou estas falhas porém não foram verificadas mudanças significativas nos diversos estágios de falha, tendo melhor indicação para situações em que se deseja identificar mudanças súbitas nos sinais de vibração.

WANG & MCFADDEN (1993a) também investigaram a aplicação do espectrograma STFT para sinais de vibração medidos em redutores de engrenagens, sendo dada ênfase à escolha da função de janela Gaussiana

como a melhor proposta para cálculo da distribuição de energia, o que corresponde à transformada de Gabor. Os resultados mostraram-se satisfatórios tanto para sinais que apresentam múltiplas componentes gerados numericamente quanto para sinais obtidos experimentalmente. Estes apontaram algumas desvantagens da utilização da WVD aplicada no monitoramento de falhas em sistemas de engrenagens, principalmente quanto à sua não-linearidade inerente que causa termos de interferência entre os sinais originais, dificultando a análise. Observam que a presença de um pico obtido na WVD tanto pode representar os componentes verdadeiros do sinal analisado quanto pode ser uma falsa imagem produzida pela interferência de outros componentes presentes no sinal.

Num trabalho complementar WANG & MCFADDEN (1993b) aplicaram técnicas de processamento de imagens como proposta de diagnóstico automático de falhas em redutores de engrenagens utilizando o espectrograma STFT. Analisaram o caso típico de falhas devido ao surgimento de crateras superficiais nos dentes de engrenagens, utilizando o sinal residual obtido a partir da remoção das componentes múltiplas das frequências de engrenamento contidas no sinal original. Este procedimento resultou na obtenção de componentes mais correlacionados com a falha permitindo que as imagens tempo-frequência apresentem contornos bem definidos, facilitando a sua interpretação.

SHIN & JEON (1993) discutem os principais parâmetros que afetam a distribuição WVD e propõem o uso da distribuição Pseudo-Wigner-Ville (PWVD) como uma ferramenta mais efetiva para análise de sinais em máquinas rotativas que operam de modo transiente ou não-estacionário. O método PWVD se caracteriza pela aplicação de uma janela móvel do tipo Gaussiana visando reduzir as interferências e valores negativos comuns nas distribuições WVD. A partir da análise de sinais simulados com diferentes taxas de variação em frequência, o método PWVD se mostrou eficiente reduzindo sensivelmente os termos cruzados e evitando possíveis problemas de "aliasing", o que garante uma análise correta da distribuição como ferramenta de diagnóstico.

GONZÁLEZ *et al* (1996) aplicaram o método PWVD proposto por SHIN & JEON (1993) justificando que apesar da propriedade de linearidade oferecida pelas transformadas lineares, as transformadas bilineares apresentam a vantagem de proporcionar melhor resolução tempo-frequência. São apresentados exemplos de sinais típicos obtidos de rotores desbalanceados com roçamento intermitente, partida rápida de motores, sistemas de engrenagens e outros tipos de vibrações moduladas em amplitude e frequência. O método PWVD se mostrou eficiente na redução dos efeitos dos termos cruzados ou de interferências da distribuição WVD. Entretanto o uso da janela Gaussiana causa uma perda de resolução no tempo e em frequência dos termos próprios dos sinais, o que pode reduzir sua sensibilidade para algumas situações de falhas.

STASZEWSKI *et al* (1997) discutem o problema da detecção de falhas baseada na observação dos mapas de contorno das distribuições Wigner-Ville (WVD), através do contraste entre zonas escuras e bandas curvas representando as características impulsivas devido a falhas em engrenagens. Esclarecem que o uso dos mapas para detecção de falhas através da inspeção visual é limitada, devido à dificuldade de distinguir entre pequenos avanços consecutivos de falhas. Como não existe ainda um procedimento bem estabelecido para detecção de falha automática usando a distribuição WVD, são propostos o uso de técnicas como classificação de padrões, processamento de imagens e redes neurais. Foram investigados a aplicação do método WVD para análise de falhas introduzidas num par de engrenagens, através da remoção parcial das superfícies dos dentes simulando quatro condições de avanço de falhas (25, 50, 75, e 100 %). Os sinais de vibração foram medidos numa faixa de análise de 0 a 6,4 kHz e processados utilizando a WVD da média dos sinais no tempo, a WVD do sinal residual e a WVD ponderada do sinal residual. Os resultados confirmam que para condições mais severas de falhas simulando a quebra parcial do dente, o método WVD ponderado utilizando o sinal residual permite visualizar mais nitidamente as características relacionadas com os impactos produzidos pela falha, reduzindo os termos de interferências devido às componentes relacionadas

com as frequências de engrenamento. Por outro lado, ocorre uma redução da resolução em frequência e sensibilidade na detecção de falhas pequenas.

LOUGHLIN & BERNARD (1997) comparam a distribuição de Cohen-Posch (CPD) com o método STFT para análise de vibrações em máquinas. São demonstrados alguns casos de análise onde os métodos STFT falham, especialmente quanto às limitações de escolha da resolução. Para a resposta de um sistema de segunda ordem sub-amortecido observa-se que enquanto o espectrograma de banda larga apresenta distorções nas linhas espectrais, o espectrograma de banda estreita apresenta distorções no decaimento temporal que ocorre a cada período, o que dificulta a análise. Por outro lado a distribuição CPD satisfaz as propriedades fundamentais de captura simultânea das características temporal e espectral da resposta do sistema. São citadas outras aplicações que justificam o uso do método CPD em relação ao método STFT para problemas de monitoramento e análise de vibrações, o que revela suas potencialidades como indicador de degradação em máquinas rotativas.

OEHLMANN *et al* (1997) apresentam uma nova metodologia para detecção e diagnóstico de falhas em sistemas mecânicos rotativos por análise de vibrações utilizando o procedimento de otimização da função de núcleo proposto por BARANIUK & JONES (1993). Como modelo de análise foi utilizado um sistema de transmissão automotiva acionado por um motor assíncrono girando a 75 Hz e composto por dois eixos rotativos, quatro rolamentos e cinco pares de engrenagens helicoidais. Para aquisição dos sinais foram instalados sensores localizados em doze posições da carcaça. Como fontes de excitação são introduzidas falhas artificiais localizadas nos dentes de engrenagens e nas pistas dos rolamentos. Inicialmente é feita uma investigação dos problemas relacionados com a introdução de falhas em engrenagens visando interpretar fisicamente o significado das representações tempo-frequência a partir da análise das estruturas que apresentam maior conteúdo de energia. É proposto o desenvolvimento de modelos teóricos para assegurar que os componentes principais encontrados nas representações tempo-frequência caracterizem bem as falhas. Analisando-se os sinais

obtidos com falhas introduzidas nos dentes de engrenagens, estas representações são vistas como estruturas do tipo lineares, caracterizando-se como sinais do tipo não-estacionário. Já analisando-se os sinais com falhas introduzidas nas pistas dos rolamentos as representações mostraram dois tipos de estruturas distintas: falhas na pista externa resultaram em manchas ou “spots” regularmente espaçadas e invariantes no tempo, conforme modelo proposto por MCFADDEN & SMITH (1984b). Porém no caso de falhas na pista interna o fenômeno é mais complicado, apresentando frequência e amplitude de “spots” que mudam conforme a posição da falha, o que caracteriza sinais do tipo não-estacionário.

Discussões sobre os Métodos de Análise Conjunta Tempo-Frequência

Face à revisão apresentada acredita-se que a aplicação destes métodos como ferramenta de detecção e diagnóstico de falhas em sistemas mecânicos venha a contribuir de forma contundente nas interpretações de vários problemas ainda considerados como de difícil análise pelos métodos usuais. No caso dos fenômenos gerados pelo desenvolvimento de falhas em rolamentos verifica-se que os padrões vibratórios dos sinais, extraídos nos diversos estágios de falhas, apresentam características variantes no tempo e em frequência, especialmente quando as falhas se localizam na pista interna ou nos elementos rolantes. Aspectos importantes relacionados à captação simultânea das características temporais e espectrais dos sinais de vibração são indicativos de que estas representações podem se tornar uma ferramenta promissora para monitoramento e análise de vibrações.

Uma breve revisão sobre os critérios gerais de severidade de vibrações em máquinas rotativas e discussão de alguns métodos específicos de análise de vibrações aplicados a rolamentos, incluindo os métodos de análise conjunta tempo-frequência é feita por SILVA & MUCHERONI (1997).

Capítulo 3

MODELOS DE VIBRAÇÕES PARA FALHAS EM ROLAMENTOS

3.1 TEORIA BÁSICA

Os modos de falhas típicos encontrados em rolamentos estão relacionados com a deterioração progressiva de suas superfícies de contato ou com falhas prematuras originadas por diversas causas como montagem inadequada, lubrificação imprópria, inclusão de materiais estranhos no rolamento e surgimento de trincas superficiais resultantes de fadiga (RYCKALTS, 1992). Dentre estas, as trincas originadas por fadiga superficial das pistas, resultantes do carregamento periódico entre os elementos rolantes e as superfícies de contato, têm sido as mais difíceis de se evitar a partir do controle das condições de operação, razão pela qual será examinada mais em detalhes.

Quando uma superfície defeituosa entra em contato com outra superfície é produzido um pulso de curta duração que pode excitar muitas frequências de ressonância do sistema. Se o rolamento está girando com velocidade angular constante, os pulsos de contato serão periódicos com frequências que dependem da geometria e da localização da falha. Os sinais de vibrações produzidos por uma falha na pista estacionária, apresentam amplitudes de impactos constantes durante a rotação do eixo, pois a falha sempre estará sujeita à mesma carga. Porém quando a falha se localiza na pista interna, se deslocará de acordo com a rotação. Conforme o carregamento incidente varia, ocorrerá uma modulação na amplitude dos impactos, o que dificulta a análise. Um rolamento típico gera um espectro

contendo uma grande concentração de frequências e harmônicos associados. Se a falha é muito pequena, as vibrações resultantes dos impulsos serão pequenas excitando mais as componentes de altas frequências. Porém com o crescimento da falha ocorre um acréscimo de energia nas baixas frequências facilitando o uso das técnicas de análise espectral (ANGELO, 1987). Além das vibrações induzidas pelas falhas no rolamento, outras fontes de vibrações devem ser incluídas tais como: erros geométricos de fabricação dos elementos rolantes e das pistas bem como distúrbios externos oriundos de ruídos e de vibrações estruturais.

3.2 VIBRAÇÕES E FREQUÊNCIAS CARACTERÍSTICAS DE DEFEITOS

As vibrações geradas por um rolamento novo são de nível baixo e vistas como um ruído aleatório. Porém com o surgimento e desenvolvimento de falhas, as vibrações começam a se modificar e a apresentar frequências características. A FIGURA 3.1 mostra a geometria típica de um rolamento de esferas girando no sentido horário para dedução das equações cinemáticas e obtenção das frequências relacionadas aos defeitos.

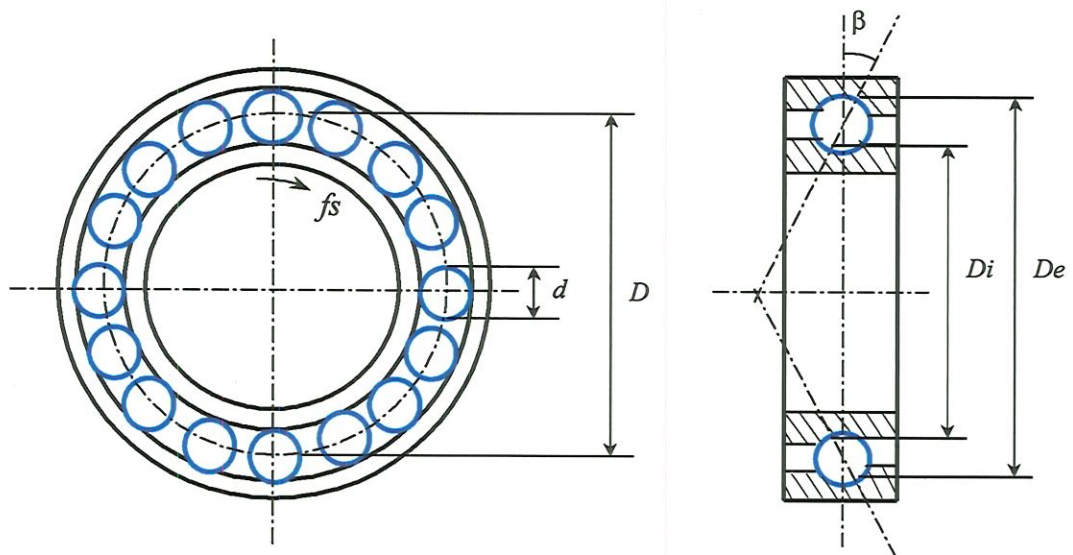


FIGURA 3.1 – Geometria básica de rolamento de esferas.

onde: d = diâmetro das esferas ou rolos (mm);

n_b = número de esferas ou elementos rolantes;

D = diâmetro médio do círculo primitivo (mm);

D_e = diâmetro efetivo da pista externa (mm);

D_i = diâmetro efetivo da pista interna (mm);

β = ângulo de contato no elemento.

Algumas relações geométricas básicas entre os diâmetros efetivos e o diâmetro médio entre esferas são dadas por:

$$D_e = D + d \cos \beta = D \left[1 + \left(\frac{d}{D} \right) \cos \beta \right] \quad (3.1)$$

$$D_i = D - d \cos \beta = D \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right) \cos \beta \right] \quad (3.2)$$

Considerando que as esferas rolam sobre as pistas sem deslizamento, e que a pista externa do rolamento é estacionária, podem-se obter algumas relações cinemáticas importantes entre a velocidade de rotação do eixo e as demais componentes do rolamento (BARRON, 1996):

$$D f_g = -f_{sb} d \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{2} D_i f_s = -f_{sb} d \quad (3.4)$$

onde: f_g = frequência de rotação da gaiola (Hz);

f_s = frequência de rotação do eixo (Hz);

f_{sb} = frequência de rotação da esfera ou “spin” (Hz);

Frequência Característica da Gaiola

A frequência de rotação da gaiola, que coincide com a frequência de rotação dos centros das esferas, é obtida a partir da geometria do rolamento. Comparando-se as equações (3.3) e (3.4), obtém-se

$$D f_g = \frac{1}{2} D_i f_s \quad (3.5)$$

Substituindo-se a equação (3.2) na equação (3.5), obtém-se a frequência característica da gaiola

$$f_g = \frac{1}{2} f_s \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right) \cos \beta \right] \quad (3.6)$$

Frequência Característica de Defeito na Pista Interna

A caracterização de falhas nas pistas dos rolamentos depende do número de impactos por rotação do eixo que ocorre devido à passagem das esferas sobre a superfície defeituosa. Esta taxa de impactos depende do número de esferas e da velocidade relativa entre as pistas defeituosas e o centro das esferas, equivalente à frequência característica da gaiola. Para uma falha na pista interna, tem-se a relação (BARRON, 1996):

$$f_i = n_b (f_s - f_g) \quad (3.7)$$

onde f_i é a frequência característica de defeito na pista interna. Substituindo-se a equação (3.6) na equação (3.7), obtém-se:

$$f_i = \frac{n_b}{2} f_s \left[1 + \left(\frac{d}{D} \right) \cos \beta \right] \quad (3.8)$$

Frequência Característica de Defeito na Pista Externa

Seguindo o mesmo raciocínio anterior, para uma falha na pista externa obtém-se a relação:

$$f_e = n_b (f_o - f_g) \quad (3.9)$$

onde f_e é a frequência característica de defeito na pista externa e f_o é a frequência de rotação da pista externa. Substituindo-se a equação (3.6) na equação (3.9), obtém-se:

$$f_e = \frac{-n_b}{2} f_s \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right) \cos \beta \right] \quad (3.10)$$

onde, observa-se que $f_o = 0$, devido à pista externa ser estacionária. O sinal negativo indica que o sentido de rotação das esferas é contrário à frequência de rotação do eixo.

Frequência Característica de Defeito nas Esferas

Uma falha numa das esferas irá produzir impulsos tanto na pista externa com na pista interna a cada rotação da esfera em torno do seu eixo. Portanto, a frequência característica das esferas é obtida multiplicando-se por dois a razão entre as frequências de rotação das esferas em relação à gaiola:

$$f_b = 2 (f_{sb} - f_g) \quad (3.11)$$

onde f_b é a frequência característica de defeito nas esferas. Substituindo as equações (3.3) e (3.6) na equação (3.11), obtém-se:

$$f_b = -\frac{D}{d} f_s \left\{ 1 - \left[\left(\frac{d}{D} \right) \cos \beta \right]^2 \right\} \quad (3.12)$$

onde observa-se que a frequência característica f_b não depende do número de esferas ou elementos rolantes.

3.3 MODELO DE VIBRAÇÃO PARA FALHAS NA PISTA EXTERNA

Quando uma falha, localizada numa das superfícies, entra em contato com outra superfície em movimento, é gerado um pulso de curta duração que pode excitar muitas frequências de ressonâncias do sistema. A duração de cada modo de vibrar depende do fator de amortecimento estrutural e do meio de transmissão entre o ponto defeituoso e o sensor de vibração. Neste modelo supõe-se que apenas o modo dominante com frequência $\omega_c = 2\pi f_c$ é significativo e que os pulsos são gerados em intervalos regulares T_d correspondentes à frequência característica de defeitos $f_d = 1/T_d$. A resposta vibratória $x_i(t)$ do sistema no tempo para uma falha na pista externa é dada por BRAUN & DATNER (1979):

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g_i(t - kT_d) U(t - kT_d) \quad (3.13)$$

onde:

$$g_i(t) = A_i \exp(-\alpha_i t) \text{sen} \omega_c t \quad (3.14)$$

$$U(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } t < 0 \\ 1 & \text{para } t \geq 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Nas expressões acima, k é o índice do período, $g_i(t)$ é a resposta estrutural do impacto induzido pela falha, α_i é um parâmetro relacionado ao amortecimento da estrutura e $U(t)$ é a função degrau unitário.

O padrão característico do sinal de vibração $x_i(t)$ devido à falha é modificado pela resposta impulsiva da estrutura de modo que, para m falhas, o sinal medido no suporte do mancal de rolamento $v(t)$, é dado por:

$$v(t) = \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{\infty} A_i \exp[-\alpha_i(t - kT_d)] \text{sen}[\omega_c(t - kT_d)] U(t - kT_d) \right\} * h(t) \quad (3.16)$$

onde $h(t)$ é a resposta impulsiva do caminho de transmissão entre os pontos de geração dos pulsos e de medida. O símbolo $*$ significa produto da convolução.

O sinal real medido em um rolamento com falhas é a soma do sinal descrito pela equação (3.16) com um sinal aleatório de banda larga gerado pelo contato das superfícies em boas condições. Assim, a história temporal do sinal medido é de análise bastante complicada tornando difícil que se tirem conclusões sobre o estado do rolamento. Este problema pode ser contornado fazendo-se a análise em frequência através da transformada de Fourier, que aplicada ao sinal $x_i(t)$ obtido na equação (3.13), pode ser expressa na forma

$$X_i(\omega) = 2\pi \sum_{n=0}^{\infty} X_{in}(\omega) \delta(\omega - n\omega_d) \quad (3.17)$$

onde δ é a função impulso unitário, $\omega_d = 2\pi/T_d$ e X_{in} é o coeficiente da série exponencial de Fourier, dado por

$$X_{in} = \frac{1}{T_d} \int_{-T_d/2}^{T_d/2} g_i(t) \exp(-jn\omega_d t) dt \quad (3.18)$$

onde j é a unidade imaginária igual a $\sqrt{-1}$.

A FIGURA 3.2a mostra a representação no tempo do modelo de vibração proposto a partir da equação (3.13) em que observa-se uma série de pulsos repetidos com periodicidade T_d e amplitudes decrescentes devido ao efeito do amortecimento estrutural. A FIGURA 3.2b mostra o espectro em frequência obtido pela equação (3.17), onde nota-se uma série de componentes espectrais separados pela frequência característica de defeitos $f_d = 1/T_d$, e um aumento na densidade espectral em torno da frequência central de ressonância f_c .

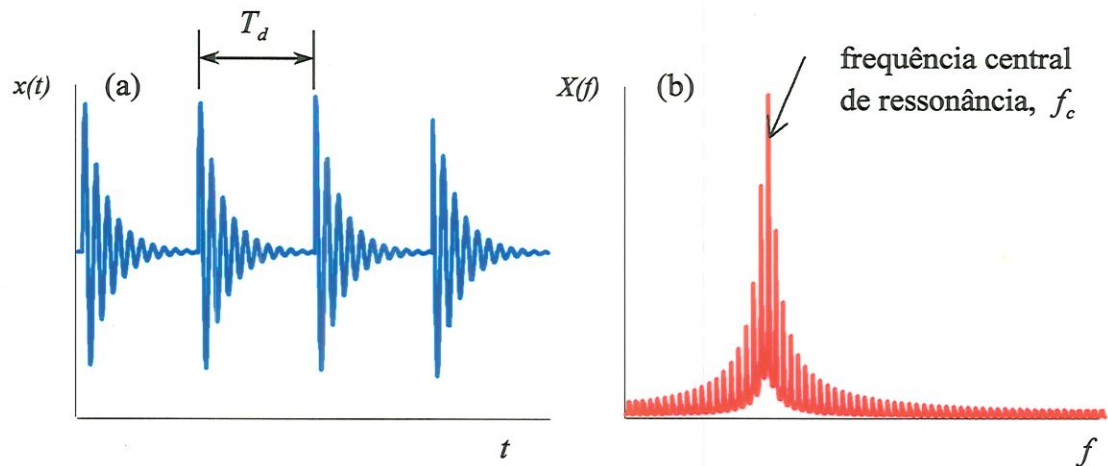


FIGURA 3.2 – Modelo de vibrações em rolamentos com falha na pista externa.
(a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência.

O teorema da convolução no tempo mostra que se $X(\omega)$ é a transformada de Fourier de $x(t)$ e $H(\omega)$ é a transformada de Fourier de $h(t)$, respectivamente, é válida a seguinte relação:

$$\mathfrak{F}[x(t) * h(t)] = X(\omega) \cdot H(\omega) \quad (3.19)$$

Aplicando-se o teorema da convolução no tempo para a equação (3.17), obtém-se

$$V(\omega) = \left[2\pi \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^{\infty} X_{in}(\omega) \delta(\omega - n\omega_d) \right] H(\omega) \quad (3.20)$$

Devido à linearidade do modelo estrutural pode-se somar à equação (3.20) a transformada de Fourier do ruído aleatório de banda larga $R(\omega)$, obtendo-se a transformada de Fourier do sinal medido em um rolamento com m falhas:

$$V_m(\omega) = \left[2\pi \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^{\infty} X_{in}(\omega) \delta(\omega - n\omega_d) \right] H(\omega) + R(\omega) \quad (3.21)$$

O módulo da equação (3.21) representa um modelo matemático simplificado para o espectro em frequência do sinal de vibração de rolamentos com m falhas na pista externa. Uma observação interessante é que quando $m=0$ (nenhuma falha), obtém-se $X_{in} = 0$, restando apenas o ruído $R(\omega)$ conforme havia sido previsto para o rolamento em boas condições. Analisando-se um espectro real, além da contribuição do ruído aleatório, observam-se picos discretos nas frequências características de defeitos e nos seus harmônicos (TAYLOR, 1980).

3.4 MODELO DE VIBRAÇÃO PARA FALHAS NA PISTA INTERNA

Um dos modelos que visa explicar satisfatoriamente as características das linhas espectrais observadas na análise de rolamentos defeituosos foi proposto por MCFADDEN & SMITH (1984b) através da técnica do envelope HFRT. Os princípios do modelo foram desenvolvidos considerando a vibração gerada por uma falha na pista interna rotativa do rolamento e são baseados em funções relacionadas com a frequência de rotação, distribuição de carga, meio de transmissão entre o rolamento e o transdutor e o decaimento exponencial das frequências das ressonâncias excitadas. Embora

tenha sido desenvolvido apenas para falhas na pista interna, este modelo também pode ser aplicado para falhas na pista externa ou nas esferas de rolamentos sujeitos à carga radial e axial. É dada uma grande ênfase na representação gráfica destas funções nos domínios do tempo e da frequência, visando mostrar o efeito dos parâmetros envolvidos na análise. Uma análise mais completa considerando a extensão do modelo para múltiplas falhas em rolamentos é dada por MCFADDEN & SMITH (1985).

Modelo de Vibração para Um Trem de Impulsos Unitários

A excitação produzida por um único impacto de um ponto defeituoso numa superfície contra a outra superfície é modelada como um impulso e representada pela função de impulso unitário $\delta(t)$. A severidade da falha será representada pela multiplicação da função de impulso pela constante d_o . O impulso representa a função de excitação ou entrada do sistema enquanto o espectro em frequência representa a resposta do sistema, medida na estrutura da máquina.

Supondo-se que o rolamento possui a pista externa estacionária e que a pista interna gira com velocidade de rotação constante, estes impulsos serão de natureza periódica com frequências características dependentes da localização da falha e da geometria do rolamento, conforme equações mostradas no ítem 3.2. A FIGURA 3.3 mostra a representação de um rolamento com uma falha na pista interna cuja localização está relacionada com a linha de aplicação da carga radial pelo ângulo θ . Assume-se também que no instante de tempo $t=0$ a falha está localizada na posição $\theta=0$ e que a mesma está em contato com a esfera.

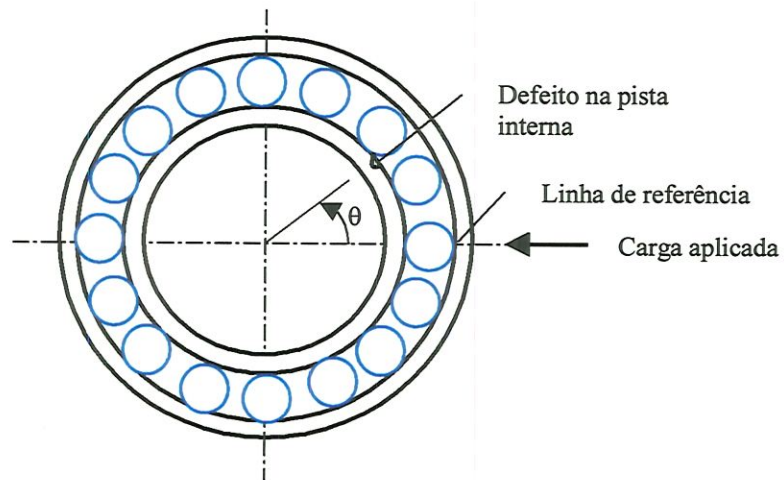


FIGURA 3.3 – Rolamento com falha na pista interna.

Inicialmente, assume-se que os impactos produzidos pelas esferas sobre a falha são distribuídos uniformemente através de uma carga unitária ao longo do rolamento. Portanto, a vibração produzida pela falha pode ser modelada como uma série infinita de impulsos de igual amplitude, cujo período de repetição é dado por $T_d = 1/f_d$. A função trem de impulsos $d(t)$ é representada pela equação

$$d(t) = d_o \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_d) \quad (3.22)$$

A função $d(t)$ é mostrada graficamente na FIGURA 3.4a, onde assume-se que no instante de tempo $t=0$ a falha está localizada na posição $\theta=0$, significando que um destes impulsos ocorre exatamente no instante $t=0$.

A transformada de Fourier de uma série infinita de impulsos no tempo é também uma série infinita de impulsos no domínio da frequência. A transformada de Fourier de $d(t)$ é dada pela equação:

$$D(f) = d_o f_d \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(f - k f_d) \quad (3.23)$$

Esta transformada de Fourier é mostrada graficamente na FIGURA 3.4b, onde observa-se que como a função $d(t)$ é real e par, sua transformada de Fourier também é real e par.

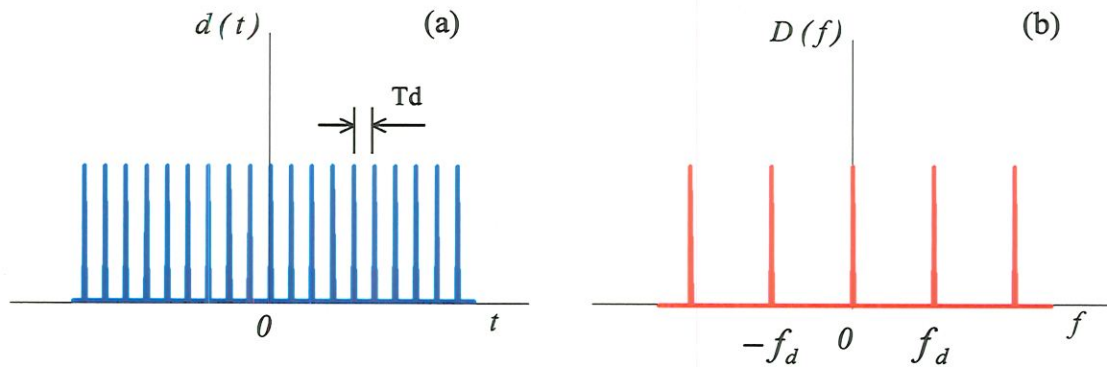


FIGURA 3.4 – Impulsos produzidos por uma falha na pista interna sob carga unitária. (a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência.

Modelo de Distribuição de Carga Radial no Rolamento

A distribuição de carga ao longo da circunferência de um rolamento sob carregamento radial é determinada pelas deformações elásticas nos pontos de contato entre os elementos rolantes e as pistas, sendo definida pela equação de Stribeck (HARRIS, 1966):

$$q(\theta) = q_o [1 - (1/2\varepsilon)(1 - \cos\theta)]^n \quad (3.24)$$

onde q_o é a máxima intensidade de carga, ε é o fator de distribuição de carga, θ é a posição angular da zona de carga, $n=3/2$ para rolamentos de esferas e $n=10/9$ para rolamentos de rolos. Em rolamentos com folga positiva, $\varepsilon < 0.5$ e $\theta_{\max} < \pi/2$, obtendo-se uma distribuição de carga conforme mostra a FIGURA 3.5.

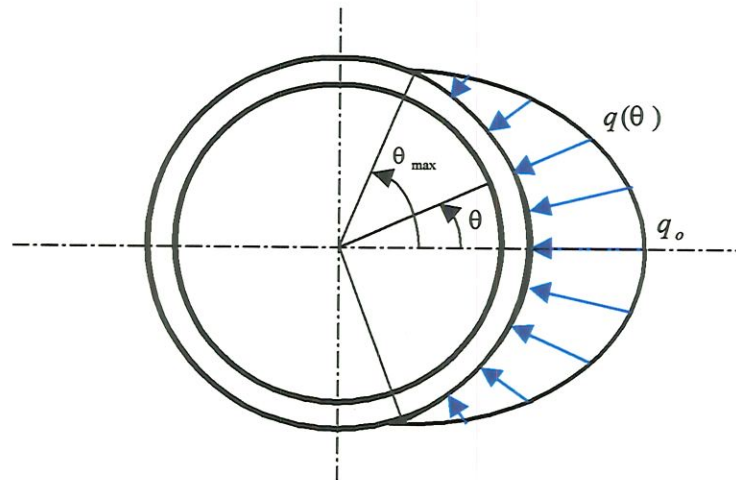


FIGURA 3.5 – Distribuição de carga radial na pista interna do rolamento.

Observa-se que a equação de Stribeck (3.24) não leva em consideração pequenas flutuações na distribuição de carga que podem ocorrer devido à mudança do número e posição dos elementos rolantes na zona de carga.

A função no tempo representando a carga instantânea num ponto da pista interna do rolamento pode ser obtida substituindo θ por $2\pi f_s t$, onde f_s é a frequência de rotação do eixo em revoluções por segundo (Hz), ou seja

$$q(t) = \begin{cases} q_0 [1 - (1/2\varepsilon)(1 - \cos 2\pi f_s t)]^n & \text{para } |\theta| < \theta_{\max} \\ 0 & \text{fora} \end{cases} \quad (3.25)$$

A FIGURA 3.6a mostra $q(t)$ como uma função periódica cuja separação entre centros da distribuição de carga é igual ao período de rotação $T_s = 1/f_s$ e apresenta uma distribuição das curvas centrada na origem em $t = 0$.

Uma forma aproximada da transformada de Fourier da função $q(t)$ é mostrada na FIGURA 3.6b, em que a transformada $Q(f)$ consiste de uma série de impulsos no domínio da frequência separados pela frequência de rotação f_s .

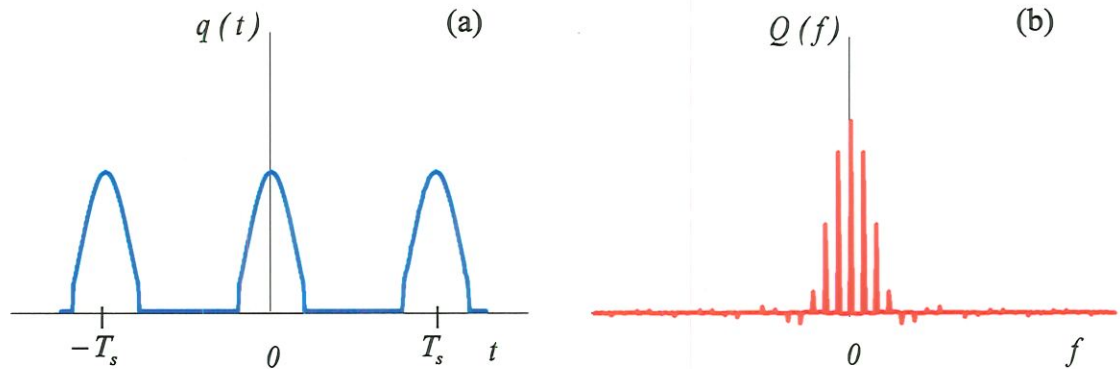


FIGURA 3.6 – Distribuição de carga radial na pista interna do rolamento.
(a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência.

Modulação dos Impulsos pela Carga

Assumindo-se que a amplitude dos impulsos produzidos pelas falhas é diretamente proporcional à carga na esfera, pode-se obter uma expressão da amplitude dos impulsos multiplicando as séries de impulsos $d(t)$, produzidos sob carga unitária, pela distribuição de carga $q(t)$. A formação do produto é ilustrado graficamente na FIGURA 3.7a. Observa-se que os impulsos produzidos pelo produto $d(t).q(t)$ é diferente de uma rotação do eixo para outra pois a frequência de $d(t)$ não é necessariamente um múltiplo inteiro da frequência de $q(t)$, dependendo portanto da geometria do rolamento.

De acordo com a teorema da convolução se dois sinais são multiplicados no domínio do tempo, então suas transformadas de Fourier são convoluídas no domínio da frequência. A convolução de $D(f)$ e $Q(f)$ causa réplicas de $Q(f)$ em intervalos de f_d , estendendo-se para infinito em ambas as direções, conforme mostra a FIGURA 3.7b.

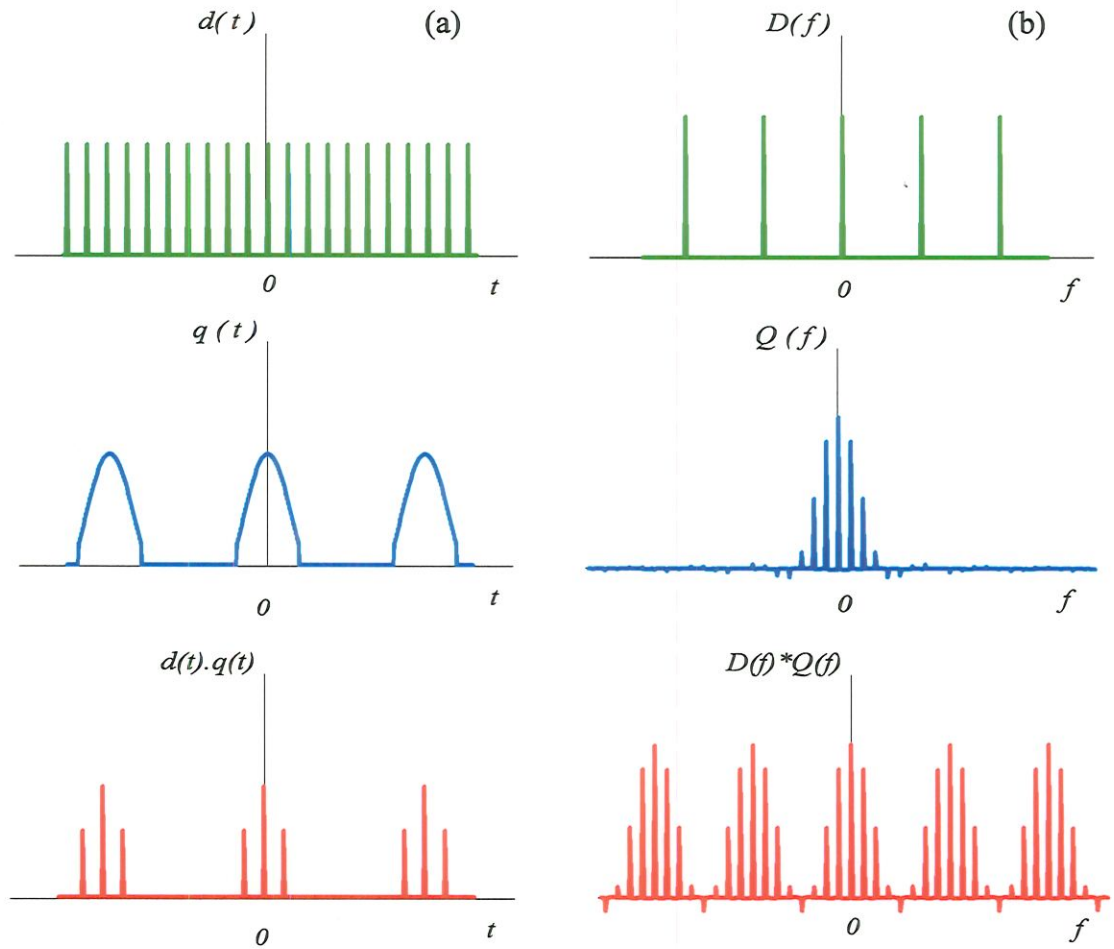


FIGURA 3.7 – Impulsos modulados por falha na pista interna do rolamento.

(a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência.

Transmissão da Vibração

Quando um impulso é aplicado sobre o rolamento, serão excitadas várias frequências de ressonâncias dos componentes do rolamento e da estrutura da máquina, que podem ser captadas por um transdutor localizado próximo ao suporte do mancal de rolamento. A vibração medida pelo transdutor expressa a resposta ao impulso do sistema mecânico compreendido pelo mancal de rolamento e máquina. A transformada de Fourier da resposta ao impulso fornece a função de transferência entre o ponto em que o impulso foi aplicado e o ponto de medida.



A FIGURA 3.8 mostra um diagrama esquemático do conjunto formado por rolamento, suporte da máquina e transdutor. Assume-se que o eixo de sensibilidade do transdutor coincide com a linha de referência quando $\theta = 0$ e que a estrutura da máquina é simétrica em relação a esta linha. Quando um impulso unitário é aplicado ao rolamento na posição de ângulo θ , a vibração medida pelo transdutor será a função de resposta ao impulso unitário $h(t)$.

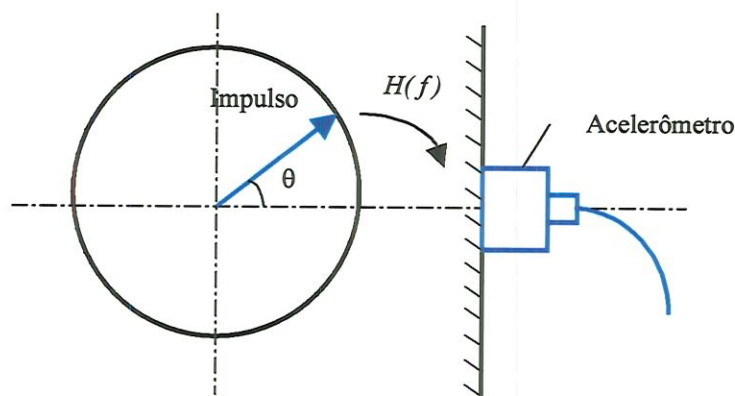


FIGURA 3.8 – Transmissão da vibração do rolamento para o transdutor.

Para um sistema linear de um grau de liberdade as características de transmissão da vibração podem ser especificadas assumindo-se que $h(t)$ pode ser representada por uma senóide com decaimento exponencial, conforme ilustrado na FIGURA 3.9a. A função de transferência $H(f)$ entre o mancal de rolamento e o transdutor é obtida conforme mostra a FIGURA 3.9b.

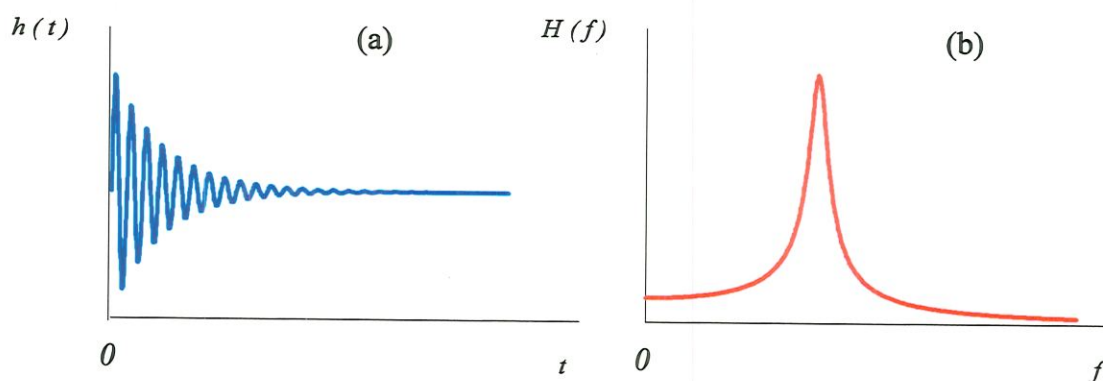


FIGURA 3.9 – Função de resposta ao impulso e função de transferência do sistema. (a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência.

Assumindo-se que a constante de tempo de decaimento exponencial é independente do ângulo θ , a resposta medida no transdutor devido ao impulso aplicado ao rolamento na posição θ pode ser caracterizado simplesmente pela amplitude em função de θ . A função de resposta ao impulso $h(t)$ e a função de transferência $H(f)$ podem ser substituídas por uma função $a(\theta)$ que fornece a amplitude e o sinal da função de transferência para cada ângulo θ . A amplitude instantânea da função de transferência entre o ponto de localização da falha e o transdutor em função do tempo, dada por $a(t)$, pode ser obtida substituindo-se θ por $2\pi f_s t$.

Um modelo da função $a(t)$ é mostrado na FIGURA 3.10a como uma curva contínua e periódica, cujo período é igual ao período da rotação do eixo, estendendo-se para infinito em ambas as direções. Desde que o transdutor esteja situado numa posição de referência e que a estrutura da máquina seja simétrica em relação a esta posição, a função $a(t)$ também é par. A transformada de Fourier de $a(t)$ é mostrada graficamente na FIGURA 3.10b. Observa-se que $A(f)$ consiste de impulsos no domínio da frequência, separados pela frequência de rotação do eixo f_s .

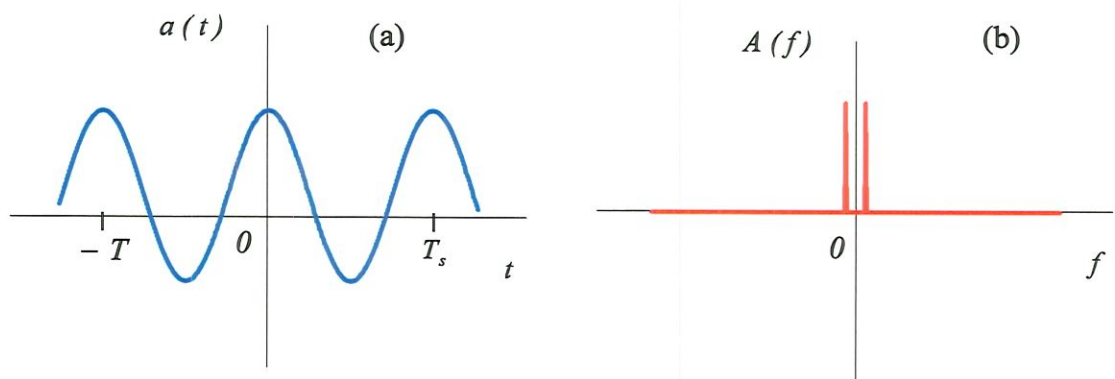


FIGURA 3.10 – Variações de amplitude da função de transferência.

(a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência.

Amplitude da Resposta não Amortecida

As expressões desenvolvidas nas seções precedentes serão agora combinadas para dar uma expressão para a amplitude da resposta no transdutor produzida por uma falha no rolamento sob carga radial sem considerar o efeito do amortecimento. A amplitude da resposta no transdutor é dada pelo produto dos impulsos produzidos no rolamento $d(t).q(t)$ com a amplitude da função de transferência $a(t)$. A formação do produto $d(t).q(t).a(t)$ é ilustrado graficamente na FIGURA 3.11a. A convolução de $D(f)*Q(f)$ e $A(f)$ causa um efeito de impulsos ponderados conforme mostra a FIGURA 3.11b. Desde que as funções $d(t)$, $q(t)$ e $a(t)$ são definidas como reais e pares, o produto $d(t).q(t).a(t)$ e a transformada de Fourier $D(f)*Q(f)*A(f)$ correspondente também são reais e pares.

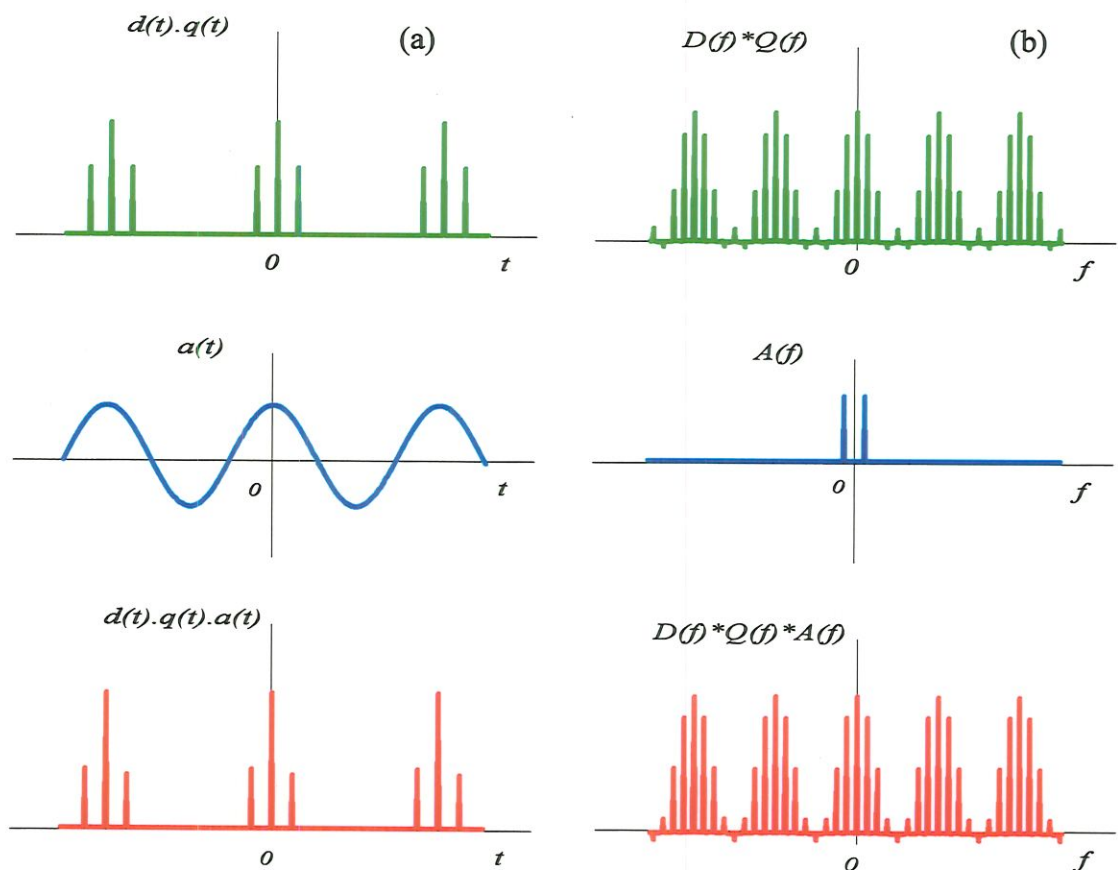


FIGURA 3.11 – Resposta não amortecida no rolamento devido a falha na pista interna. (a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência.

Decaimento Exponencial de um Impulso

O decaimento de um impulso unitário pode ser definido pela equação

$$e(t) = \begin{cases} e^{-t/\tau_e} & \text{para } t > 0 \\ 0 & \text{para } t \leq 0 \end{cases} \quad (3.26)$$

onde τ_e é a constante de tempo de decaimento exponencial. Esta função é mostrada graficamente na FIGURA 3.12a. A amplitude e a fase da transformada de Fourier de $e(t)$ são mostradas graficamente na FIGURA 3.12b, e são dadas por:

$$\text{mod}[E(f)] = \tau_e / \sqrt{1 + (2\pi f\tau_e)^2} \quad (3.27)$$

$$\text{fase}[E(f)] = \arctan(-2\pi f\tau_e) \quad (3.28)$$

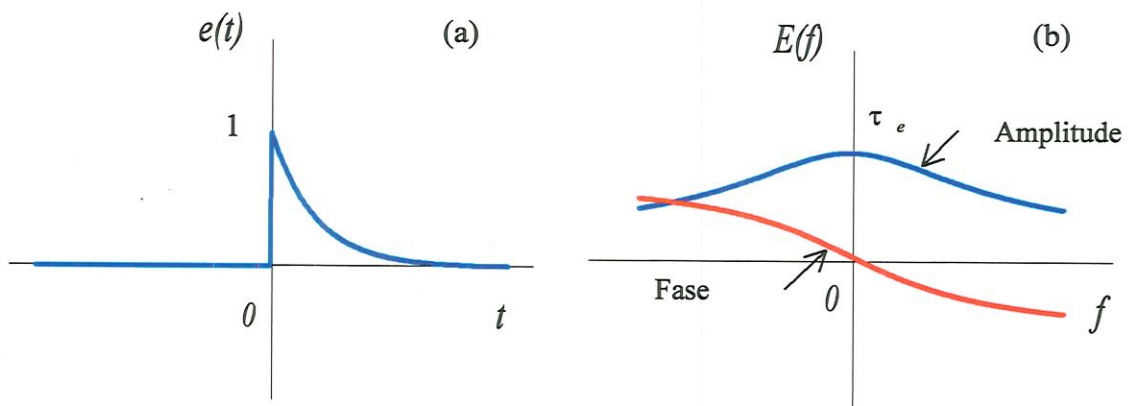


FIGURA 3.12 – Função de decaimento exponencial de um impulso.

(a) Sinal no tempo; (b) Espectro em frequência.

Como $e(t)$ é real, observa-se que $E(f)$ possui uma parte real que é *par* e outra parte imaginária que é *ímpar*. Nota-se que o aumento da constante de tempo τ_e faz com que o decaimento do impulso ocorra de forma mais lenta.

O efeito do aumento da constante de tempo τ_e no domínio da frequência corresponde ao aumento da amplitude na frequência $f=0$, e a uma queda da amplitude com o aumento da frequência de maneira mais rápida.

Amplitude da Resposta Amortecida

Nas seções precedentes foram desenvolvidas equações que descrevem inicialmente a série de impulsos produzidos por uma falha na pista interna de rolamentos sob carga radial, e em seguida, a resposta medida no rolamento devido ao impulso unitário. Estas equações serão agora combinadas para fornecer uma expressão geral para a resposta medida no rolamento sujeito aos impulsos produzidos pela falha. A resposta $v(t)$ é obtida pela convolução da série de impulsos produzidos pela falha com a resposta da máquina:

$$v(t) = [d(t).q(t).a(t)] * e(t) \quad (3.29)$$

Aplicando o teorema da convolução, a transformada de $v(t)$ é dada por

$$V(f) = [D(f) * Q(f) * A(f)].E(f) \quad (3.30)$$

As funções $v(t)$ e $V(f)$ obtidas estão ilustradas nas FIGURA 3.13a e 3.13b, através do envelope do sinal no tempo e seu respectivo espectro em frequência. Observa-se que as amplitudes dos lóbulos diminuem com o aumento da frequência. Como consequência, a componente de frequência zero possui a maior amplitude no espectro, exceto quando o cancelamento for causado por uma componente de um dos lóbulos laterais superpostos entre si. Da equação (3.27) verifica-se que para valores elevados de frequências a amplitude da transformada de Fourier da função de decaimento é inversamente proporcional à frequência. Observa-se ainda que no modelo obtido não foram considerados os efeitos de ruídos presentes nas medidas, bem como possíveis fontes de vibrações oriundas de outras partes da máquina.

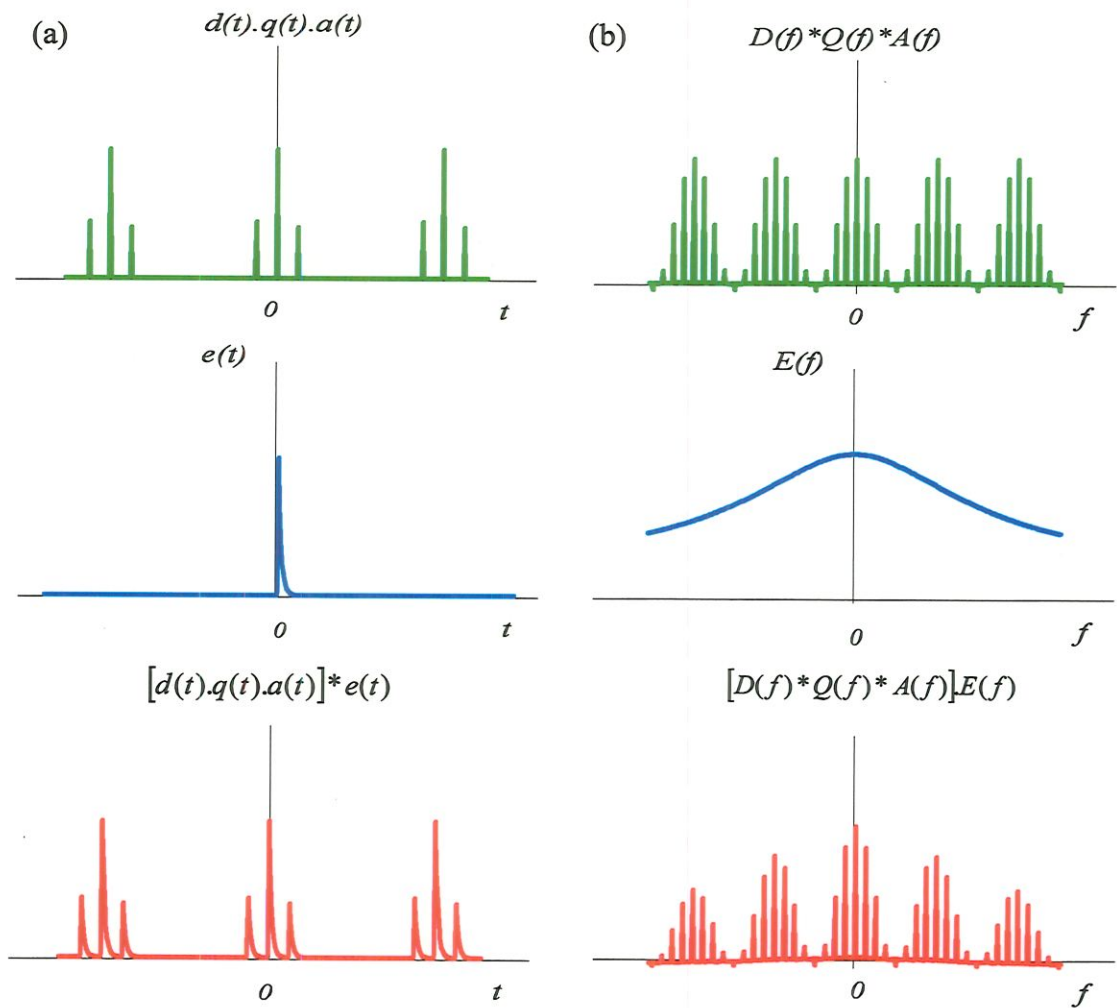


FIGURA 3.13 –Resposta no rolamento devido a falha na pista interna.

(a) Envelope no tempo; (b) Espectro em frequência.

Reconstituição do Sinal no Tempo

A partir do envelope do sinal obtido em frequência, pode-se recuperar o sinal original aplicando-se a transformada inversa de Fourier. As FIGURAS 3.14a e 3.14b mostram o sinal reconstituído no tempo e este mesmo sinal com 10% de ruído aleatório (em relação ao nível *rms* do sinal), representando uma situação de medida mais efetiva.

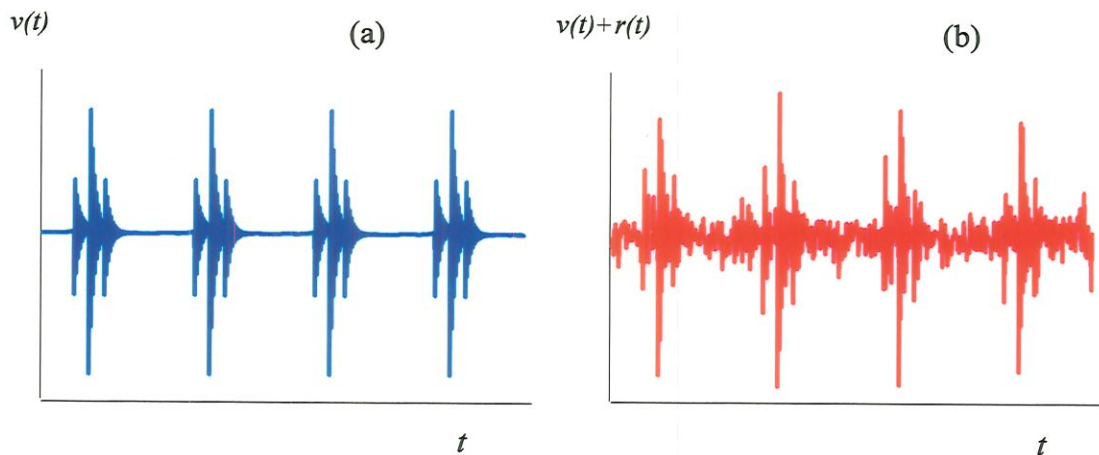


FIGURA 3.14 – Resposta no rolamento devido a falha na pista interna.

(a) Sinal no tempo; (b) Sinal no tempo com 10% de ruído.

3.5 MODELO DE VIBRAÇÃO PARA FALHAS EM ROLAMENTOS SUJEITOS A VÁRIOS TIPOS DE CARREGAMENTOS

O modelo de vibração desenvolvido por MCFADDEN & SMITH (1984) considera estacionária a distribuição de carga sobre a pista interna do rolamento, resultando num espectro típico de propriedades periódicas com bandas laterais ao redor das frequências características de defeitos. Entretanto, num exame mais detalhado do espectro em frequência para diferentes condições de carregamento observa-se que existem muitas linhas espectrais adicionais que ainda não foram bem explicadas.

SU & LIN (1992) apresentam um modelo mais completo para descrever a vibração induzida por uma falha ou por múltiplas falhas localizadas em posições arbitrárias de rolamentos sujeitos a diversos tipos de carregamento. O modelo proposto resulta num espectro em frequência composto por linhas espectrais igualmente espaçadas, onde os picos principais estão relacionados com a frequência característica de defeitos e suas harmônicas. Além disso apresenta bandas laterais mistas associadas com as propriedades periódicas do carregamento e do meio de transmissão.

Modelo de Vibração Genérico

O modelo do sistema considera um rolamento com entrada ou excitação dada por um trem de pulsos induzidos pela falha e com a resposta medida no suporte do mancal de rolamento sob análise. Assume-se que o sistema é linear com coeficientes invariantes no tempo e que apenas um número finito de modos são excitados. O pulso devido ao contato pode ser tratado como um impulso de energia finita descrito por $u(t) = w(t).d(t)$, onde $d(t)$ é um trem de impulsos unitários e $w(t)$ é uma função ponderadora que indica a energia de contato. A resposta do sistema a este pulso pode ser descrita utilizando o teorema da convolução por:

$$x(t) = \sum_{m=1}^n \int_{-\infty}^t d(\tau) w(\tau) a_m(\tau) e^{-\alpha_m(t-\tau)} \cos \omega_m(t-\tau) d\tau \quad (3.31)$$

Os parâmetros α_m e ω_m são características do sistema e são independentes das localizações dos pontos de excitação e de resposta medida. O parâmetro a_m reflete as características de amortecimento estrutural do meio de transmissão entre a excitação e a resposta e depende da sua localização. As propriedades em frequência de $x(t)$ podem ser representadas conforme MCFADDEN & SMITH (1984b):

$$X(\omega) = [D(\omega) * W(\omega) * A_m(\omega)] H_m(\omega) \quad (3.32)$$

A equação (3.32) mostra que as características de $x(t)$ para o m -ésimo modo de vibrar dependem de $w(t)$, $a_m(t)$ e $d(t)$, respectivamente. Quando um rolamento defeituoso gira com velocidade angular constante, $d(t)$ é uma função periódica cujo período é igual ao intervalo de tempo entre dois impulsos consecutivos. Também $w(t)$ é uma função periódica sob determinados tipos de carregamentos e $a_m(t)$ se torna periódica para falhas localizadas em posições específicas.

Propriedades Periódicas de $w(t)$ e $a(t)$

A amplitude da energia de contato dada por $w(t)$ é influenciada principalmente pelas cargas associadas com o desalinhamento ou com o desbalanceamento dinâmico do eixo, cargas radiais ou axiais aplicadas, bem como pré-cargas e imperfeições geométricas de fabricação. Quando o eixo gira, algumas destas cargas mantêm sua localização espacial ao redor do rolamento enquanto outras mudam de posicionamento. Quando há movimento relativo entre a distribuição de carga e a falha, $w(t)$ se torna uma função periódica. A TABELA 3.1 mostra algumas das propriedades periódicas de $w(t)$ para diferentes tipos de falhas, sujeitas a vários tipos de carregamentos.

TABELA 3.1 – Períodos característicos de falhas em rolamentos.

Causas das periodicidades	Pista externa	Pista interna	Elemento rolante
Carregamento Estacionário	Sem periodicidade	$T_s = 1/f_s$	$T_g = 1/f_g$
Carregamento devido a desbalanceamento no eixo	$T_s = 1/f_s$	Sem periodicidade	$1/(f_s - f_g)$
Carregamento devido a erros geométricos de fabricação	$T_g = 1/f_g$	$1/(f_s - f_g)$	Sem periodicidade
Meios de Transmissão	Sem periodicidade	$T_s = 1/f_s$	$T_g = 1/f_g$ $1/(2f_b)$

Quando a pista externa é estacionária a localização do ponto de contato é fixo. Neste caso a periodicidade de $w(t)$ é afetada principalmente pelos erros geométricos dos elementos rolantes e pelo desbalanceamento do eixo. Um rolamento com erros geométricos no seu diâmetro, sob pré-carga, estará

sujeito a uma distribuição de carga não-uniforme que irá mudar de posição à medida que a gaiola gira. Consequentemente, $w(t)$ tem sinal com periodicidade $T_g = 1/f_g$, que é o período de revolução da gaiola. Analogamente, num carregamento excêntrico provocado por um desbalanceamento que gira na frequência do eixo, $w(t)$ apresenta um sinal com periodicidade de $T_s = 1/f_s$.

Quando na pista interna, a falha irá girar na frequência de rotação. Para um carregamento axial distribuído e invariante no tempo, a frequência de rotação da falha resulta em $w(t)$ com período $T_s = 1/f_s$. Uma vez que os erros geométricos no diâmetro giram com frequência f_g , a frequência relativa entre o carregamento e a falha é $(f_s - f_g)$. Assim, $w(t)$ também contém sinal com período $(f_s - f_g)^{-1}$.

Uma falha no elemento rolante irá girar na frequência da gaiola e nas frequências de contato com as pistas interna e externa, alternadamente. As frequências relativas entre o elemento defeituoso e o carregamento são: f_g para carregamento estacionário, $(f_s - f_g)$ para carregamentos induzidos por desbalanceamento e zero para carregamentos induzidos por erros geométricos. Em situações onde ocorrem características de saltos será gerada uma função do tipo “pente” superposta à energia de contato, que está associada com a frequência do elemento defeituoso. Em geral, apenas padrões de sinais com conteúdo significativo de energia dominam as periodicidades de $w(t)$.

Considerando o meio de transmissão $a_m(t)$, a falha na pista interna ou no elemento rolante irá girar na medida em que a pista interna gira ou o elemento rolante gira em torno de seu eixo. Como a localização do ponto de resposta medida é fixa, o meio de transmissão é determinado por dois fatores: o primeiro é a posição angular do ponto de contato relativo à medida e o segundo é devido aos pontos de contatos que ocorrem nas pistas interna e externa. Quando na pista interna, a falha gira na frequência de rotação do eixo e o ponto de contato está sempre na pista interna. Assim, o meio de

transmissão corresponde a um sinal que varia com frequência f_s . Quando a falha se localiza no elemento rolante, a posição angular do elemento rolante defeituoso volta a girar na frequência f_g e os saltos entre os pontos de contato de uma pista para outra ocorrem na frequência f_b . Isto implica que $a_m(t)$ tem periodicidade de $T_g=1/f_g$ a $1/(2f_b)$. No caso da falha na pista externa, como o ponto de contato é fixo o meio de transmissão é sempre constante.

Frequências Características de Vibração

Em geral as funções $w(t)$ e $a_m(t)$ podem ser representadas como uma combinação de funções periódicas simples, ou seja

$$w(t) = \sum_{i=1}^p w_i(t) \quad e \quad a_m(t) = \sum_{j=1}^q a_{mj}(t) \quad (3.33a,b)$$

Assumindo que os períodos de $d(t)$, $w_i(t)$ e $a_{mj}(t)$ são $2\pi/\omega_d$, $2\pi/\omega_i$ e $2\pi/\omega_{aj}$, respectivamente, obtém-se a equação

$$X_m(\omega) = \left\{ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \left[\omega_d \omega_{wi} \omega_{aj} \sum_k \sum_m \sum_n W_{Tmi}(M\omega_{wi}) A_{Tmj}(n\omega_{aj}) \delta(\omega - k\omega_d - m\omega_{wi} - n\omega_{aj}) \right] \right\} H_m(\omega) \quad (3.34)$$

onde W_{Tmi} e A_{Tmj} são as transformadas de Fourier de w_i e a_{mj} , respectivamente. A função delta estabelece que $X_m(\omega)$ apresenta picos discretos apenas nas frequências

$$\omega = k\omega_d + m\omega_{wi} + n\omega_{aj} \quad (3.35)$$

Se a frequência característica de defeitos ω_d é maior que ω_{wi} e ω_{aj} , o espectro de vibração irá apresentar um padrão de picos igualmente distribuídos ao redor da frequência de ressonância da estrutura, tendo como

intervalo a frequência característica de defeitos ω_d . Adicionalmente, ao redor de cada pico, ocorrem bandas laterais igualmente espaçadas com intervalos iguais a $m\omega_{wi} + n\omega_{aj}$, relacionados às periodicidades do carregamento e dos meios de transmissão. Quando ω_{wi} é maior que ω_{aj} , o padrão das bandas laterais são igualmente distribuídas com intervalos ω_{wi} em torno de cada pico, correspondente à frequência característica de defeitos. Ao redor de cada banda lateral, existem outras sub-bandas laterais distribuídas com intervalos ω_{aj} . Um espectro esquemático da equação (3.35) é mostrado na FIGURA 3.15.

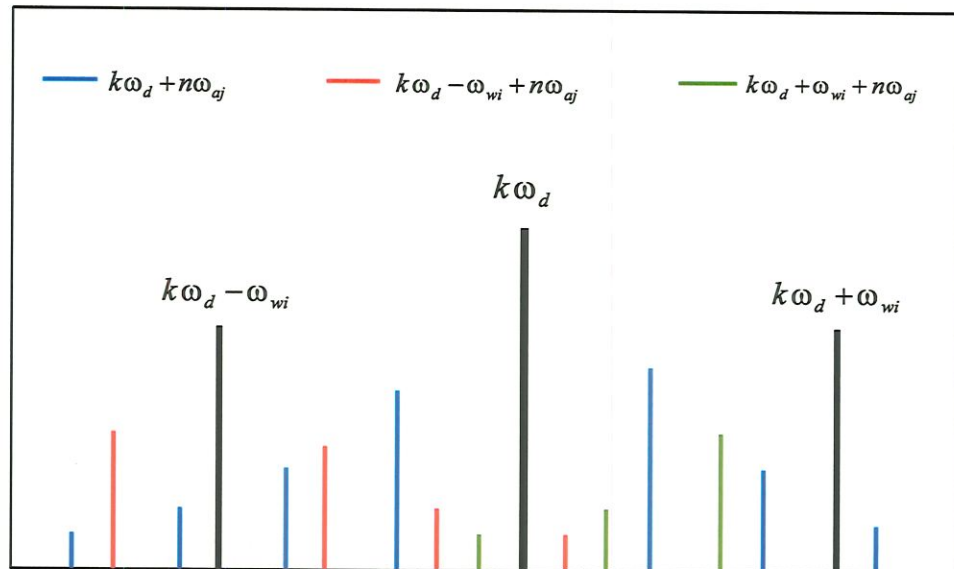


FIGURA 3.15 – Espectro discreto típico de frequências e bandas laterais.

Da equação (3.34) as energias distribuídas nas frequências características de defeitos e em suas harmônicas dependem dos valores médios do carregamento $w(t)$ e do meio de transmissão $a_m(t)$. Com valores médios elevados, os níveis de energia são altos. O valor médio de $a_m(t)$ depende da localização da falha e da medida, e ainda das propriedades estruturais. Um valor médio elevado de $w(t)$ deve corresponder a uma grande falha ou a um grande carregamento. As energias das bandas laterais

só podem ser identificadas se o conteúdo de energia é significativo. A partir da TABELA 3.1 e da equação (3.35), os espaçamentos previstos entre as linhas espectrais principais e suas correspondentes bandas laterais para rolamentos defeituosos sujeitos a vários tipos de carregamento são apresentadas na TABELA 3.2.

TABELA 3.2 – Espaçamentos das linhas espectrais principais e das bandas laterais para diferentes tipos de falhas e de carregamentos.

Tipo de espaçamento	Falha na Pista interna	Falha na Pista externa	Falha no elemento rolante
Espaçamento das linhas espectrais	f_i	f_e	f_b
Espaçamento das bandas laterais	f_s $(f_s - f_g)$	f_s f_g	f_g $(f_s - f_g)$ e $(f_b/2)$

Quando o rolamento apresenta múltiplas falhas, a resposta medida é a soma das vibrações induzidas pelos pulsos de cada falha. As características em frequências de $x(t)$ para s defeitos podem ser representadas por

$$X_m(\omega) = \sum_{r=1}^s [D(\omega)_r * W(\omega)_r * A_m(\omega)] H_m(\omega) \quad (3.36)$$

onde r indica a r -ésima falha. A transformada $X_m(\omega)$ apresenta picos nas frequências dadas por

$$\omega = k_r \omega_d + m_r \omega_{wi} + n_r \omega_{aj} \quad (3.37)$$

Esta equação mostra que os padrões espectrais para múltiplas falhas podem ser vistos como uma superposição da contribuição de cada falha individualmente.

Capítulo 4

MÉTODOS DE ANÁLISE CONJUNTA TEMPO-FREQUÊNCIA

4.1 BREVE HISTÓRICO

A teoria sobre os métodos de análise conjunta tempo-frequência tem sido desenvolvida desde os anos 40, porém só recentemente tem alcançado alguns avanços significativos em áreas como processamento e análise de sinais não-estacionários. O primeiro exemplo de sinais deste tipo analisado é o correspondente à voz humana. A análise de sinais de voz motivou o desenvolvimento de espectrogramas de som utilizando os conceitos da transformada de Fourier de curto tempo (STFT). A idéia básica deste método é amostrar um sinal com janelas no tempo de curta duração de modo que neste intervalo o sinal seja considerado quase-estacionário e, em seguida, aplicar a transformada de Fourier obtendo-se espectros cujo conjunto resulta na STFT. Outros desenvolvimentos importantes utilizando a transformada STFT e suas variações aplicadas a sinais do tipo não-estacionários resultaram em trabalhos clássicos no campo da mecânica quântica GABOR (1946) e VILLE (1948).

Um método de análise de sinais que também tem sido referencial para várias aplicações e desenvolvimentos mais recentes é a distribuição de Wigner-Ville (WVD). Apesar da distribuição de WIGNER (1932) ter sido a primeira a ser introduzida, só se tornou conhecida a partir dos trabalhos de VILLE (1948) que aplicou a WVD em estudos da mecânica quântica. A WVD apresenta algumas vantagens em relação à transformada STFT. Ela tem boa

precisão de resolução no plano tempo-frequência e satisfaz algumas propriedades importantes como inversão e condições marginais. Porém quando aplicada a sinais que apresentam estrutura que contém múltiplas componentes, a WVD pode apresentar termos cruzados ou interferências entre componentes o que dificulta a sua análise.

Algumas contribuições importantes surgiram a partir dos trabalhos de CLAASEN & MECKLENBRAUER (1980) que apresentam métodos e procedimentos para implementação de algumas distribuições. Sugerem a aplicação de uma janela móvel do tipo "Hamming" ao sinal obtido no domínio do tempo antes de calcular a WVD visando reduzir os termos cruzados inerentes, resultando numa distribuição pseudo-WVD (PWVD). Mais recentemente SHIN & JEON (1993) propuseram a utilização de uma janela exponencial do tipo "Gaussiana" deslizante no plano tempo-frequência, obtendo-se uma PWVD com interferência reduzida e livre de valores negativos que dificultam a sua interpretação.

A idéia de se escolher funções de núcleo que satisfaçam algumas propriedades particulares ou comuns a todas as distribuições, resultou no desenvolvimento de novas distribuições. A unificação dos conceitos através das funções de auto-correlação local e de ambiguidade generalizada permitiram novas perspectivas de distribuições com propriedades desejáveis. As mais conhecidas são as distribuições de Choi-Williams (CWD), Zao-Atlas-Marks (ZAM) e Cohen-Posch (CPD), dentre outras.

Recentemente tem surgido novas ferramentas de análise conjunta tempo-frequência aplicadas a sinais não-estacionários através dos conceitos de famílias de funções afins. É o caso da transformada de "wavelets" (TW) que utiliza a representação tempo-escala ou escalograma (QIAN & CHEN, 1996). Esta transformada apresenta a vantagem de ser linear e permitir a análise multi-resolução resultando em maior sensibilidade para detecção de sinais do tipo transiente, embora sua formulação matemática e interpretação sejam mais complicadas em relação às distribuições gerais bilineares que apresentam resolução constante.

4.2 TRANSFORMADA DE FOURIER DE CURTO TEMPO (STFT)

Conceitos da Análise Temporal e Espectral

O estudo de um sinal $x(t)$ como uma função do tempo é conhecido como análise temporal, requerendo o conhecimento da evolução da forma de onda no tempo através da equação que o governa e de algumas de suas propriedades estatísticas, o que muitas vezes dificulta sua análise. Para se ter uma melhor compreensão do sinal pode-se fazer o estudo em outra representação, como a análise espectral. A análise se torna mais fácil, especialmente através da visualização na escala de frequências, para sinais que apresentam características periódicas e estacionárias.

Apesar dos sinais com forma de onda senoidal serem conceitualmente mais simples, estes são bastante comuns em vários fenômenos da engenharia e ainda representam muitas das soluções de equações fundamentais do movimento. A superposição de várias ondas senoidais com diferentes frequências pode resultar em formas de ondas complexas, porém com métodos de análise no domínio da frequência há a possibilidade de serem decompostas e analisadas de maneira simples, na forma discreta ou contínua. Uma ferramenta bastante útil para análise de sinais periódicos é obtida através do par de transformadas de Fourier:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad (4.1)$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.2)$$

onde observa-se que o sinal $x(t)$ pode ser expandido em termos de senóides de diferentes frequências, $e^{j2\pi ft}$, através da adição (superposição linear) das contribuições individuais de cada coeficiente de $X(f)$.

Conceitos de Energia do Sinal

Uma das idéias mais significativas para a análise de sinais é quantificar a “energia” necessária para produzir um sinal $x(t)$, e mais especificamente quanto desta energia é tomada para produzir $x(t)$ no instante de tempo t . Este conceito não deve ser interpretado estritamente no sentido físico. Assim, a densidade de energia e a quantidade de energia necessária para produzir o sinal num intervalo de tempo Δt , são definidas conforme COHEN (1995):

$|x(t)|^2$ = densidade de energia ou potência instantânea do sinal no tempo t ;

$|x(t)|^2 \Delta t$ = quantidade de energia produzida num certo intervalo de tempo Δt .

Analogamente, define-se a densidade de energia por unidade de frequência f e a quantidade de energia necessária para produzir o sinal num certo intervalo de frequência Δf :

$|X(f)|^2$ = densidade espectral ou densidade de energia na frequência f ;

$|X(f)|^2 \Delta f$ = quantidade de energia produzida numa faixa de frequência Δf .

Portanto, a partir das densidades de energia por unidade de tempo $|x(t)|^2$ e de frequência $|X(f)|^2$, pode-se calcular a energia total do sinal aplicando-se a integral sobre todos os intervalos de tempos ou de frequências, ou seja

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(f)|^2 df \quad (4.3)$$

Esta identidade é comumente conhecida como teorema de Parseval ou teorema de Rayleigh, e mostra que a energia do sinal deve ser independente do método usado para o seu cálculo.

Conceitos do Espectrograma STFT

A análise de sinais no domínio da frequência baseada apenas nas transformadas de Fourier nem sempre consegue descrever completamente o que está acontecendo pois estas mostram as frequências existentes para a duração total do sinal e não aquelas existentes numa janela de tempo particular. Se o sinal apresenta formas de ondas que se repetem regularmente durante todo o tempo, a análise do espectro em frequência já é suficiente para uma boa descrição do seu comportamento. Porém quando o sinal é composto por várias formas de ondas e seu espectro ocorre em determinadas faixas de tempo é necessário obter a sua representação conjunta tempo-frequência.

A idéia de se conhecer as frequências existentes num instante de tempo particular t , levou à técnica de se tomar um pedaço do sinal ao redor deste instante e aplicar a transformada de Fourier. Esta janela $h(\tau)$ de curta duração, centrada em torno de $(\tau - t)$ multiplicada pelo sinal $x(\tau)$ resulta no sinal ponderado, conforme COHEN *in* BOASHASH (1992):

$$x_h(\tau - t) = x(\tau)h(\tau - t) \quad (4.4)$$

O espectro do sinal ponderado é conhecido como a transformada de Fourier de curto tempo STFT, sendo dado por:

$$S_t(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi f\tau} x_h(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi f\tau} x(\tau)h(\tau - t) d\tau \quad (4.5)$$

O espectro de potência do sinal modificado, torna-se então

$$\rho_{STFT}(t, f) = |S_t(f)|^2 \quad (4.6)$$

Portanto, para cada instante de tempo t tem-se um diferente espectro, e da totalidade destes espectros obtém-se a distribuição STFT ou

espectrograma. Algumas dificuldades no uso do método STFT estão relacionadas com as características dos sinais e a escolha do tipo de janela mais apropriada. Quando o sinal é composto pela soma de dois sinais distintos, a escolha de uma janela pode ser mais adequada para visualização de uma faixa do espectro e não apresentar boa resolução na outra. Assim, o espectrograma para um sinal particular depende da forma funcional da janela, embora seja desejável que as propriedades estimadas não devam ser muito sensíveis à escolha da janela. Um caso particular de janela que tem sido muito aplicada é a janela do tipo Gaussiana adotada por Gabor:

$$G(t) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} \exp\left(\frac{-\alpha t^2}{2}\right) \quad (4.7)$$

onde α é uma constante que pode ser ajustada conforme o tipo de sinal. A escolha de uma janela muito estreita aplicada ao redor de um ponto de interesse no instante de tempo t pode resultar num sinal modificado, de curta duração, cujo espectro é de banda larga. Isto significa que, se por um lado tem-se uma melhoria da resolução no tempo, por outro perde-se muito da resolução em frequência.

Conceitos das Representações Tempo-Frequência

O termo “função distribuição” conhecido da estatística pela teoria de probabilidades tem o significado um pouco diferente das distribuições utilizadas na engenharia. No caso das representações tempo-frequência, estas assumem mais o caráter de funções densidades e mostram como as quantidades de energia do sinal estão distribuídas no plano tempo-frequência. Sendo $\rho(t, f)$ definida como a distribuição conjunta das frações de energia do sinal no tempo t e na frequência f , a soma total das frações de energia do sinal resulta na energia total E dada por

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(t, f) dt df \quad (4.8)$$

Condições Marginais no Tempo e em Frequência

Duas importantes condições ou propriedades desejáveis das distribuições são definidas a seguir. A densidade marginal no instante de tempo t é definida como

$$\bar{\rho}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(t, f) df = |x(t)|^2 \quad (4.9)$$

Analogamente, a densidade marginal na frequência f é definida como:

$$\bar{\rho}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(t, f) dt = |X(f)|^2 \quad (4.10)$$

Observa-se que o termo “marginal” conhecido da teoria da probabilidade deve aqui permitir adaptações para o estudo das representações tempo-frequência uma vez que estas podem assumir valores negativos. Quanto às formas de gráficos mais utilizadas nas representações tempo-frequência, a mais comum é uma projeção bidimensional ou mapa de contorno, onde a intensidade da distribuição pode ser representada por curvas de nível ou pelo contraste entre os diferentes tons de cores numa escala normalizada. Outra forma de representação das distribuições é obtida no espaço tridimensional, o que permite a visualização completa das superfícies e curvas de nível.

4.3 DISTRIBUIÇÃO DE WIGNER-VILLE (WVD)

Conceitos e Definições

A distribuição de Wigner-Ville como ficou conhecida tem sido utilizada extensivamente em vários campos de aplicação, e mais recentemente no campo de monitoramento de máquinas, sendo dada por:

$$\rho_{WVD}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi f\tau} x^*(t - \frac{1}{2}\tau) x(t + \frac{1}{2}\tau) d\tau \quad (4.11)$$

onde $x^*(t)$ é o conjugado complexo do sinal no tempo $x(t)$. Algumas propriedades importantes deste método são apresentadas em seguida.

Momentos Condicionais

Fixando-se um instante de tempo t e procurando-se saber qual o valor esperado da frequência para este instante, obtém-se o primeiro momento condicional ou frequência instantânea,

$$\langle f \rangle_t = \frac{1}{\bar{\rho}(t)} \int_{-\infty}^{+\infty} f \rho(t, f) df \quad (4.12)$$

onde $\bar{\rho}(t)$ é a densidade marginal no tempo, conforme já definida anteriormente.

Seja um sinal descrito em termos de sua amplitude e de sua fase, ou seja,

$$x(t) = A(t) e^{j\varphi(t)} \quad (4.13)$$

O primeiro momento condicional, também conhecido como frequência instantânea, representa a média das frequências deste sinal num dado instante de tempo t , sendo obtido por

$$\langle f \rangle_t = \frac{1}{2\pi} \varphi'(t) \quad (4.14)$$

onde $\varphi'(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}$.

Não-Positividade da WVD

Uma distribuição qualquer deve ser sempre positiva para todos os valores de tempo e frequência, uma vez que representa uma quantidade do total contida na “célula” tempo-frequência. Porém a WVD apresenta um comportamento diferente. Em alguns casos, apresenta valores negativos dentro das faixas tempo-frequência. A única exceção é para o caso da função “chirp”. A explicação para o surgimento de partes negativas nas WVD ainda não é bem conhecida, embora o conteúdo da parte positiva esteja sempre coerente com a estrutura tempo-frequência esperada.

Termos Cruzados da WVD

Considera-se um sinal composto pela soma de dois sinais distintos $x_1(t)$ e $x_2(t)$, dado por

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) \quad (4.15)$$

Como a WVD é uma transformada bilinear, a distribuição resultante da soma é dada por:

$$\rho_{WVD}(t, f) = \rho_{WVD11}(t, f) + \rho_{WVD22}(t, f) + \rho_{WVD12}(t, f) + \rho_{WVD21}(t, f) \quad (4.16)$$

onde $\rho_{WVD11}(t, f)$ e $\rho_{WVD22}(t, f)$ são os termos próprios da distribuição, enquanto $\rho_{WVD12}(t, f)$ e $\rho_{WVD21}(t, f)$ são os termos cruzados, obtidos por:

$$\rho_{WVD12}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi f\tau} x_1^*(t - \frac{1}{2}\tau) x_2(t + \frac{1}{2}\tau) d\tau \quad (4.17)$$

e

$$\rho_{WVD21}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi f\tau} x_2^*(t - \frac{1}{2}\tau) x_1(t + \frac{1}{2}\tau) d\tau \quad (4.18)$$

Portanto, a WVD obtida pela soma de dois sinais não segue uma relação linear, surgindo dois termos cruzados que interferem nos resultados. Até que ponto estes termos cruzados são indesejáveis depende da natureza dos sinais, sendo que nas situações onde estes sinais apresentam características de múltiplas componentes em frequência o efeito é considerável. Observa-se que apesar dos dois termos cruzados serem complexos a sua soma é sempre real, assim como a soma de todos os termos da distribuição.

Inversão da WVD

Os procedimentos para a construção da WVD a partir do sinal discretizado devem satisfazer não apenas a condição de Nyquist, que estabelece que a frequência de amostragem do sinal é igual ou maior que duas vezes a maior frequência contida no sinal, mas também devem garantir que o sinal possa ser reconstruído integralmente. Para reconstruir o sinal a partir da WVD deve-se aplicar a transformada inversa de Fourier com relação a f , ou seja:

$$x(t) = \frac{1}{x^*(0)} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_{WVD}(t, f) e^{j2\pi tf} df \quad (4.19)$$

Isto significa que a inversão ou reconstrução do sinal a partir da WVD só pode ser realizada unicamente a menos da fase.

Janelamento da WVD

Do ponto de vista prático, escolhem-se janelas de tempo finitas para análise de sinais, pois em alguns casos pretende-se analisar apenas um intervalo de tempo em torno de um determinado instante de tempo t no qual ocorre o fenômeno. Nestes casos, deve-se multiplicar o produto $x^*(t - \frac{1}{2}\tau) x(t + \frac{1}{2}\tau)$ pela função da janela $h(\tau)$ obtendo-se a WVD com janela, dada por

$$\rho_{WVDh}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi f\tau} h(\tau) x^*(t - \frac{1}{2}\tau) x(t + \frac{1}{2}\tau) d\tau \quad (4.20)$$

Uma das razões para o uso da WVD com janela é que em muitos casos esta se apresenta mais adequada que a distribuição original. Isto ocorre porque a largura da janela é menor que a separação entre as componentes próprias, diminuindo a sua intensidade e reduzindo os termos cruzados. Por outro lado, os procedimentos para a supressão dos termos cruzados também afetam os termos próprios no sentido de perda de resolução.

Distribuição Pseudo-Wigner-Ville (PWVD)

Existem dois métodos para supressão dos termos cruzados na WVD. CLAASEN & MECKLENBRAUKER (1980) descrevem a aplicação de uma janela móvel no domínio do tempo antes do cálculo da WVD. A WVD obtida com a função de janela é denominada pseudo-WVD. Uma segunda opção é “suavizar” a WVD através de uma janela móvel no plano tempo-frequência, como a janela exponencial “Gaussiana” proposta por SHIN & JEON (1993):

$$G(t, \omega) = \frac{1}{2\pi\sigma_t\sigma_\omega} e^{-[(t^2/2\sigma_t^2) + (\omega^2/2\sigma_\omega^2)]} \quad (4.21)$$

onde $\sigma_t, \sigma_\omega > 0$ e $\sigma_t\sigma_\omega \geq 1/2$ são parâmetros relacionados com as resoluções no tempo e na frequência. Em ambos os casos obtém-se a PWVD, que visa reduzir as interferências e evitar os valores negativos.

Definição de Sinal Analítico

Embora as medidas realizadas nos sistemas físicos sejam representadas por sinais reais, para fins de análise torna-se mais conveniente a inclusão de uma parte complexa no sinal original. Uma maneira de adicionar esta parte complexa é tomar um sinal $z(t)$ cujo espectro seja igual ao da parte real do

sinal $x(t)$ e que seja nulo para as frequências negativas. Para se obter este sinal, toma-se a transformada inversa de Fourier do espectro modificado. O novo sinal é uma função cuja parte real é igual à do sinal original e cuja parte imaginária é a transformada de Hilbert do sinal real, ou seja

$$z(t) = x(t) + iH[x(t)] \quad (4.22)$$

onde

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4.23)$$

O sinal resultante $z(t)$ é chamado de sinal analítico. Deve ser multiplicado por dois para compensar o fato de que uma metade do espectro foi desprezada, correspondente à metade da energia total do sinal. Dentre as razões que justificam o uso do sinal analítico na WVD, uma delas é que usando-se apenas o sinal real, ambas as partes positiva e negativa do espectro irão determinar os termos cruzados entre eles. Uma outra razão está relacionada com o frequente uso do primeiro momento da distribuição obtido pela derivada do ângulo de fase, que é a frequência instantânea do sinal, que pode ser obtida diretamente do sinal analítico. Outra razão é que usando-se o sinal analítico elimina-se a necessidade de obedecer a frequência de Nyquist.

4.4 CLASSIFICAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES TEMPO-FREQUÊNCIA

Classes Gerais de Cohen

As distribuições tempo-frequência (TFDs) mais populares podem ser expressas conforme a distribuição geral bilinear proposta por COHEN (1989):

$$\rho(t, f) = \iiint e^{j2\pi v(u-t)} g(v, \tau) x^*(u - \frac{1}{2}\tau) x(u + \frac{1}{2}\tau) e^{-j2\pi f\tau} dv du d\tau \quad (4.24)$$

em que $g(v, \tau)$ é uma função de núcleo arbitrária.

A idéia de escolher a função de núcleo se justifica por várias razões: é fácil de ser gerada bastando para isso escolher uma função apropriada; pode-se obter distribuições com certas propriedades através de restrições da função de núcleo e ainda verificar se as classes das distribuições satisfazem as condições marginais. A TABELA 4.1 mostra uma classificação geral proposta por COHEN *in* BOASHASH (1992) onde observa-se os vários tipos de distribuições e suas respectivas funções de núcleo.

Condições de Reconstrução do Sinal

Considerando que a função de núcleo esteja bem definida em todos os pontos pertencentes à distribuição, é possível reconstruir o sinal $x(t)$ de modo único expressando-o através da equação:

$$x(t) = \frac{1}{x^*(0)} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{M(v,t)}{g(v,t)} e^{-\frac{1}{2}j\pi vt} dv \quad (4.25)$$

onde $M(v,t) = g(v,\tau)A(v,\tau)$ é definida como a função de ambiguidade generalizada, e $A(v,\tau)$ é a função de ambiguidade simétrica, dada por

$$A(v,\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^*(u - \frac{1}{2}\tau) x(u + \frac{1}{2}\tau) e^{j2\pi v u} du \quad (4.26)$$

Comparando-se as equações (4.26) e (4.11), esta última obtida para a WVD, verifica-se que ambas são simétricas, daí o termo “ambiguidade simétrica” introduzido por Ville e Moyal *apud* COHEN (1995). A importância da função de ambiguidade simétrica é que esta é a transformada de Fourier dupla da WVD. Como a transformada de Fourier de uma função densidade é chamada de função característica, esta se torna uma importante ferramenta para estudo e desenvolvimento de várias classes de distribuições.

TABELA 4.1 – Distribuições gerais ou classes de COHEN.

Nome da distribuição	Função de núcleo ou “kernel” $g(v, \tau)$	Equação geral
Wigner-Ville	1	$\int e^{-j2\pi ft} x^*(t - \frac{1}{2}\tau) x(t + \frac{1}{2}\tau) d\tau$
Wigner-Ville com Janela	$h(\tau)$	$\int e^{-j2\pi ft} h(\tau) x^*(t - \frac{1}{2}\tau) x(t + \frac{1}{2}\tau) d\tau$
Margenau-Hill	$\cos(\pi v\tau)$	Real $x(t) X^*(f) e^{-j2\pi\tau f}$
Kirkwood-Rihaczek	$e^{j\pi v\tau}$	$x(t) X^*(f) e^{-j2\pi\tau f}$
Sinc	$\frac{\sin(2\pi a v\tau)}{2\pi a v\tau}$	$\frac{1}{2a} \int \frac{1}{\tau} e^{-j2\pi\tau f} \int_{-a\tau}^{t+a\tau} x^*(u - \frac{1}{2}\tau) x(u + \frac{1}{2}\tau) du d\tau$
Page	$e^{j\pi v \tau }$	$\frac{\partial}{\partial t} \left \int_{-\infty}^t x(t') e^{-j2\pi f t'} dt' \right ^2$
Choi-Williams	$e^{-v^2 \tau^2 / \sigma}$	$\iint \sqrt{\frac{\pi\sigma}{\tau^2}} e^{-\pi^2\sigma(u-t)^2/\tau^2 - j2\pi\tau f} x^*(u - \frac{1}{2}\tau) x(u + \frac{1}{2}\tau) du d\tau$
STFT ou Espectrograma	$\int e^{-j2\pi v u} h^*(u - \frac{1}{2}\tau) h(u + \frac{1}{2}\tau) du$	$\left \int e^{-j2\pi f\tau} x(\tau) h(\tau - t) d\tau \right ^2$
Zao-Atlas-Marks	$g_1(\tau) \frac{\sin(2\pi v \tau /a)}{\pi v}$	$\int g_1(\tau) e^{-j2\pi\tau f} \int_{- \tau /a}^{t+ \tau /a} x^*(u - \frac{1}{2}\tau) x(u + \frac{1}{2}\tau) du d\tau$

Obs: Por simplicidade de notação, todas as integrais sem os limites implicam na integração de $-\infty$ a ∞ , ou seja $\int \equiv \int_{-\infty}^{\infty}$.

Suporte Finito no Tempo e na Frequência

Quando uma distribuição qualquer é zero antes do início do sinal e zero após o seu final diz-se que o sinal suporta a distribuição ou que a distribuição tem suporte finito. Para se garantir que uma distribuição possui a propriedade de suporte finito esta deve satisfazer a seguinte condição da função de núcleo:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(v, t) e^{-j2\pi v\tau} dv = 0 \quad \text{para } |\tau| < 2|t| \quad (4.27)$$

Aplicando o mesmo conceito para um sinal que apresenta espectro diferente de zero na faixa de frequências entre f_1 e f_2 e é nulo fora desta faixa, a distribuição deve ser nula para todas as frequências menores que f_1 e para todas maiores que f_2 . Analogamente, a condição necessária para que a distribuição tenha suporte finito no eixo das frequências é dada por:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(v, t) e^{-j2\pi f\tau} dv = 0 \quad \text{para } |v| < 2|f| \quad (4.28)$$

Mesmo que uma distribuição satisfaça as duas condições apresentadas, (4.27) e (4.28), não se pode garantir que a distribuição seja nula quando o sinal é nulo. Neste caso diz-se que a distribuição tem um suporte finito fraco. Um exemplo de distribuição que pode apresentar suporte finito fraco é a distribuição de Wigner-Ville. Porém se a distribuição é nula quando o sinal também é nulo, diz-se que a distribuição tem um suporte finito forte. Algumas distribuições positivas como as de Cohen-Posch e de Rihaczek são exemplos de distribuições com suporte finito forte.

4.5 NOVAS DISTRIBUIÇÕES TEMPO-FREQUÊNCIA

Novas representações conjunta tempo-frequência têm sido baseadas na escolha adequada das distribuições a partir de procedimentos e projetos de funções de núcleo que satisfaçam algumas propriedades. Vários investigadores têm contribuído com o desenvolvimento de novas distribuições, o que representa um grande avanço neste campo.

Distribuição de Cohen-Posch (CPD)

Para que uma distribuição tempo-frequência de um sinal real ou complexo seja interpretada como uma densidade de energia esta deve satisfazer no mínimo as propriedades de positividade $\rho(t, f) \geq 0$ e condições marginais no tempo e em frequência, conforme definidas pelas equações (4.9) e (4.10). COHEN & POSCH (1985) mostraram que é possível construir um número infinito de distribuições que satisfazem estas condições, baseados na seguinte equação:

$$\rho_{CPD}(t, f; g) = |x(t)|^2 |X(f)|^2 g[u(t), v(f); x(t)] \quad (4.29)$$

onde $g[u(t), v(f); x(t)]$ é uma função de núcleo não-negativa, dependente do sinal $x(t)$. Além de ser positiva e satisfazer às condições marginais, as CPD também devem apresentar a propriedade de invariância quanto a possíveis mudanças nas escalas de tempo ou de frequência. Isto significa que, se o sinal sofrer uma compressão ou dilatação numa destas escalas, a distribuição também deverá seguir o mesmo comportamento.

Baseados nos princípios de construção das distribuições positivas de Cohen-Posch para um sinal qualquer, LOUGHLIN, PITTON & ATLAS (1994) desenvolveram um método que apesar de simples em conceito é efetivo e facilmente implementado. Trata-se da técnica de minimização da “entropia” para construção de distribuições positivas que satisfazem as condições

marginais. Estes autores apresentam vários exemplos de distribuições obtidas para sinais do tipo tons, “chirps”, ressonadores, e sinais de voz. Ao contrário das limitações envolvidas devido aos problemas de resolução inerentes ao espectrograma STFT, observa-se que a nova técnica proposta satisfaz as propriedades necessárias a uma boa representação simultânea das características temporais e espectrais dos sinais analisados.

Distribuição de Choi-Williams (CWD)

CHOI & WILLIAMS (1989) investigaram a escolha de uma função de núcleo cujos termos cruzados fossem suprimidos e de modo que as propriedades da distribuição não fossem muito afetadas. Eles consideraram a função de núcleo dada por:

$$g_{CWD}(v, t) = e^{-v^2 \tau^2 / \sigma} \quad (4.30)$$

onde σ é um parâmetro de ajuste da função de núcleo. Para escolhas de σ com valores altos, a função de núcleo se aproxima do valor unitário, tornando-se a própria WVD. Porém quando este parâmetro assume valores pequenos a função de núcleo apresenta pico decrescente na região próxima à origem. Assim, para sinais que apresentam múltiplas componentes, os termos próprios são preservados enquanto que os termos cruzados são suprimidos, devido a sua localização fora da origem. Substituindo a equação (4.30) na equação geral proposta por Cohen (4.24), obtém-se a CWD dada por:

$$\rho_{CWD}(t, f) = \iint \sqrt{\frac{\pi\sigma}{\tau^2}} e^{-\pi^2\sigma(u-t)^2/\tau^2 - j2\pi\tau f} x^*(u - \frac{1}{2}\tau) x(u + \frac{1}{2}\tau) du d\tau \quad (4.31)$$

Uma discussão mais detalhada sobre as propriedades da CWD é feita por WILLIAMS & JEON *in* BOASHASH (1992).

Distribuição de Zao-Atlas-Marks (ZAM)

Outra distribuição que apresenta melhoria significativa da resolução tempo-frequência e supressão dos termos cruzados foi desenvolvida por ZAO, ATLAS & MARKS (1990). Estes escolheram a função de núcleo dada por:

$$g_{ZAM}(v, \tau) = g_1(\tau) \frac{\sin(2\pi v |t|/a)}{\pi v} \quad (4.32)$$

A distribuição ZAM, como ficou conhecida, é dada por:

$$\rho_{ZAM}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(\tau) e^{-j2\pi\tau f} \int_{-|\tau|/a}^{+|\tau|/a} x^*(u - \frac{1}{2}\tau) x(u + \frac{1}{2}\tau) du d\tau \quad (4.33)$$

Na maioria dos trabalhos realizados tem-se adotado a constante $a=2$ e a função $g_1(\tau)=1$. A distribuição ZAM tem sido muito aplicada para análise de sinais de voz, onde o conteúdo espectral varia de maneira considerável ao longo do tempo.

Procedimento de Baraniuk-Jones

A partir das várias funções de núcleo investigadas tem-se verificado que cada uma é mais adequada para alguns tipos de sinais do que em outros, indicando que a sua escolha depende das propriedades dos sinais. Um procedimento geral para projeto e otimização das funções de núcleo baseado nas características dos sinais e que considera algumas propriedades desejáveis das distribuições foi desenvolvido por BARANIUK & JONES (1990). Como a distribuição é uma transformada de Fourier dupla da função de ambiguidade generalizada, cujos termos próprios estão concentrados na região próxima da origem e os termos cruzados estão fora da origem, eles utilizaram como critério de escolha a maximização da função de ambiguidade generalizada, dada por:

$$\iint |A(v,\tau)g(v,t)|^2 dv d\tau \quad (4.34)$$

onde a maximização é feita em relação à função de núcleo. Como a função de ambiguidade depende do sinal $x(t)$, a função de núcleo irá então depender da escolha específica do sinal. Algumas propriedades do procedimento adotado por Baraniuk e Jones enfatizam os seguintes aspectos:

- i) preservar a energia total da distribuição através da condição inicial, $g(0,0)=1$;
- ii) a função de núcleo é escolhida de maneira que nunca cresça na direção radial, o que favorece mais os termos próprios e menos os termos cruzados da distribuição;
- iii) o volume da função de núcleo assumido deve ser menor que uma certa quantidade α_c , ou seja:

$$\iint |g(v,t)|^2 v d\tau \leq \alpha_c \quad (4.35)$$

Este último critério também favorece os termos próprios através do controle da concentração da função de núcleo em torno da origem.

4.6 EXEMPLOS TEÓRICOS DE TFDS PARA ANÁLISE DE SINAIS

WVD de um "Chirp"

Seja o sinal descrito na forma Gaussiana,

$$x(t) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} e^{\frac{-\alpha t^2}{2} + j\frac{\beta t^2}{2} + j\omega_0 t} \quad (4.36)$$

A WVD para o sinal $x(t)$ é obtida por:

$$\rho_{WVD}(t, \omega) = \left(\frac{1}{\pi}\right) e^{-\alpha t^2 - (\omega - \omega_0 - \beta t)^2 / \alpha} \quad (4.37)$$

onde observa-se que os valores desta distribuição são sempre positivos.

As FIGURAS 4.1a a 4.1d mostram algumas situações de análise desta distribuição, onde observa-se que à medida que α vai assumindo valores decrescentes a distribuição tende a se concentrar ao longo da linha $\omega_i = \omega_0 + \beta t$, que corresponde à frequência instantânea do sinal.

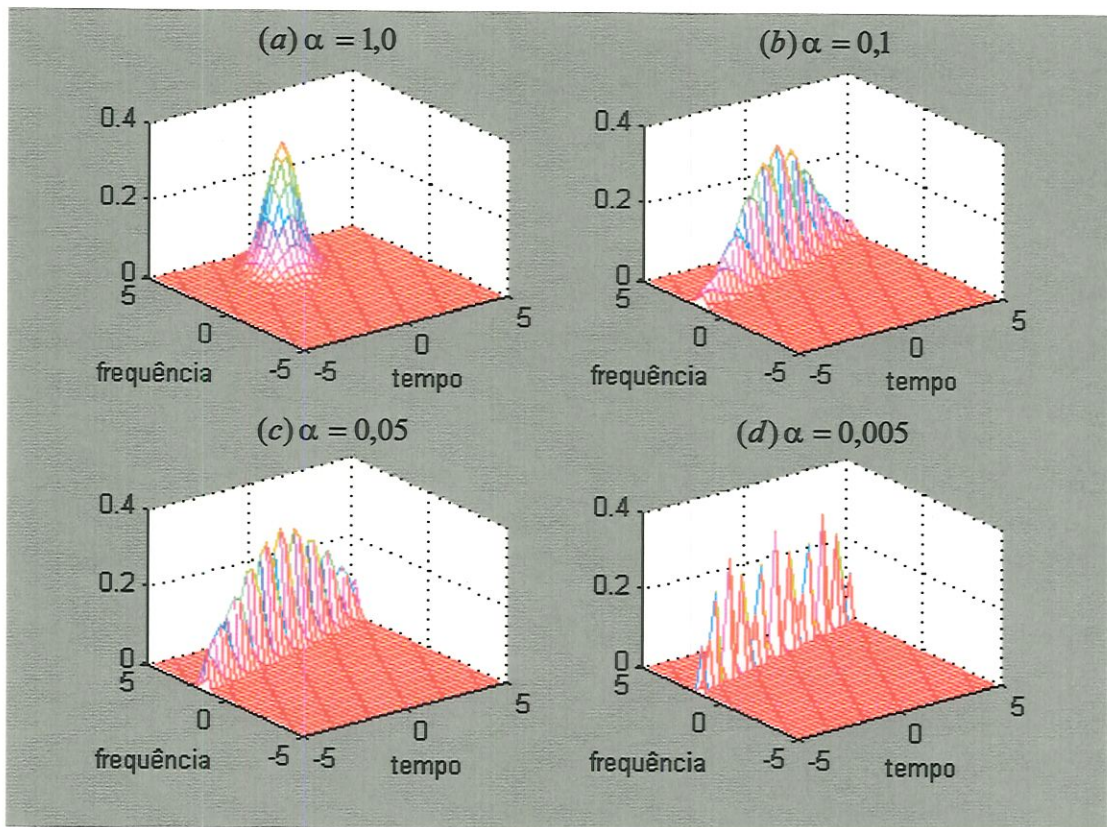


FIGURA 4.1 – WVD para um “chirp” linear.

No caso do “chirp”, isto é quando α tende a zero, a distribuição torna-se

$$\rho_{WVD}(t, \omega) = \delta(\omega - \omega_0 - \beta t) \quad (4.38)$$

mostrando que a energia é totalmente concentrada ao longo da frequência instantânea. As representações típicas de um “chirp” no domínio do tempo e da frequência são mostradas nas FIGURAS 4.2a e 4.2b, onde observa-se que o sinal apresenta como característica a frequência variante no tempo.

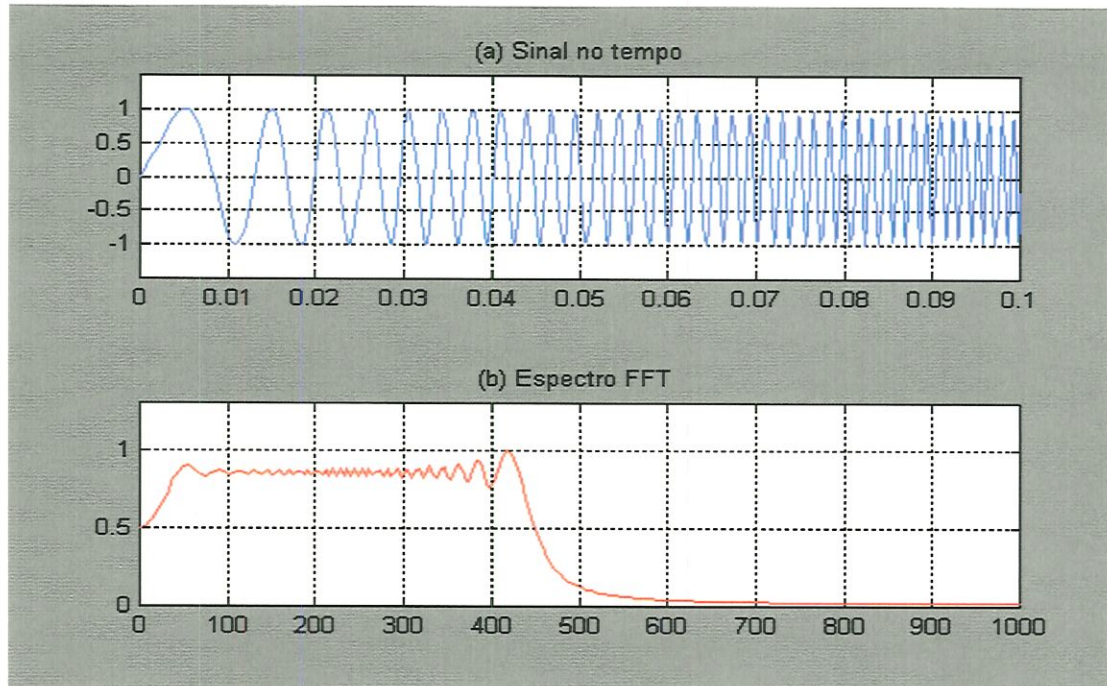


FIGURA 4.2 – Representações no tempo e em frequência de um “chirp”.

Analisando o problema do ponto de vista estatístico, a covariância da distribuição é dada por

$$Cov(t, \omega) = \beta / (2\alpha) \quad (4.39)$$

Quando β tende a zero a covariância tende para zero, significando que não existe correlação entre tempo e frequência. Isto se justifica pois tem-se uma onda senoidal pura todo o tempo. No caso em que α tende a zero, a covariância tende para infinito e obtém-se a correlação máxima.

O coeficiente de correlação entre tempo e frequência é dado por:

$$r = \frac{1}{\sqrt{1 + (\alpha/\beta)^2}} \quad (4.40)$$

em que r tende a zero quando α tende a zero, obtendo-se uma perfeita correlação, e r tende a zero quando α/β tende a infinito, implicando em nenhuma correlação.

WVD para Soma de Dois "Chirps"

Para o caso da soma de dois sinais na forma Gaussiana,

$$x(t) = \left(\frac{\alpha_1}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} e^{-\frac{\alpha_1 t^2}{2} + j\frac{\beta_1 t^2}{2} + j\omega_1 t} + \left(\frac{\alpha_2}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} e^{-\frac{\alpha_2 t^2}{2} + j\frac{\beta_2 t^2}{2} + j\omega_2 t} \quad (4.41)$$

A WVD é obtida por:

$$\rho_{WVD}(t, \omega) = \left(\frac{1}{\pi}\right) e^{-\alpha_1 t^2 - (\omega - \omega_1 - \beta_1 t)^2 / \alpha_1} + \left(\frac{1}{\pi}\right) e^{-\alpha_2 t^2 - (\omega - \omega_2 - \beta_2 t)^2 / \alpha_2} +$$

$$4\sqrt{2}(\alpha_1 \alpha_2)^{\frac{1}{4}} \operatorname{Re} \sqrt{\frac{1}{\gamma_2 + \gamma_1}} \exp\left[\frac{-(\gamma_2 + \gamma_1)t^2}{2} + (\omega_2 - \omega_1)t\right] \exp\left[\frac{\left\{\frac{j}{2}(\gamma_2 - \gamma_1)t + j\left[\omega - \frac{1}{2}(\omega_2 + \omega_1)\right]\right\}^2}{\frac{1}{2}(\gamma_2 + \gamma_1)}\right] \quad (4.42)$$

onde, $\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1$ e $\gamma_2 = \alpha_2 - j\beta_2$.

As FIGURAS 4.3a e 4.3b mostram as WVD e representações no tempo e em frequência destes sinais obtidas das equações (4.41) e (4.42) para duas escolhas de β , onde observa-se a presença dos termos cruzados entre as frequências ω_1 e ω_2 . Estes termos podem ser confundidos com outra componente do sinal. Também é possível visualizar nestas figuras, que parte destes termos de interferência apresentam valores negativos.

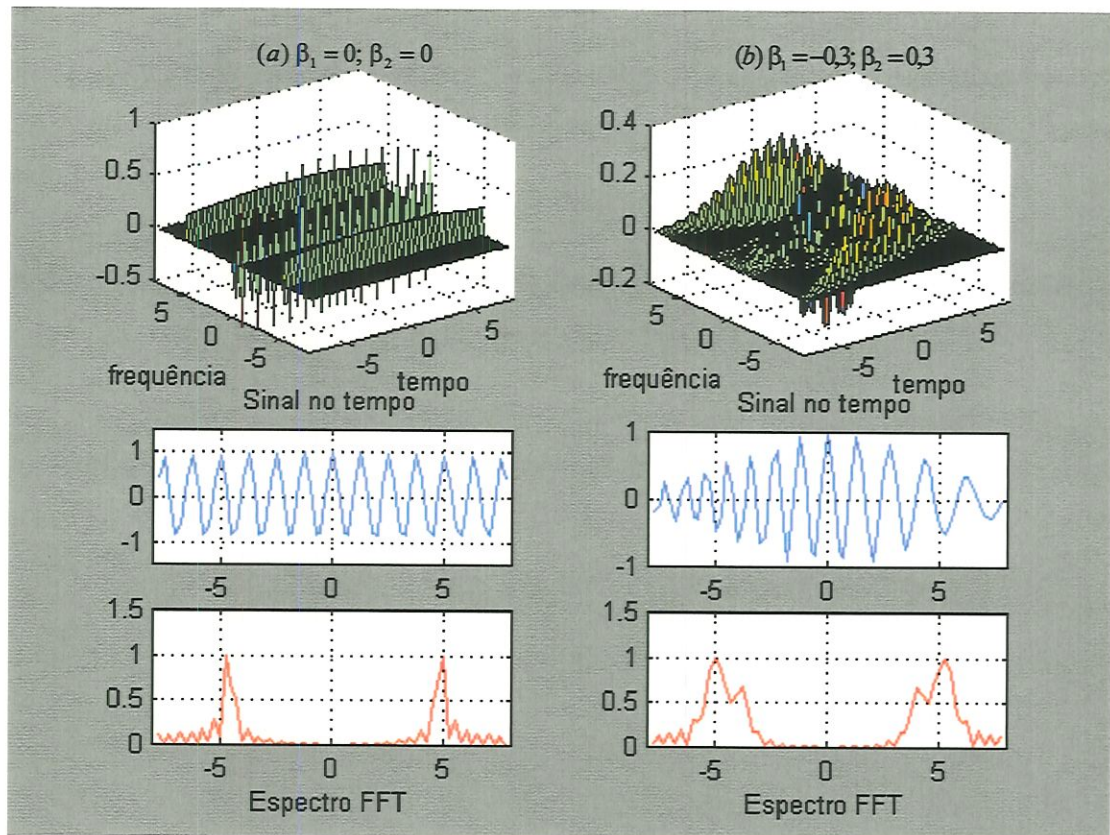


FIGURA 4.3 – WVD para soma de dois “chirps”.

Distribuições WVD e Page de um Sinal do tipo Harmônico

Seja o sinal harmônico de duração finita,

$$x(t) = e^{j\omega_0 t}; \quad 0 \leq t \leq T \quad (4.43)$$

A WVD é obtida por:

$$\rho_{WVD}(t, \omega) = \begin{cases} \frac{t}{\pi} \text{sinc}(\omega - \omega_0)t; & \text{para } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{fora do intervalo} \end{cases} \quad (4.44)$$

onde, a função $\text{sinc}(\omega - \omega_0) = \frac{\sin(\omega - \omega_0)}{(\omega - \omega_0)}$.

Analogamente, a distribuição de Page é obtida por:

$$\rho_p(t, \omega) = \begin{cases} \frac{t}{\pi} \operatorname{sinc}(\omega - \omega_o) t; & \text{para } 0 < t \leq T/2 \\ \frac{T-t}{\pi} \operatorname{sinc}(\omega - \omega_o)(T-t); & \text{para } T/2 < t \leq T \\ 0 & \text{fora do intervalo} \end{cases} \quad (4.45)$$

As FIGURAS 4.4a e 4.4b mostram as duas distribuições obtidas a partir das equações (4.44) e (4.45), onde observa-se que em $t=T/2$ estas coincidem, mas após este valor seu comportamento se torna diferente. A WVD tende a zero no início e fim da duração do sinal enquanto a distribuição de Page continua crescente até o final do período T ao longo da frequência ω_o .

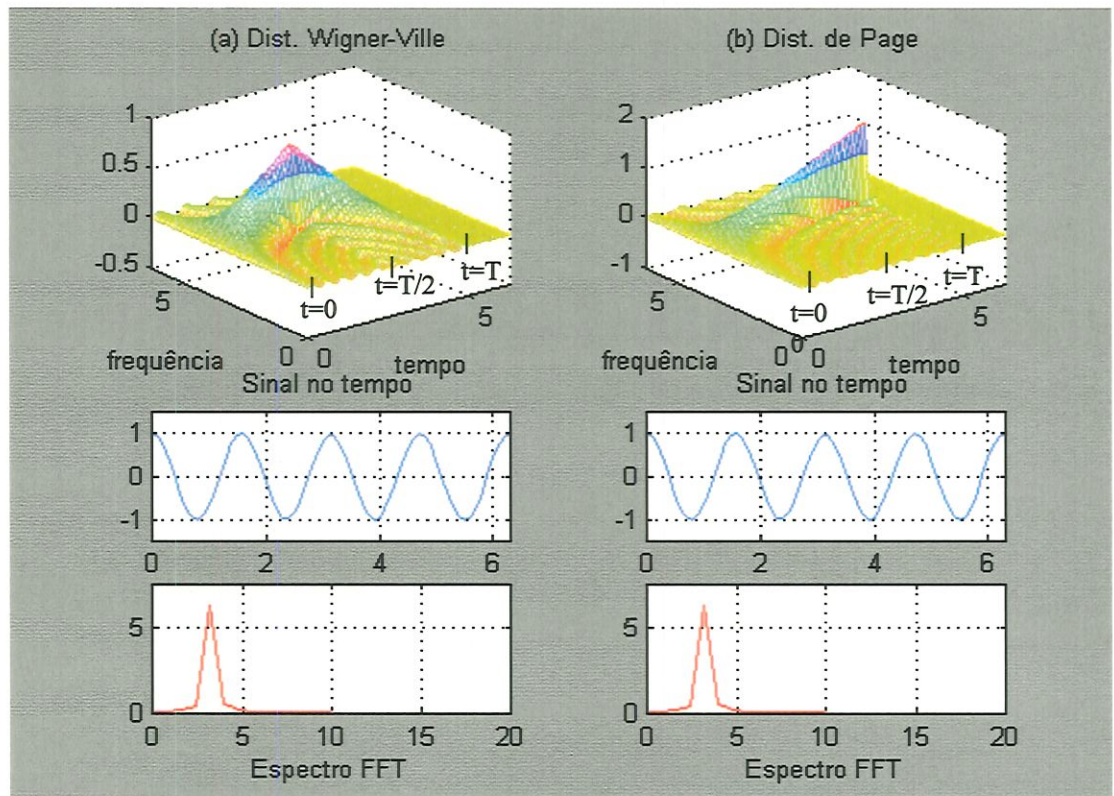


FIGURA 4.4 – Comparação entre TFDs: (a) Wigner-Ville; (b) Page.

WVD e CWD para Soma de Dois Sinais Senoidais

Seja o sinal composto pela soma de dois sinais senoidais, com frequências distintas ω_1 e ω_2 , dado por:

$$x(t) = A_1 e^{j\omega_1 t} + A_2 e^{j\omega_2 t} \quad (4.46)$$

A WVD é obtida por:

$$\rho_{WVD}(t, \omega) = A_1^2 \delta(\omega - \omega_1) + A_2^2 \delta(\omega - \omega_2) + 2A_1 A_2 \delta[\omega - \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)] \cos(\omega_2 - \omega_1)t \quad (4.47)$$

Analogamente, a CWD é obtida por:

$$\rho_{CWD}(t, \omega) = A_1^2 \delta(\omega - \omega_1) + A_2^2 \delta(\omega - \omega_2) + 2A_1 A_2 \cos(\omega_2 - \omega_1)t \eta(\omega, \omega_1, \omega_2, \sigma) \quad (4.48)$$

onde,

$$\eta(\omega, \omega_1, \omega_2, \sigma) = \sqrt{\frac{\sigma}{4\pi(\omega_1 - \omega_2)^2}} \exp\left\{-\frac{[\omega - \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)]^2}{4(\omega_1 - \omega_2)^2 / \sigma}\right\} \quad (4.49)$$

Observa-se que no caso em que σ tende para infinito, o valor η tende para $\delta[\omega - \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)]$ e a equação (4.48) torna-se igual a equação (4.47). Isto significa que a CWD coincide com a WVD, pois a função de núcleo torna-se igual a 1.

As FIGURAS 4.5a e 4.5b mostram as duas distribuições obtidas a partir das equações (4.47) e (4.48). Nota-se que na WVD surgem alguns termos cruzados no ponto médio entre as duas frequências ω_1 e ω_2 dificultando sua análise. Já na CWD observa-se que os termos cruzados são praticamente removidos através de uma janela adequada ou ajustando-se o valor de σ .

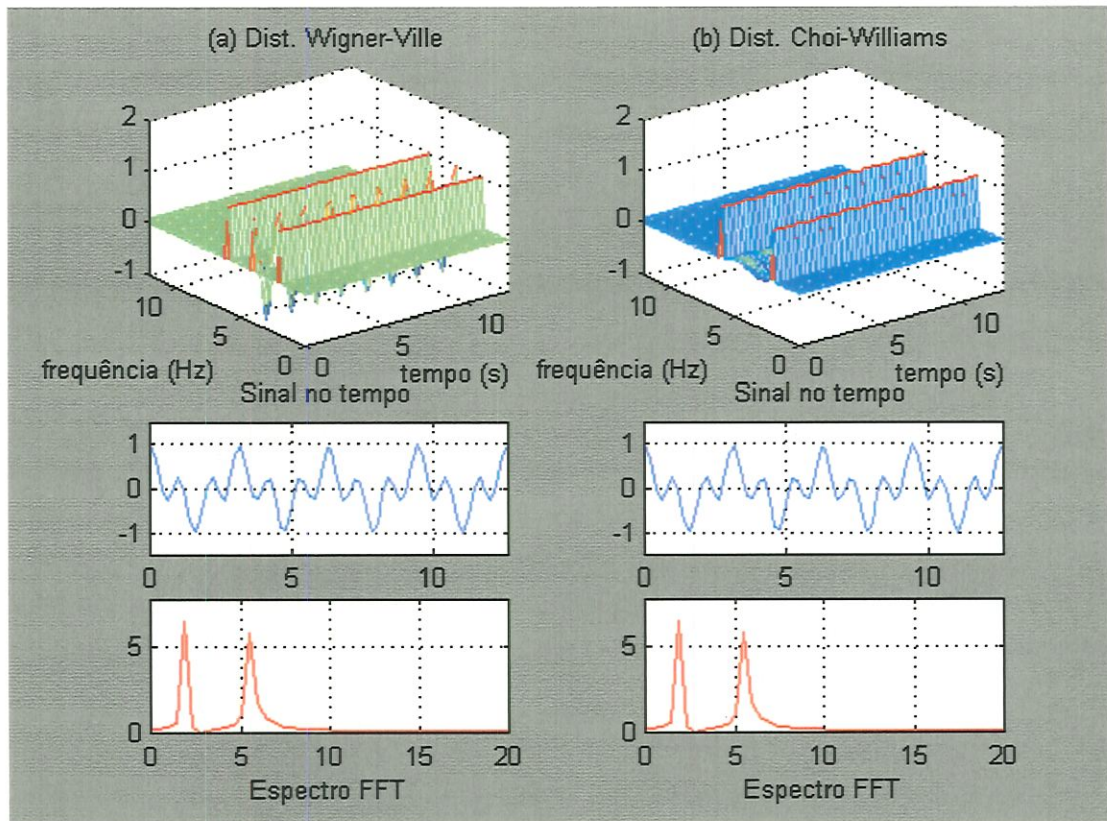


FIGURA 4.5 – Comparação entre TFDs (a) WVD; (b) CWD.

4.7 PROCEDIMENTOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DAS TFDs

Equação Geral de Cohen

As distribuições tempo-frequência podem ser expressas em termos do produto bilinear proposto por COHEN (1989):

$$\rho_z(t, f) = \iiint e^{j2\pi v(u-t)} g(v, \tau) z(u + \frac{1}{2}\tau) z^*(u - \frac{1}{2}\tau) e^{-j2\pi f\tau} dv du d\tau \quad (4.50)$$

em que z é o sinal analítico e $g(v, \tau)$ determina as características da distribuição.

Após a integração em relação a ν ser realizada, a equação (4.50) fica

$$\rho_z(t, f) = \iint G(t, \tau) z(u + \frac{1}{2}\tau) z^*(u - \frac{1}{2}\tau) e^{-j2\pi f t} du d\tau \quad (4.51)$$

A expressão na forma discretizada da equação (4.51) a ser usada na implementação é obtida por

$$\rho_z(n, k) = \sum_{m=-M}^M \sum_{p=-M}^M G(p, m) z(n + p + m) z^*(n + p - m) e^{-j4\pi m k / N} \quad (4.52)$$

onde n e k são as variáveis discretas representando o tempo e a frequência, e os parâmetros m e p são inteiros variando de $-M$ a M pontos discretos.

Esta equação pode ainda ser reduzida ao produto na forma

$$\rho_z(n, k) = F_{m \rightarrow k} [G(n, m) * K_z(n, m)] \quad (4.53)$$

onde $F_{m \rightarrow k}$ denota a transformada de Fourier discreta no instante de tempo m para a frequência k , e o símbolo $*$ denota a convolução discreta no tempo.

Procedimento de Cálculo das TFDs

Um procedimento geral para implementação das TFDs baseado nas classes de Cohen pode ser expandido em três passos, conforme proposto por BOASHASH & REILLY *in* BOASHASH (1992):

- i) Formar o produto bilinear $K_z(n, m) = z(n + m) z^*(n - m)$. Pode ser mostrado que este produto apresenta simetria Hermitiana, ou seja

$$K_z(n, m) = \begin{cases} z(n + m) z^*(n - m) & \text{para } m \geq 0 \\ K_z^*(n, -m) & \text{para } m < 0 \end{cases} \quad (4.54)$$

Isto significa que só é necessário calcular o produto para os valores correspondentes aos instantes de tempo positivos, o que reduz à metade o número de cálculos a serem realizados;

- ii) Convoluir a função $G(n,m)$ com $K_z(n,m)$ na direção n (tempo). É comum nas transformadas bilineares a existência de simetria em ambas as direções m e n , e este fato deve ser usado para reduzir a quantidade de cálculos e memória requerida;
- iii) Calcular a transformada de Fourier do produto $[G(n,m)*K_z(n,m)]$. Neste caso para cada intervalo de tempo discretizado é obtida uma fatia da TFD, calculada a partir de qualquer rotina FFT. Como estas rotinas operam apenas com valores de tempo e frequência positivos se faz necessário uma translação de eixo, isto é, no lugar de representar as frequências de $-\frac{1}{2}f$ a $\frac{1}{2}f$ com o valor zero aparecendo no meio da sequência, utiliza-se valores de frequências de 0 a f , com o valor zero aparecendo como primeiro elemento desta sequência.

A FIGURA 4.6 ilustra o diagrama esquemático para o cálculo da PWVD que será adotado no trabalho, obtido a partir da geração do sinal no tempo, e implementado conforme o procedimento proposto por SHIN & JEON (1993).

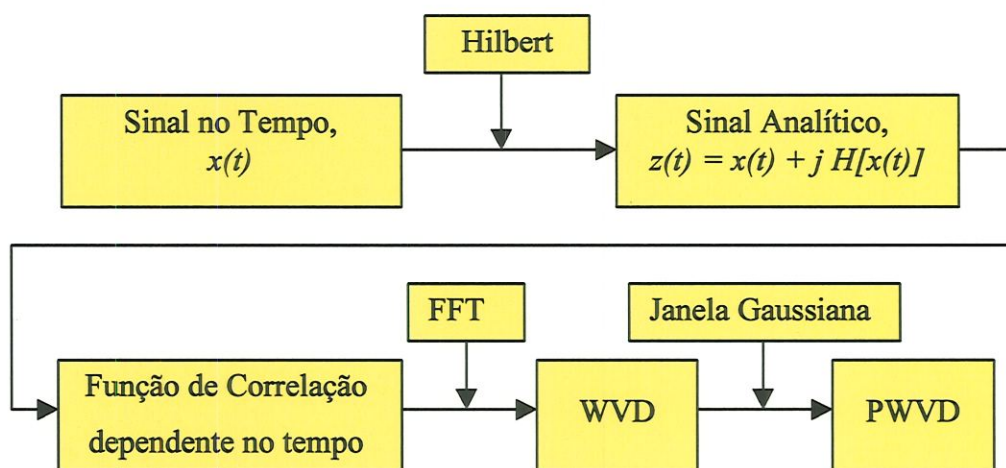


FIGURA 4.6 – Esquema para o cálculo da PWVD.

4.8 EXEMPLOS DA PWVD APLICADA EM MODELOS DE SINAIS SINTETIZADOS

A seguir serão ilustrados alguns modelos de sinais sintetizados que representam vários tipos de fenômenos encontrados na prática de análise de vibrações, juntamente com suas representações conjunta tempo-frequência obtidas pelo método PWVD. Os gráficos foram obtidos a partir de sinais gerados com $N=1024$ pontos no tempo, e largura de janela fixa $n_{win}=32$ pontos, através de programas implementados em MATLAB®.

Sinais Harmônicos

A FIGURA 4.7 mostra as representações de um sinal harmônico do tipo estacionário composto pela soma de duas ondas senoidais com frequências de 50 e 200 Hz, respectivamente.

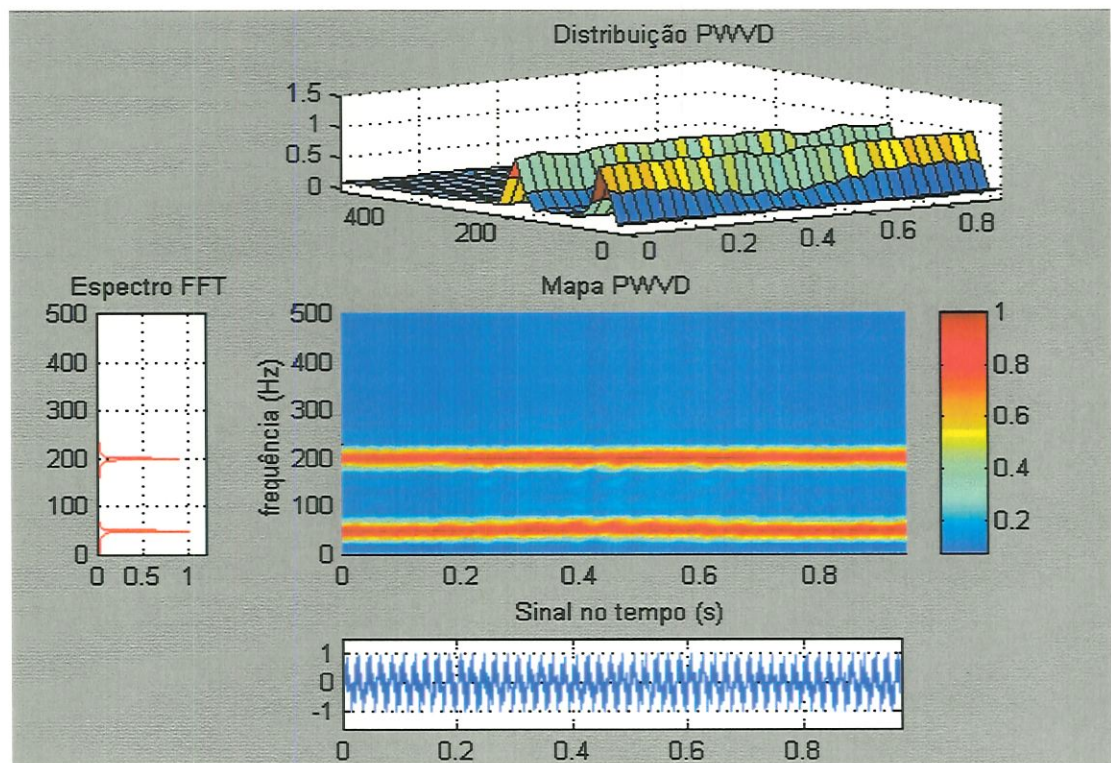


FIGURA 4.7 – Representações de sinal harmônico do tipo estacionário.

Como o sinal apresenta conteúdo em frequência invariante no tempo, observa-se que a distribuição e o mapa de contorno PWVD não acrescentam novas informações em relação ao espectro FFT. Por outro lado, verifica-se que o método PWVD não apresenta interferências entre as duas componentes de frequências, bastante comuns na WVD.

Sinais Harmônicos com Várias Frequências (“stepwise”)

A FIGURA 4.8 mostra as representações de um sinal composto por três ondas senoidais com durações finitas e com frequências escalonadas de 250, 150 e 50 Hz, ao longo do tempo. A análise espectral clássica via FFT mostra as componentes espectrais do sinal, porém não permite informar quando estas ocorrem.

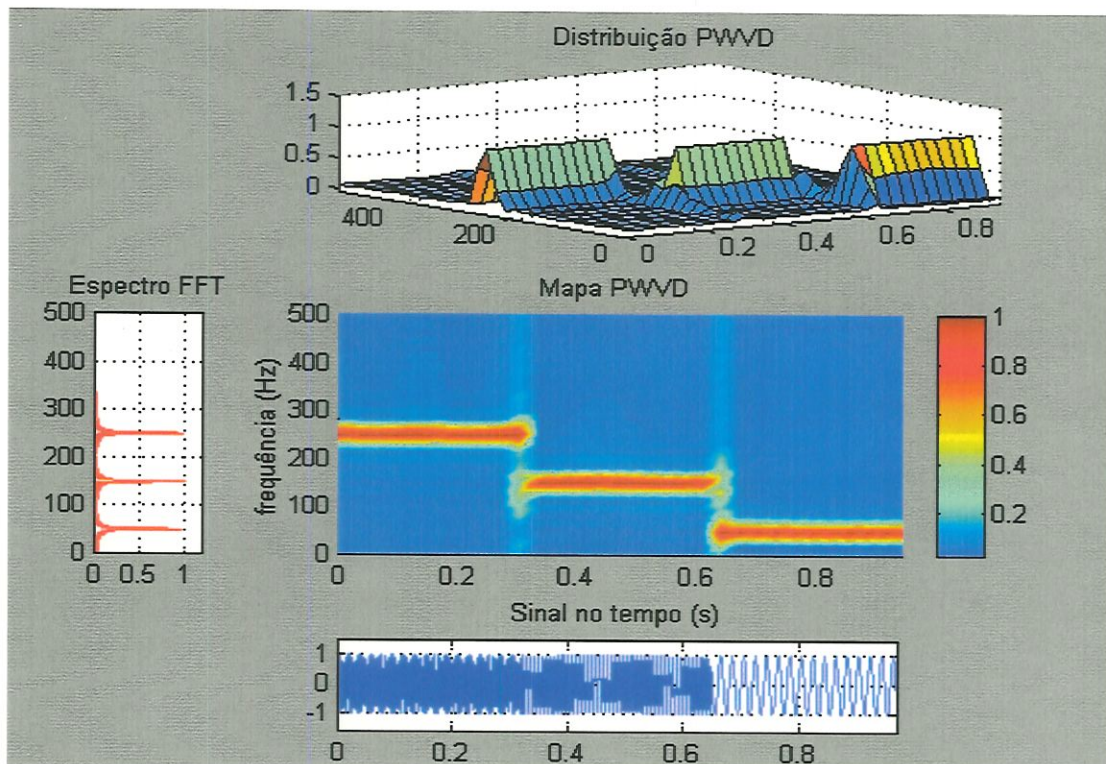


FIGURA 4.8 – Representações de sinal harmônico do tipo “stepwise”.

A distribuição conjunta tempo-frequência e o mapa de contorno PWVD correspondente mostram de maneira inequívoca cada uma destas componentes e suas respectivas durações no tempo, indicando corretamente as características relacionadas com as variações no tempo e as múltiplas componentes em frequência. Caso ocorram mudanças no tamanho da janela de amostragem do sinal, a resolução tempo-frequência muda, porém a energia total da distribuição permanece inalterada.

Sinais com Varreduras de Frequências (“sweep frequency”)

A FIGURA 4.9 mostra as representações de um sinal composto pela soma de duas componentes em frequência, uma crescendo e outra decrescendo de maneira simultânea, forma típica de alguns sinais não-estacionários. Pela análise espectral via FFT é muito difícil destacar a presença destas componentes uma vez que estão muito concentradas na faixa 0 a 200 Hz.

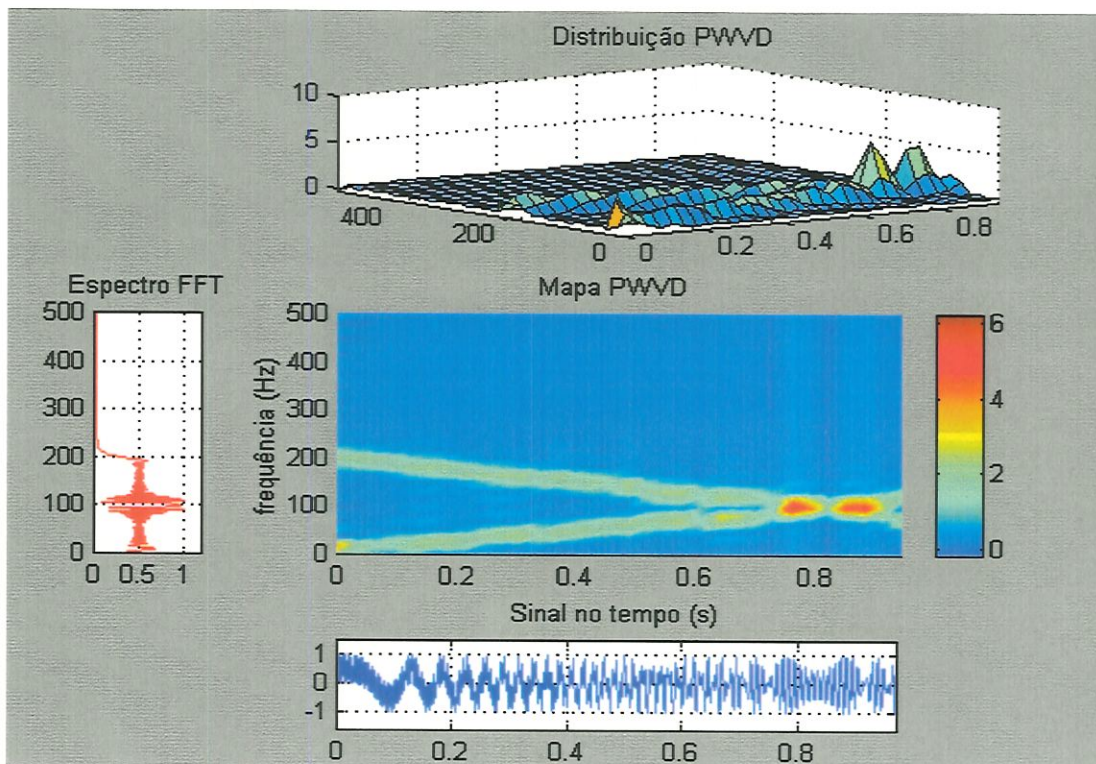


FIGURA 4.9 – Representações de um sinal do tipo “sweep frequency”.

Porém a partir da distribuição e do mapa de contorno PWVD observa-se claramente esta variação, notando-se que ocorre uma maior densidade das amplitudes próxima aos pontos de interseção, antes e após 0,8 s, causado pela coincidência das frequências do sinal neste instante. Também neste caso, observa-se que praticamente não ocorre a presença de interferência entre componentes do sinal, o que demonstra a eficiência do método PWVD.

Sinal do Tipo Varredura Linear (“Chirp”)

A FIGURA 4.10 mostra as representações de outro tipo de sinal não-estacionário que faz uma varredura crescente e decrescente de componentes em frequência conhecido como “chirp” linear. Este sinal possui apenas uma componente de frequência a cada tempo, porém apresenta uma estrutura de espectro FFT semelhante ao caso anterior, dificultando a sua interpretação.

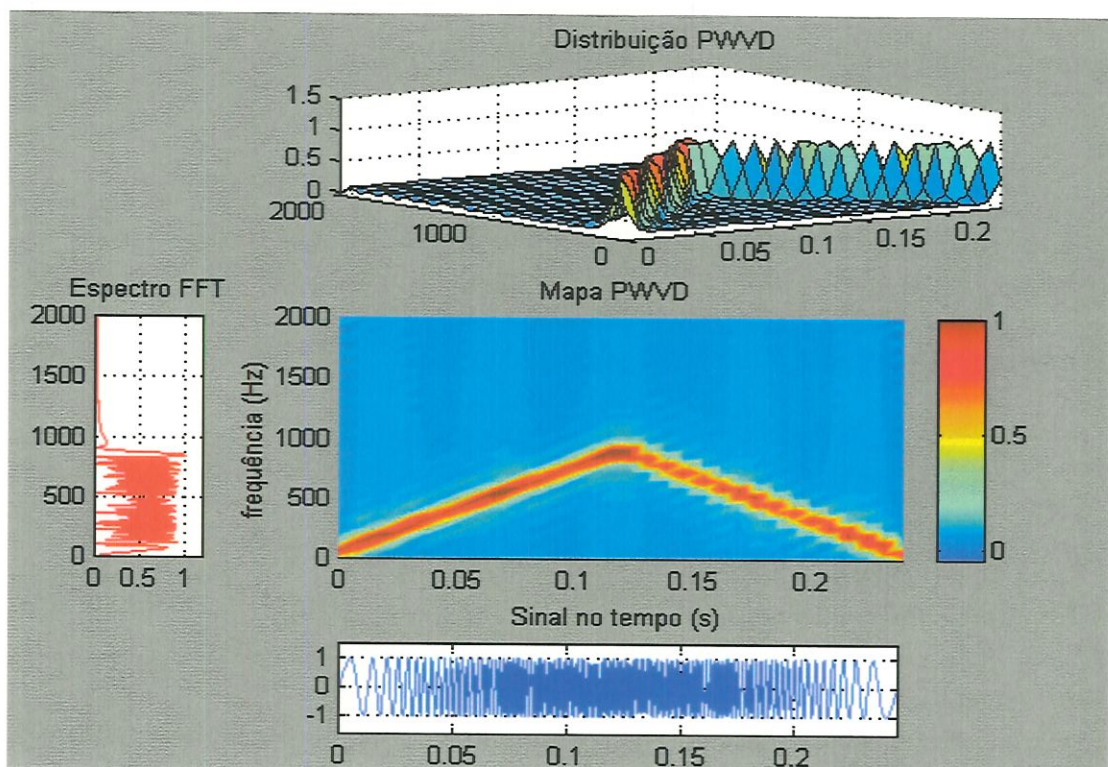


FIGURA 4.10 – Representações de um sinal de varredura linear.

A partir da distribuição e do mapa de contorno PWVD é possível diferenciar bem a sua forma de variação no tempo, resultante de um aumento gradual da frequência até cerca de 800 Hz para, em seguida, reduzi-la novamente para próximo de 0 Hz.

Sinal do Tipo Partida (“start-up”)

A FIGURA 4.11 mostra as representações de um sinal típico de estágios iniciais de partida rápida de motores e bombas em regime transiente de aceleração “start-up”, apresentando características de vibrações não-estacionárias devido à grande aceleração, impossibilitando aplicar o diagrama de espectros em cascata via FFT.

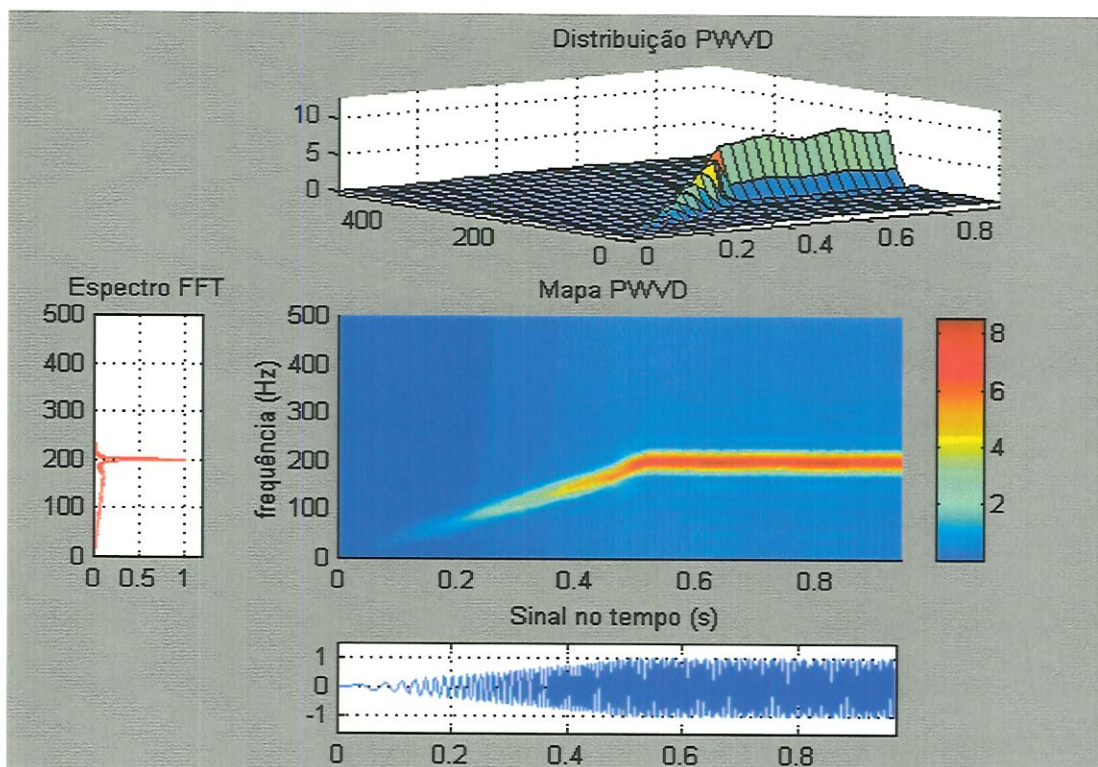


FIGURA 4.11 – Representações de um sinal para partidas.

Através da distribuição e do mapa de contorno PWVD pode-se observar que o sinal apresenta varredura crescente nos primeiros 0.5 s e permanece constante nos próximos 0.5 s quando o sinal se torna estacionário. Na faixa em que o sinal se encontra em regime, verifica-se um aumento da densidade espectral representando a concentração da energia na frequência de 200 Hz.

Sinais para Contatos Intermitentes (“glitches”)

A FIGURA 4.12 mostra as representações típicas de um sinal de roçamento intermitente entre rotores e carcaças gerado por desalinhamentos ou desbalanceamentos de máquinas rotativas. Observa-se que a presença destes eventos não é fácil de ser diagnosticada através da análise espectral via FFT pois os mesmos ocorrem de forma transiente e em curtos intervalos de tempo, o que é um problema para o analista de vibrações.

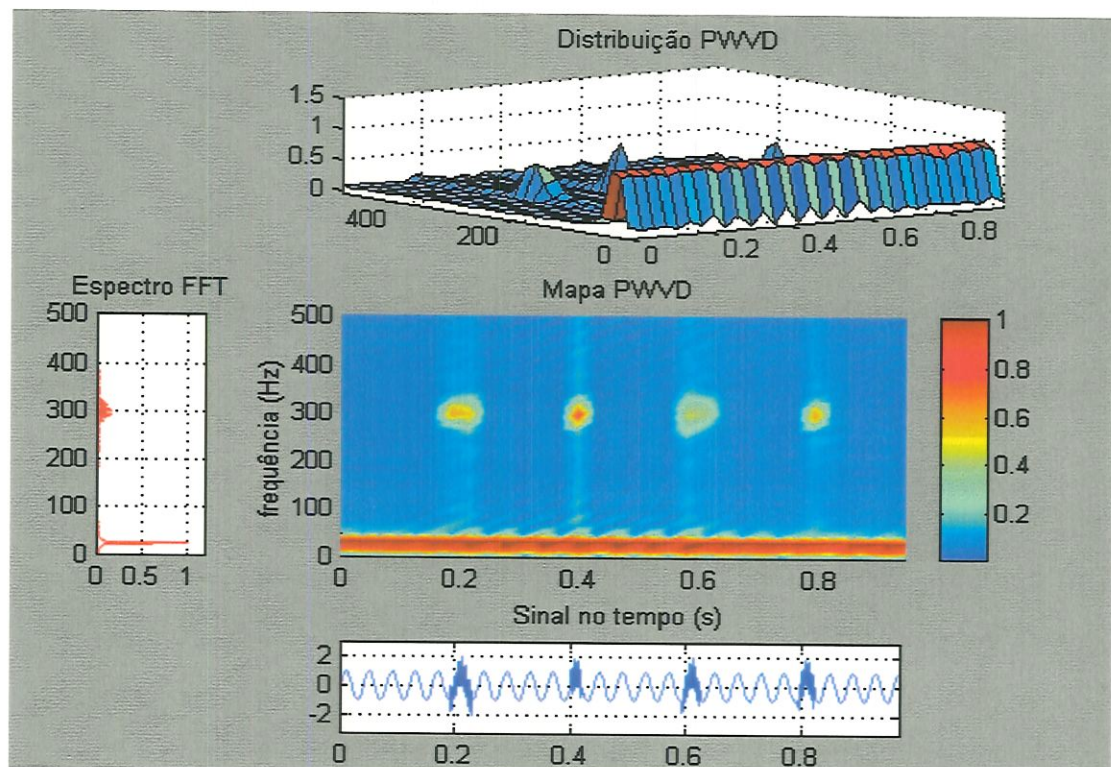


FIGURA 4.12 – Representações de um sinal para contatos intermitentes.

Através da distribuição e do mapa de contorno PWVD observa-se claramente a frequência fundamental de 25 Hz relacionada com a frequência de rotação, além de ser possível visualizar uma das frequências naturais do rotor que se encontra próxima de 300 Hz e a periodicidade com que elas são excitadas, garantindo uma análise objetiva e clara da origem da vibração.

Sinais com Decaimento Exponencial

Algumas classes de assinaturas mecânicas apresentam sinais transientes com características de harmônicos decaindo exponencialmente somados a sinais senoidais do tipo estacionário. Estes sinais simulam bem alguns fenômenos resultantes da resposta a uma excitação periódica do tipo trem de impulsos, representando um sistema sub-amortecido de segunda ordem. É comum obter estes sinais em máquinas rotativas que apresentam componente senoidal constante devido à rotação e um sinal transiente com decaimento exponencial causado por forças impulsivas nos elementos. Em geral a frequência moduladora é muito mais baixa que as frequências presentes nos transientes induzidos pelos impactos.

A FIGURA 4.13 mostra as representações típicas de um sinal de vibração simulando uma falha pontual localizada na pista estacionária de rolamentos sujeitos a carga radial e velocidade constante. A partir do sinal no tempo observam-se os decaimentos dos pulsos gerados pela passagem das esferas sobre o defeito e sua periodicidade, enquanto que através do espectro FFT verifica-se o aumento da densidade espectral em torno de uma das frequências de ressonância do sistema, cujas linhas espectrais estão separadas pela frequência característica do defeito. A partir da distribuição e do mapa de contorno PWVD é possível visualizar de forma simultânea a forma e a periodicidade dos impactos no eixo de tempo, bem como sua concentração de energia no eixo de frequência, localizada em torno da região de maior densidade espectral, coincidente com a frequência de ressonância estrutural de 1500 Hz.

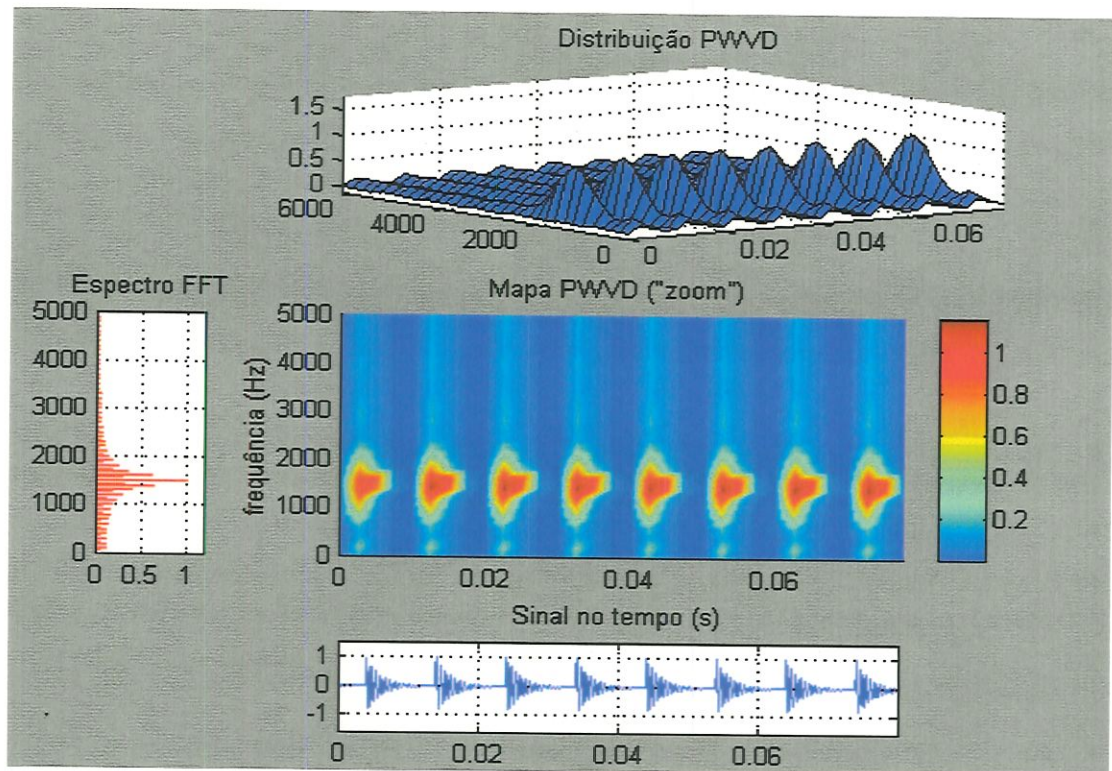


FIGURA 4.13 – Representações de um sinal com decaimento exponencial.

Sinais com Diferentes Frequências e Decaimento Exponencial

A FIGURA 4.14 mostra as representações de outro tipo de sinal transiente que apresenta decaimento senoidal, porém com frequências distintas de 50, 40, 30 e 20 Hz iniciando nos tempos t iguais a 1, 2, 3 e 4 s, respectivamente. Analisando o sinal no tempo não é possível discriminar bem a existência de frequências distintas, embora a periodicidade entre os pulsos esteja bem clara. Através da análise espectral via FFT são observadas as frequências características do fenômeno mas não se consegue informar quando estas ocorrem. Porém, a partir da distribuição e do mapa de contorno PWVD é possível caracterizar bem este sinal, embora a forma das estruturas tempo-frequência se apresentem um pouco distorcidas em relação à forma temporal dos pulsos.

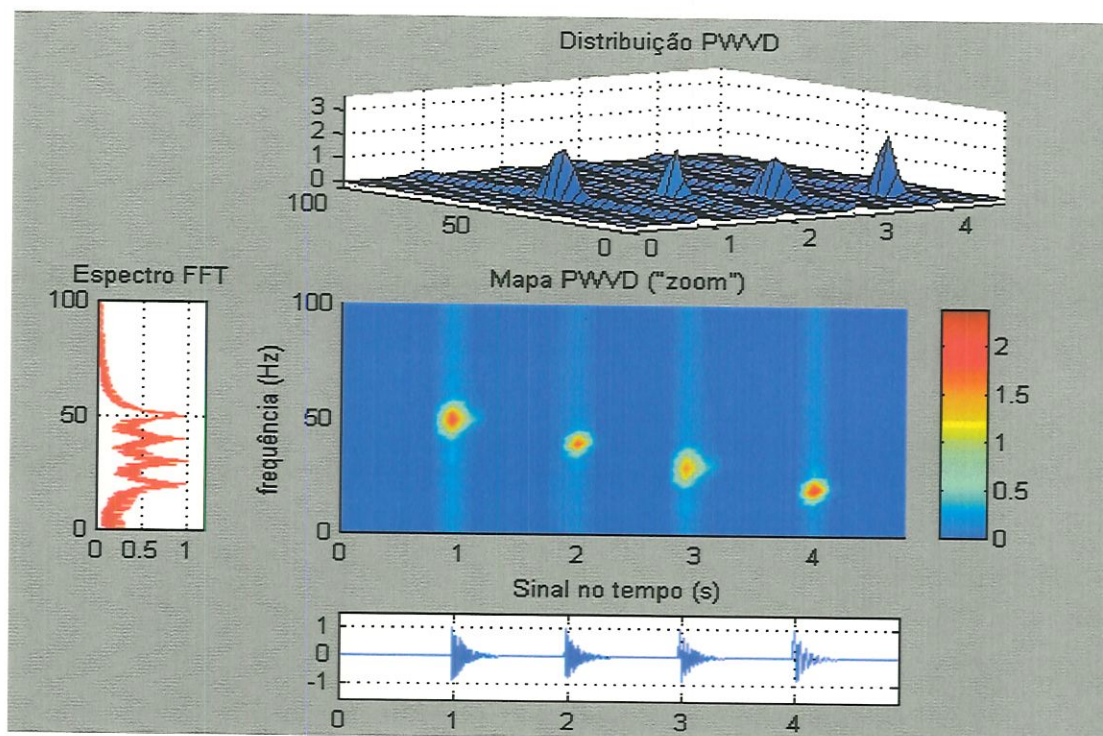


FIGURA 4.14 – Representações de sinais com diferentes frequências.

Discussões sobre o método PWVD

A partir dos exemplos apresentados sobre a aplicação do método PWVD em sinais sintetizados de vibração, representando diversos problemas que envolvem mudanças no conteúdo de frequências ao longo do tempo, observa-se que este método se mostrou bastante eficiente permitindo a extração simultânea das características temporais e espectrais dos sinais. Quanto aos possíveis problemas relacionados com os termos cruzados ou interferências, comuns nas WVD, verifica-se que através do procedimento adotado para cálculo da PWVD, utilizando uma janela Gaussiana deslizando no plano tempo-frequência, obteve-se estruturas livres de interferência, o que garante uma interpretação mais confiável das análises. Uma análise comparativa sobre os métodos STFT e PWVD em termos de estrutura tempo-frequência para sinais sintetizados é feita por SILVA & MUCHERONI (1998).



Capítulo 5

SIMULAÇÃO DE MODELOS DE FALHAS EM ROLAMENTOS

Nos sistemas mecânicos em geral é muito importante o entendimento do processo de desenvolvimento de falhas em seus componentes, principalmente nas fases de operação e de manutenção. O conhecimento dos fenômenos envolvidos neste processo através da análise de parâmetros físicos pode fornecer subsídios importantes para modificações e melhorias dos projetos bem como para a manutenção preventiva e preditiva. Para representar os processos físicos de desenvolvimento de falhas em componentes de máquinas rotativas são utilizados modelos de sinais. Existem sinais que se repetem de forma periódica e estacionária e sinais do tipo não-estacionário ou transiente. Os sinais reais em máquinas rotativas apresentam múltiplas componentes com frequências variáveis no tempo, originadas por fenômenos intrínsecos como modulações de amplitude e ressonâncias estruturais dos suportes e dos meios de transmissão entre a fonte de vibração e o sensor de medida.

O padrão característico da assinatura de vibração produzida por rolamentos não depende apenas do componente defeituoso mas também de sua localização em relação à zona de carga. Uma falha localizada na pista estacionária, posicionada na zona de carga do rolamento cujo eixo de rotação gira com velocidade constante, é intuitivamente mais fácil de se detectar. Apresenta-se como pulsos regulares de frequência constante e de alta magnitude. Porém uma falha presente na pista interna rotativa ou nos elementos rolantes, produz pulsos periódicos que dependem das características de carregamento e do meio de transmissão do sistema. Neste caso apresenta-se como um fenômeno com modulação em amplitude, com

pulsos mais intensos sendo originados na região de amplitude máxima da zona de carga, o que torna a análise dos sinais mais complicada. Outras dificuldades na detecção de falhas, principalmente quando forem incipientes, ocorrem devido à presença de ruídos nas baixas e médias frequências e do espectro de banda larga de um sinal de rolamento defeituoso. Nestes casos, os métodos de análise espectral via FFT nem sempre conseguem descrever de maneira satisfatória o fenômeno físico envolvido. Isto se deve à dificuldade de análise dos vários componentes espectrais que surgem junto com as bandas laterais mistas, mascarando as frequências características relacionadas ao defeito. Para problemas desta natureza os métodos de análise conjunta tempo-frequência podem fornecer informações adicionais para interpretação dos fenômenos investigados, devido a sua grande capacidade de separação dos componentes de sinais causados por diferentes fontes.

5.1 METODOLOGIA

Grande parte dos trabalhos publicados no campo de monitoramento e da análise de vibração, aplicados a rolamentos, apenas identificam a presença da falha. Em alguns casos trazem indicadores que diferenciam as medidas de forma qualitativa tais como leve, médio ou muito avariado, sem base quantitativa da identificação de falhas, MATHEW & ALFREDSON (1984), KIM (1984) e DAADBIN & WONG (1992). Há necessidade de desenvolvimento de uma relação quantitativa entre o parâmetro de detecção e o grau de severidade da falha. Geralmente o sucesso dos métodos de detecção de falhas depende de se conseguir um aumento da relação sinal-ruído, além de identificar o sinal característico que dita a condição do elemento. Também não existem padrões a nível internacional que estabeleçam critérios sobre a severidade da falha em rolamentos. Um critério que vem sendo adotado nas indústrias segue as recomendações da Timken Company, onde considera que um rolamento deve ser substituído quando o tamanho da falha atingir uma área de cerca de $0,01 \text{ pol}^2$ ou $6,45 \text{ mm}^2$ (SHIROISHI *et al*, 1997).

Visando contribuir no campo da detecção e de diagnóstico de falhas em rolamentos procura-se investigar aqui algumas questões que relacionam as características dos sinais de vibração com o tamanho e a localização da falha. Esta investigação é realizada através da aplicação de métodos de análise nos domínios do tempo e da frequência, bem como através da aplicação de métodos de análise conjunta tempo-frequência, objetivando a detecção e a quantificação efetiva da falha nos seus diversos estágios de desenvolvimento.

Neste capítulo serão investigados vários métodos aplicados a alguns modelos de sinais de vibração que simulam falhas nas pistas externa e interna de rolamentos utilizando parâmetros capazes de serem observados na prática. Serão discutidos os resultados obtidos a partir das simulações nos modelos teóricos para diversas condições de falhas, sintetizadas de modo a permitir uma comparação efetiva entre as técnicas de análise. Os procedimentos para detecção e diagnóstico de falhas aplicados nos diversos estágios, ou condições simuladas, são descritos em seguida. Na aplicação das técnicas de processamento e análise dos sinais de vibração é proposta a seguinte metodologia:

- i) Análise de sinais no domínio do tempo, a partir de modelos teóricos e de medidas experimentais obtidas diretamente do sistema de aquisição, utilizando parâmetros indicadores de crescimento da falha como o nível *rms*, o valor de *pico*, o fator de crista e fator de curtose;
- ii) Análise de sinais no domínio da frequência, através da aplicação dos conceitos da transformada de Fourier via FFT, utilizando parâmetros da técnica do envelope HFRT, obtidos dos espectros dos sinais demodulados em baixa frequência, filtrados em torno de uma das frequências de ressonância que tenha sido excitada pelos impactos;
- iii) Análise de sinais por uma representação conjunta tempo-frequência utilizando a distribuição Pseudo-Wigner-Ville (PWVD), aplicada a sinais gerados no tempo, seguida da aplicação da transformada de Hilbert para obtenção de sinais analíticos, visando comparar a sua eficiência com as outras técnicas de análise.

5.2 DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS INDICADORES

Parâmetros de Análise no Domínio do Tempo

Nível x_{rms} e valor x_{pic}

Enquanto o valor de pico x_{pic} é facilmente obtido a partir de um sinal qualquer, o nível x_{rms} verdadeiro nem sempre é fácil de ser obtido na prática, pois é baseado no cálculo da função densidade de probabilidade (PDF). Matematicamente, para um sinal $x(t)$ qualquer, o nível x_{rms} é definido por:

$$x_{rms} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)^2 dt} \quad (5.1)$$

A FIGURA 5.1 ilustra estes parâmetros deduzidos para um sinal do tipo senoidal, onde obtém-se a relação $x_{rms} = 0.707 x_{pic}$.

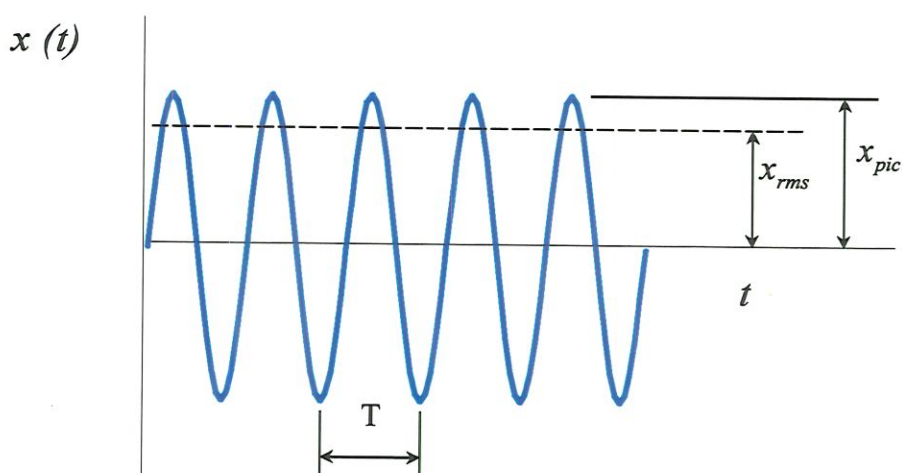


FIGURA 5.1 – Representação de parâmetros de sinal senoidal no tempo.

Mesmo com a vantagem de prevenir quanto a um funcionamento anormal da máquina, especialmente em situações onde determinados níveis não possam ser ultrapassados, os valores x_{rms} e x_{pic} por si só não permitem que se estabeleça um diagnóstico confiável sobre qual componente do sistema está avariado, dificultando a análise.

Fator de Crista F_c

O fator de crista é definido como a razão do valor de pico de aceleração de vibrações x_{pic} em relação ao valor x_{rms} de aceleração medido no rolamento, numa faixa de análise de frequências entre 1 kHz e 10 kHz, ou seja

$$F_c = \frac{x_{pic}}{x_{rms}} \quad (5.2)$$

Este método se baseia no fato que com a deterioração progressiva das superfícies de contato o nível x_{pic} de aceleração cresce mais rapidamente que o nível x_{rms} de aceleração devido ao aumento do caráter impulsivo pela passagem dos elementos rolantes sobre a falha. Apesar do fator de crista combinar as vantagens de dois parâmetros, existem muitas situações onde os resultados não são conclusivos e, portanto, não indicam crescimento da falha efetivamente.

Fator de curtose K_t

O fator de curtose é definido como o quarto momento estatístico, normalizado pelo desvio padrão elevado à quarta potência, sendo dado por

$$K_t = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^4 p_x(x) dx \quad (5.3)$$

onde $p_x(x)$ é a distribuição de probabilidades do sinal, μ é a média e σ é o desvio padrão. Assumindo-se que num rolamento sem falha as vibrações geradas pela passagem das esferas sobre as pistas são de natureza aleatória e que a distribuição de probabilidades tende à Gaussiana, o fator de curtose obtido para mancais em bom estado é igual a três. Porém com o surgimento e crescimento da falha os valores de K_t tendem a aumentar devido aos impulsos gerados pela passagem dos elementos rolantes sobre a falha.

Fator K

Um outro parâmetro que visa melhorar a eficiência do fator de curtose é definido como o produto entre K_t e o valor x_{rms} , ou seja

$$K = K_t \cdot x_{rms} \quad (5.4)$$

O fator de curtose K_t é um índice confiável para detecção de falhas incipientes mas tem limite de aplicação para rotações muito altas ou quando ocorre o crescimento de falhas no mancal. Por outro lado, o nível x_{rms} embora não seja adequado para detecção de falhas incipientes se apresenta sempre crescente. Daí a idéia de combinação do produto destes parâmetros.

Parâmetros de Análise no Domínio da Frequência

Para análise dos parâmetros no domínio da frequência foi escolhida a técnica usando o espectro do envelope HFRT por ser bastante difundida no monitoramento de rolamentos e apresentar bons resultados já nos primeiros estágios de falhas (MCFADDEN & SMITH, 1990). Uma maneira de comparar a eficiência desta técnica é utilizar o parâmetro da razão de picos, conforme proposto por SHIROISHI *et al* (1997):

$$R_{pic} = \frac{\sum_{j=1}^n P_j}{\frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} A_i}, \quad (5.5)$$

onde: P_j são os valores das amplitudes de picos localizados na frequência característica do defeito e nas suas respectivas harmônicas, após aplicação da técnica do envelope HFRT;

A_i são as amplitudes obtidas em qualquer frequência para as N_l linhas espectrais do envelope HFRT;

$n = 600 / f_d$ é o número de múltiplos da frequência característica do defeito f_d , contidos no espectro do envelope HFRT, dentro da faixa de análise escolhida (0 a 600 Hz).

Este índice R_{pic} é adimensional e determina se há ou não a presença de falha de caráter impulsivo no rolamento. Assim, o valor de pico da primeira harmônica após aplicação da técnica do envelope HFRT também é usado para determinar a magnitude da falha. Os principais passos necessários para obtenção do espectro do envelope HFRT para um sinal típico são ilustrados na FIGURA 5.2 e descritos como segue:

- i) Obtém-se o sinal no tempo, não-filtrado, medido na superfície do mancal, conforme mostra a FIGURA 5.2a;
- ii) Calcula-se o espectro em frequência correspondente ao sinal do passo *i* via FFT. O aumento do nível numa faixa particular de frequências detecta quando uma ressonância estrutural é excitada por uma falha (ex. $f_c = 4000$ Hz), conforme mostra a FIGURA 5.2b;
- iii) Aplica-se um filtro digital passa-banda no espectro obtido do passo *ii* ao redor da frequência de ressonância (ex. $f_c \pm 2f_d$). O espectro contém uma ressonância estrutural que pode ter sido excitada pelos impactos produzidos pela falha no rolamento, conforme mostra a FIGURA 5.2c;

- iv) Aplica-se a transformada inversa de Fourier no espectro FFT filtrado do passo *iii* obtendo-se um sinal reconstituído no tempo, que contém parte das frequências de ressonâncias que são moduladas pela frequência característica do defeito, conforme mostra a FIGURA 5.2d;
- v) O sinal obtido no passo *iv* é retificado por um detector analítico ou digital, produzindo o espectro do envelope do sinal que contém apenas as componentes de frequências de baixa modulação relacionadas com a frequência característica do defeito, conforme mostra a FIGURA 5.2e;
- vi) O espectro do envelope obtido no passo *v* é analisado em baixas frequências, a fim de se determinar a frequência característica do defeito f_d , conforme indicado na FIGURA 5.2f.

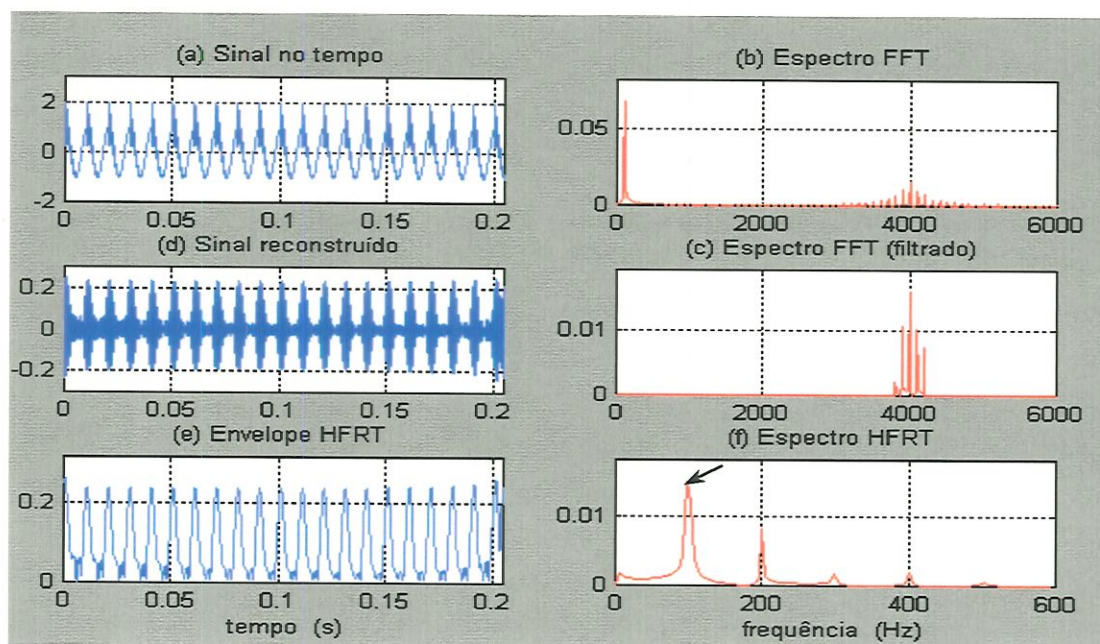


FIGURA 5.2 – Ilustração dos principais passos da técnica do envelope HFRT.

Observa-se que a escolha da faixa de frequência de filtragem mais adequada para a aplicação da técnica do envelope HFRT nem sempre é fácil de ser obtida na prática, e depende da habilidade do analista para detectá-la. MCFADDEN & SMITH (1984a) relatam que a largura da faixa de frequência de filtragem mais usada é de $\pm 5\%$ da frequência central f_c .

Parâmetros de Análise Conjunta Tempo-Frequência

Considera-se que os modelos de sinais de vibrações simulando falhas em rolamentos apresentam padrões característicos típicos de sinais com transientes de curta duração, resultantes dos impactos que ocorrem devido à passagem dos elementos rolantes sobre a falha. Neste caso o aumento progressivo do tamanho da falha resulta num aumento das amplitudes dos sinais, o que pode ser extrapolado para as distribuições tempo-frequência uma vez que estas representam o conteúdo de energia dos sinais.

Portanto, uma proposta neste sentido é a utilização de um parâmetro baseado na razão de picos, porém estendido o seu conceito para o plano tempo-frequência, ou seja:

$$T_{pic} = \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{\frac{1}{N_i} \sum_{m=1}^{N_i} A_m}, \quad (5.6)$$

onde: P_k são os valores das amplitudes de pico da distribuição no plano tempo-frequência, correspondentes aos impactos devido à falha;
 A_m são as amplitudes da distribuição tempo-frequência obtidas para as N_i janelas discretas no tempo, após aplicação do método PWVD;
 $n = T/T_d$ é o número de impactos contidos na janela de amostragem, onde o valor de T se refere à janela de análise escolhida e T_d é o período de repetição dos impactos.

Outro indicador proposto é o nível V_{rms} , que representa o nível x_{rms} dos picos da distribuição ao longo do eixo do tempo, obtidos a partir dos valores máximos dos espectros calculados para cada janela TFD.

Nas análises que se seguem, os parâmetros descritos até aqui serão utilizados como indicadores do desempenho das diversas técnicas adotadas. Considera-se que os mesmos poderão ser estendidos e aplicados aos sinais obtidos experimentalmente, conforme mostrado no capítulo seguinte.

5.3 SIMULAÇÃO NOS MODELOS DE FALHAS

Os resultados mostrados a seguir são baseados nos modelos matemáticos desenvolvidos no capítulo 3 utilizando os dados resumidos na TABELA 5.1. As amplitudes dos sinais simulados foram ajustadas por comparação aos valores medidos nos ensaios experimentais com falhas introduzidas artificialmente nas pistas de rolamentos de testes. Os programas desenvolvidos para simulação e processamento dos sinais, bem como suas representações gráficas foram implementados no ambiente MATLAB®, conforme descrição e esquema ilustrativo mostrado no Apêndice 3.

TABELA 5.1 - Parâmetros adotados para simulação nos modelos de falhas.

Terminologia	Parâmetros	Valor adotado
Número de pontos no tempo	N	4096
Faixa de análise em frequência	f_x	0 a 20 kHz
Número de linhas espectrais	$N_l = N / 2,56$	1600
Resolução em frequência	$\Delta f = f_x / N_l$	12,5 Hz
Período de análise no tempo	$T = 1 / \Delta f$	0,08 s
Número de pontos da janela PWVD	n_{win}	64
Intervalo de discretização	$dt = T / N$	1,95e-5 s
Frequência de rotação do eixo	f_s	25 Hz
Período de rotação do eixo	$T_s = 1 / f_s$	0,04 s
Freq. de defeito na pista externa	$f_e = 4,20 f_s$	105,00 Hz
Período de defeito na pista externa	$T_e = 1 / f_e$	9,52e-3 s
Freq. de defeito na pista interna	$f_i = 6,79 f_s$	169,75 Hz
Período de defeito na pista interna	$T_i = 1 / f_i$	5,89e-3 s
Frequência central de ressonância	f_c	1300 Hz
Parâmetro de amortecimento	α	500 s ⁻¹

Falha na Pista Externa

O modelo de sinal de vibração gerada por uma falha na pista externa de rolamentos segue o modelo descrito pelas equações 3.13 a 3.15, e depende de alguns parâmetros para o cálculo das frequências características de defeitos, conforme descritos pelas equações 3.6, 3.8, 3.10 e 3.12. Utilizando-se os parâmetros adotados na TABELA 5.1, que também serão aplicados nos ensaios realizados experimentalmente para efeito de comparação com os modelos teóricos, obtém-se os sinais de referência no tempo e em frequência, conforme mostra a FIGURA 5.3. Analisando-se o sinal no tempo observa-se a forma e a periodicidade com que os impactos ocorrem, representando a passagem das esferas sobre a falha. O período de análise $T = 0,08\text{ s}$ corresponde a duas rotações, resultando em quatro impactos por rotação. Na análise espectral via FFT, mostrada apenas até 5 kHz (“zoom”), destacam-se a frequência central de ressonância f_c e as linhas espectrais igualmente espaçadas da frequência característica do defeito $f_d = 1/T_d$.

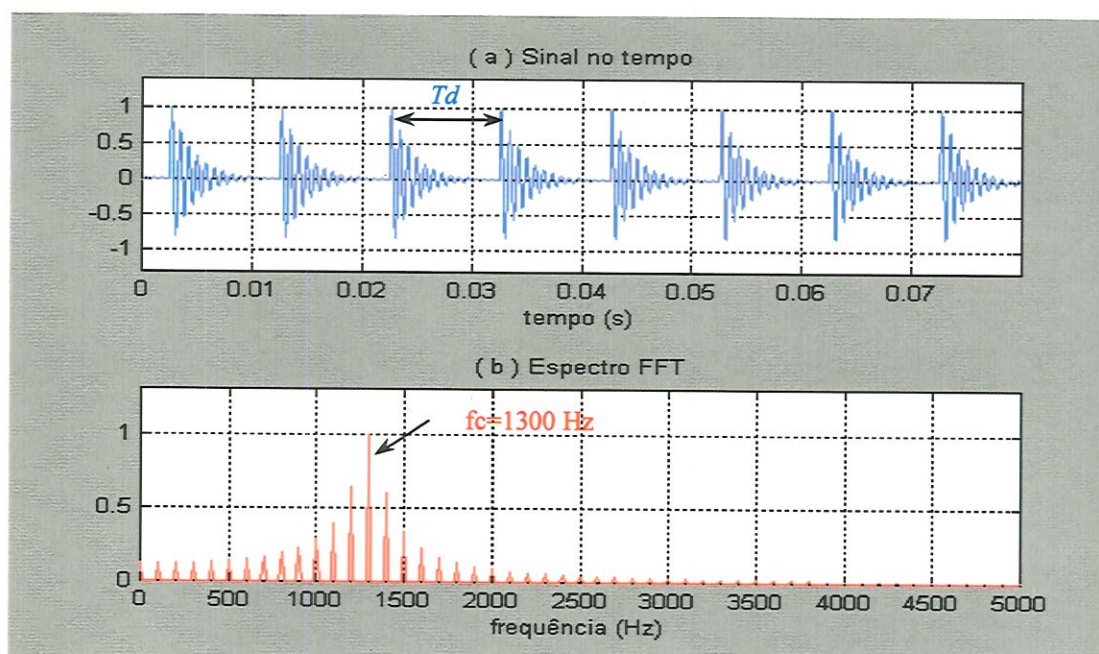


FIGURA 5.3 - Falha na pista externa: sinais de vibração de referência.

Análise no Domínio do Tempo

Inicialmente serão investigados alguns parâmetros de análise no domínio do tempo, através da simulação de oito condições de falhas crescentes. Estas condições foram correlacionadas com alguns estágios de desenvolvimento de falhas em rolamentos, conforme explicado mais adiante no capítulo referente aos resultados experimentais. A primeira representa a condição de um rolamento novo e perfeito enquanto que a última representa um estágio de falha mais avançado com tamanho da falha equivalente a uma área de $3,0 \text{ mm}^2$, valor máximo adotado nos ensaios com falhas introduzidas artificialmente nos rolamentos de testes. A partir da geração de sinais do tipo ruído aleatório representando o rolamento em bom estado (c1), são adicionados a estes porcentagens em amplitudes crescentes dos sinais de referência, de modo a permitir uma análise mais realística dos fenômenos envolvidos. A FIGURA 5.4 mostra os sinais simulados no tempo, onde visualiza-se o efeito do aumento da relação sinal-ruído (SNR) em termos de amplitudes *rms* para as diversas condições de falhas adotadas.

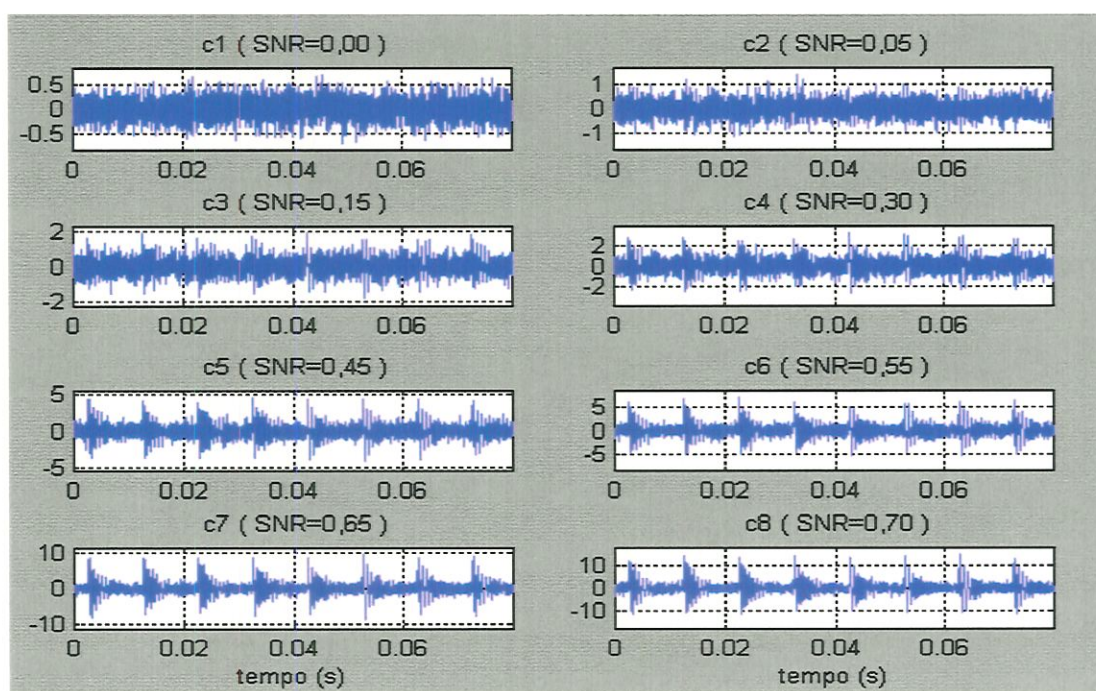


FIGURA 5.4 - Falha na pista externa: sinais simulados no tempo.

A TABELA 5.2 e a FIGURA 5.5 mostram o comportamento dos parâmetros no domínio do tempo para as diversas condições de falhas simuladas, onde observa-se que todos os indicadores no gráfico foram normalizados.

TABELA 5.2 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo.

condição	Xrms	Xpic	Fator Fc	Curtose Kt	Fator K
c1	0.1980	0.7468	3.7725	2.8703	0.5682
c2	0.3211	1.2018	3.7424	3.1307	1.0054
c3	0.4703	2.0547	4.3688	3.3607	1.5806
c4	0.7011	3.2358	4.6151	4.1690	2.9230
c5	1.0376	4.6997	4.5293	4.8577	5.0404
c6	1.4185	6.8848	4.8534	5.5298	7.8443
c7	2.1302	9.9560	4.6738	6.2530	13.3201
c8	3.1099	13.5769	4.3657	6.4538	20.0705

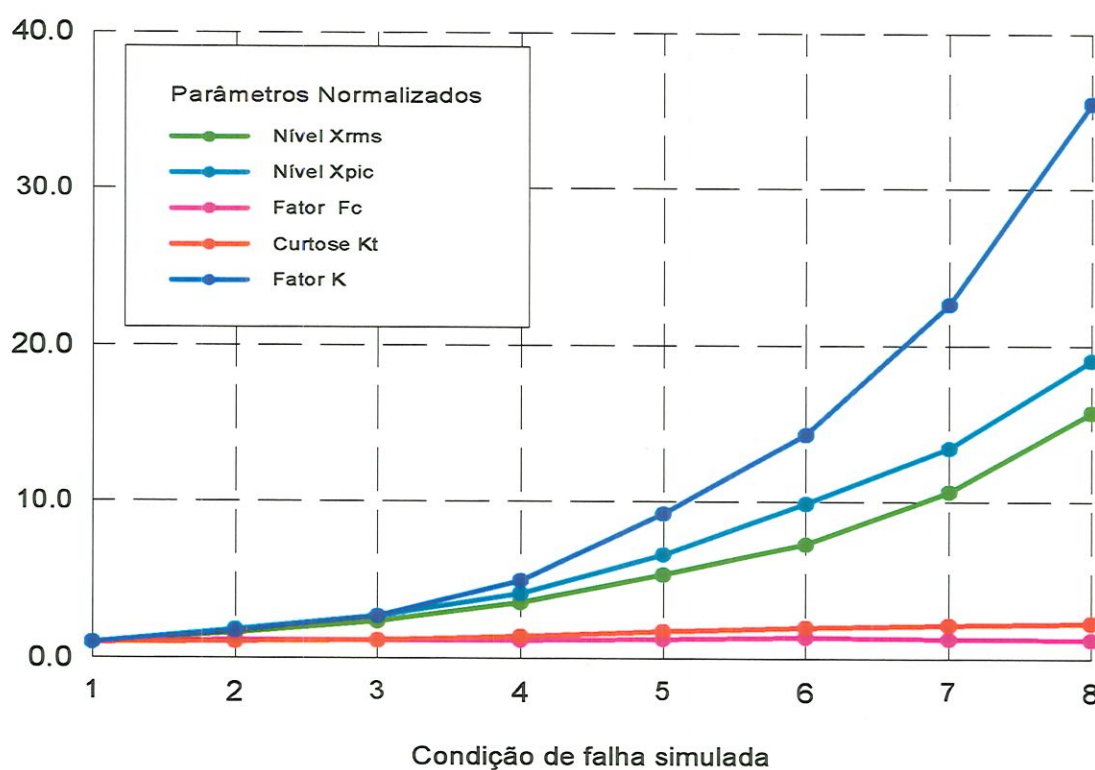


FIGURA 5.5 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo.

Analisando o gráfico da FIGURA 5.5, cujos parâmetros foram normalizados para evidenciar mais as suas variações relativas, observa-se que o fator de curtose K_t apresentou pequenas variações não permitindo distinguir o crescimento da falha. Também o fator de crista F_c se manteve praticamente invariável na maioria das condições simuladas, mostrando-se pouco sensível como indicador de falhas. O nível x_{rms} apesar de mostrar valores sempre crescentes, apresenta variação suave, dificultando a detecção da falha. Por outro lado, o valor de pico x_{pic} e o fator K se mostraram mais consistentes por apresentarem maior sensibilidade em todas as condições, o que sugere serem bons indicadores de crescimento de falhas. Entretanto, observa-se que estes parâmetros apenas alertam para uma condição de crescimento da falha, mas não possibilitam a sua localização.

Análise no Domínio da Frequência

A FIGURA 5.6 mostra os principais passos seguidos para obtenção do espectro do envelope HFRT do sinal simulado para uma condição de falha incipiente (c2), considerada como de difícil detecção pelos métodos de análise no tempo. Nota-se que mesmo para uma condição de falha incipiente, onde o sinal está bastante contaminado com ruído, já é possível visualizar o primeiro pico relacionado com a frequência característica do defeito f_d identificada em 100 Hz, o que demonstra o potencial desta técnica.

A FIGURA 5.7 mostra os espectros FFT e HFRT obtidos para algumas condições de falhas crescentes, calculados a partir dos sinais simulados no tempo. Através dos espectros obtidos diretamente via FFT e utilizando a faixa de filtragem em torno de $f_c = 1300 \pm 2f_d$ Hz, é possível visualizar a separação entre as linhas do espectro correspondente à frequência característica do defeito f_d , embora seja difícil de tirar conclusões devido à grande densidade espectral em torno da frequência de ressonância. Já os espectros obtidos pela técnica do envelope HFRT tornam a análise bastante simples, especialmente devido ao fato da demodulação permitir a análise em baixas frequências.

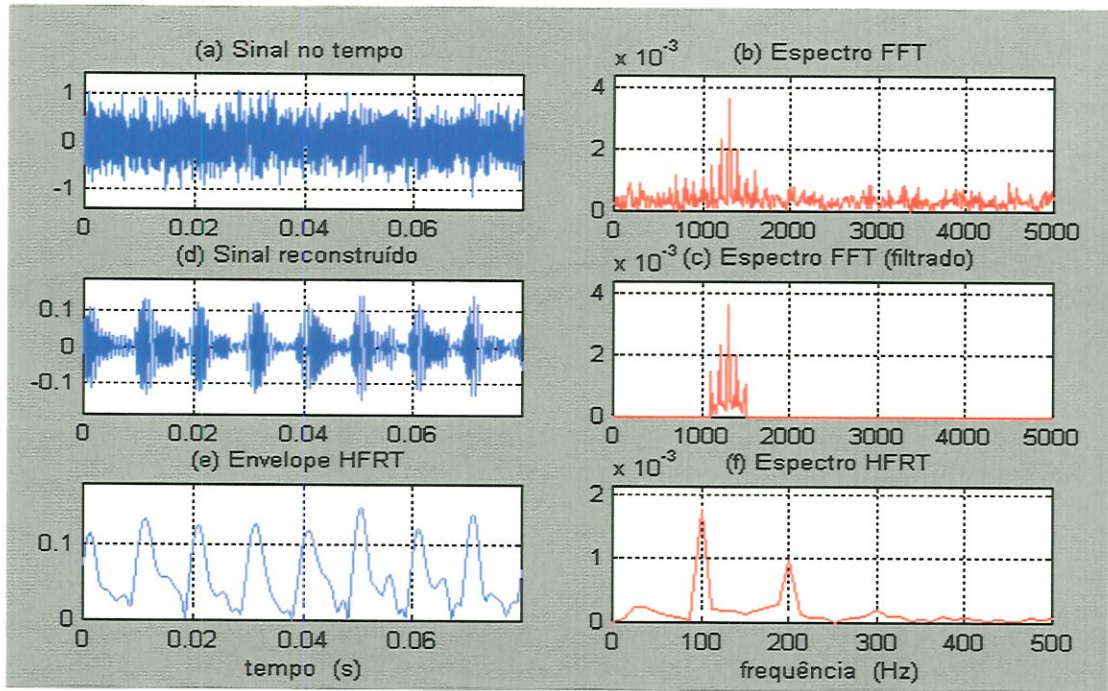


FIGURA 5.6 – Aplicação da técnica do envelope HFRT (c2).

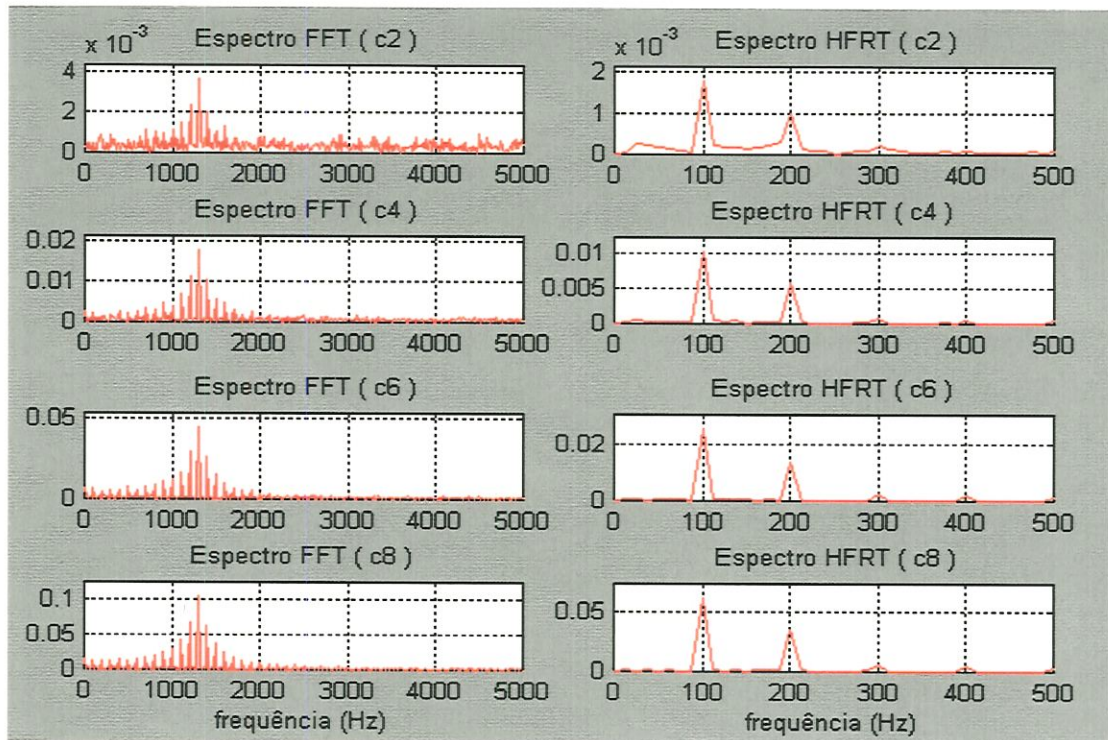


FIGURA 5.7 - Espectros FFT e HFRT de sinais em frequência.

A TABELA 5.3 e a FIGURA 5.8 mostram o comportamento dos parâmetros no domínio da frequência através da razão de picos R_{pic} , em relação aos parâmetros obtidos no domínio do tempo.

TABELA 5.3 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo e na frequência.

condição	Xrms	Xpic	Curtose Kt	Fator K	Rpic HFRT
c1	0.1980	0.7468	2.8703	0.5682	3.1501
c2	0.3211	1.2018	3.1307	1.0054	13.5532
c3	0.4703	2.0547	3.3607	1.5806	19.8333
c4	0.7011	3.2358	4.1690	2.9230	20.3568
c5	1.0376	4.6997	4.8577	5.0404	21.7915
c6	1.4185	6.8848	5.5298	7.8443	22.2725
c7	2.1302	9.9560	6.2530	13.3201	23.3740
c8	3.1099	13.5769	6.4538	20.0705	23.0333

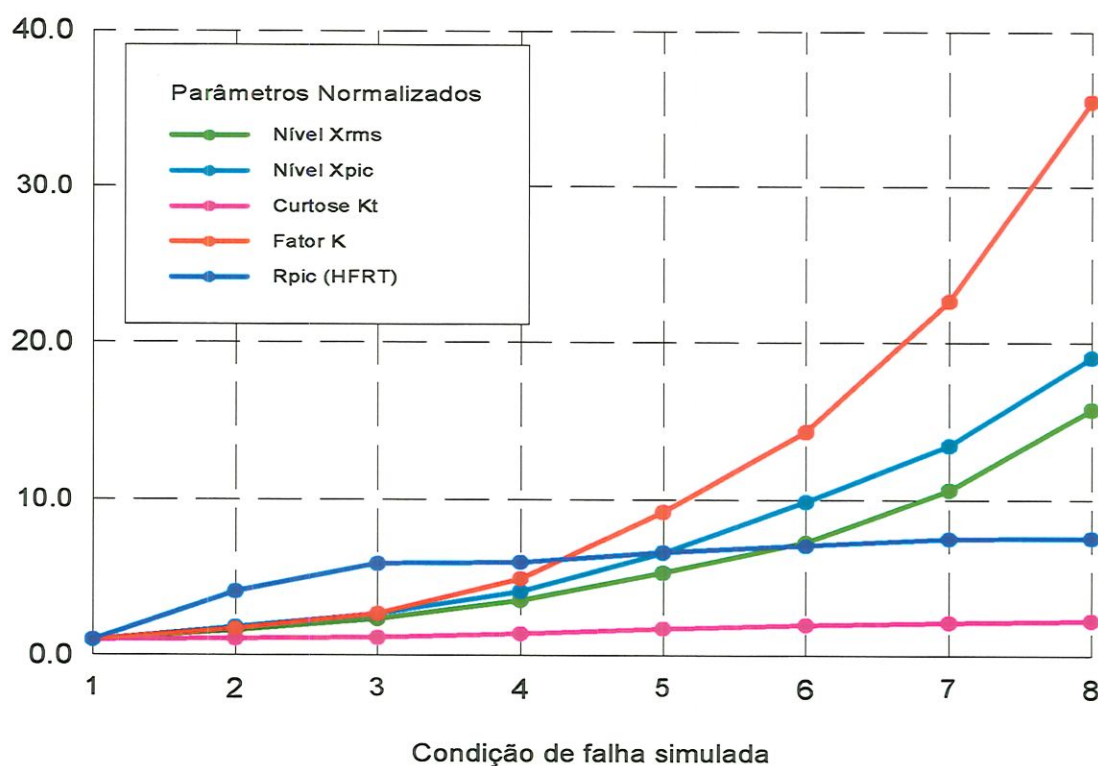


FIGURA 5.8 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo e na frequência.

Para o gráfico da FIGURA 5.8 verifica-se que o parâmetro da razão de picos R_{pic} obtido do espectro do envelope HFRT apresenta uma mudança sensível já a partir da condição c2, com variação significativa em relação aos demais parâmetros. Isto demonstra a boa sensibilidade deste parâmetro para condições de falhas incipientes. Porém, a partir da condição c4, ocorre uma tendência de estabilização dos valores R_{pic} o que demonstra uma limitação do método para condições de falhas mais severas. Nestes casos a técnica do envelope HFRT não indica crescimento da falha efetivamente. Dentre os parâmetros x_{rms} , x_{pic} , K_t e K os valores x_{pic} e K apresentaram boa sensibilidade para todas as condições, embora o nível x_{rms} e o fator de curtose K_t tenham se mostrado sempre crescentes. Convém ressaltar que, nesta análise, o fator de crista não foi considerado, devido ao mau desempenho observado na análise anterior.

Análise Conjunta Tempo-Frequência

A partir das análises realizadas nos domínios do tempo e da frequência simulando diversas condições de falhas na pista externa em rolamentos, cujos modelos apresentam características do tipo estacionárias e invariantes no tempo, verifica-se que alguns dos parâmetros investigados aplicados de forma individual ou combinada já permitem uma boa estimativa do tamanho e da localização da falha. Entretanto, visando-se aplicar os conceitos dos métodos de análise conjunta tempo-frequência para detecção de falhas em rolamentos procura-se investigar os modelos de falhas através da distribuição Pseudo-Wigner-Ville (PWVD), apresentada formalmente no capítulo 4, através da equação 4.52, desenvolvida na forma discreta.

As FIGURAS 5.9 a 5.16 mostram as representações conjuntas tempo-frequência através dos mapas PWVD obtidos para o modelo de falha na pista externa a partir de oito condições de falhas simuladas no tempo. Observa-se que os sinais no tempo foram gerados com 4096 pontos e escolhida a largura de janela com $n_{win} = 64$ pontos discretos para aplicação das TFDs. Enquanto a

janela de tempo foi totalmente representada (0 a 0,08 s), apenas a faixa de frequências entre 0 e 5 kHz foi mostrada em “zoom”, embora as distribuições tenham sido calculadas para toda faixa de análise (0 a 20 kHz). A partir destas figuras observa-se que a estrutura típica dos mapas PWVD é caracterizada por oito concentrações de energia na direção do eixo de tempo, representadas por manchas alongadas do tipo “spots” regularmente espaçadas pelo período de repetição dos impactos devido à falha $T_d = 1/f_d$. Por outro lado, estas concentrações estão localizadas numa faixa de frequências coincidente com a região de maior densidade espectral, em torno da frequência de ressonância adotada $f_c = 1300$ Hz.

Como na condição c1 a relação sinal-ruído é praticamente nula, observa-se que a estrutura resultante do mapa PWVD não é bem definida, apresentando manchas distribuídas de forma aleatória no plano tempo-frequência. Entretanto, para uma condição de falha incipiente (c2) já é possível visualizar a estrutura típica do modelo de falha na pista externa. Neste caso, embora o sinal simulado no tempo apresente grande porcentagem de ruído em relação ao sinal de referência, a sua representação tempo-frequência já permite a identificação da frequência característica do defeito a partir da relação $f_d = 1/T_d$, onde T_d é a medida entre dois picos consecutivos no eixo de tempo. Portanto, mesmo para baixas relações sinal-ruído as representações PWVD se mostram eficientes.

Quanto às figuras obtidas para as demais condições de falhas (c3 a c8), nota-se uma maior definição dos contornos resultantes dos impactos devido à falha, junto com o aumento das amplitudes de picos em relação à amplitude média da distribuição. Observa-se também que a faixa onde ocorre maior concentração espectral se situa entre 800 e 1800 Hz, embora não seja possível destacar a separação entre as linhas espectrais que definem a frequência característica do defeito, conforme mostram os espectros FFT. Isto ocorre devido à escolha do tamanho da janela de análise. É um problema de resolução, isto é, quando procura-se melhorar a resolução no tempo para evidenciar a repetição dos impactos gerados pela falha, perde-se informações no domínio da frequência.

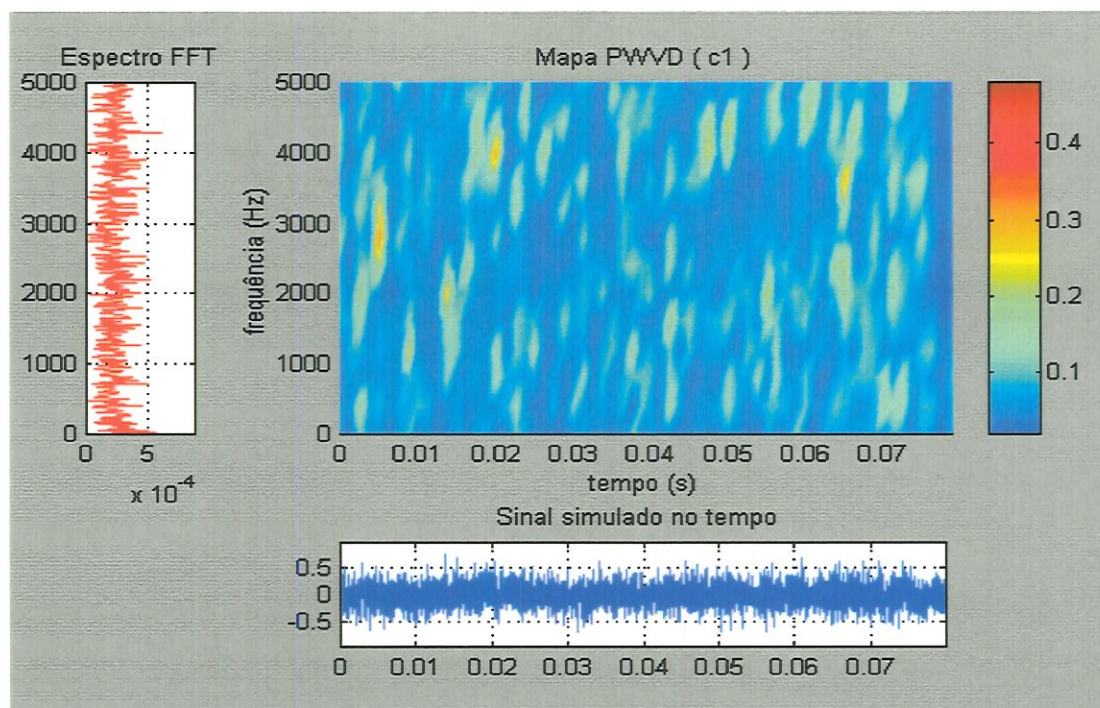


FIGURA 5.9 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c1.

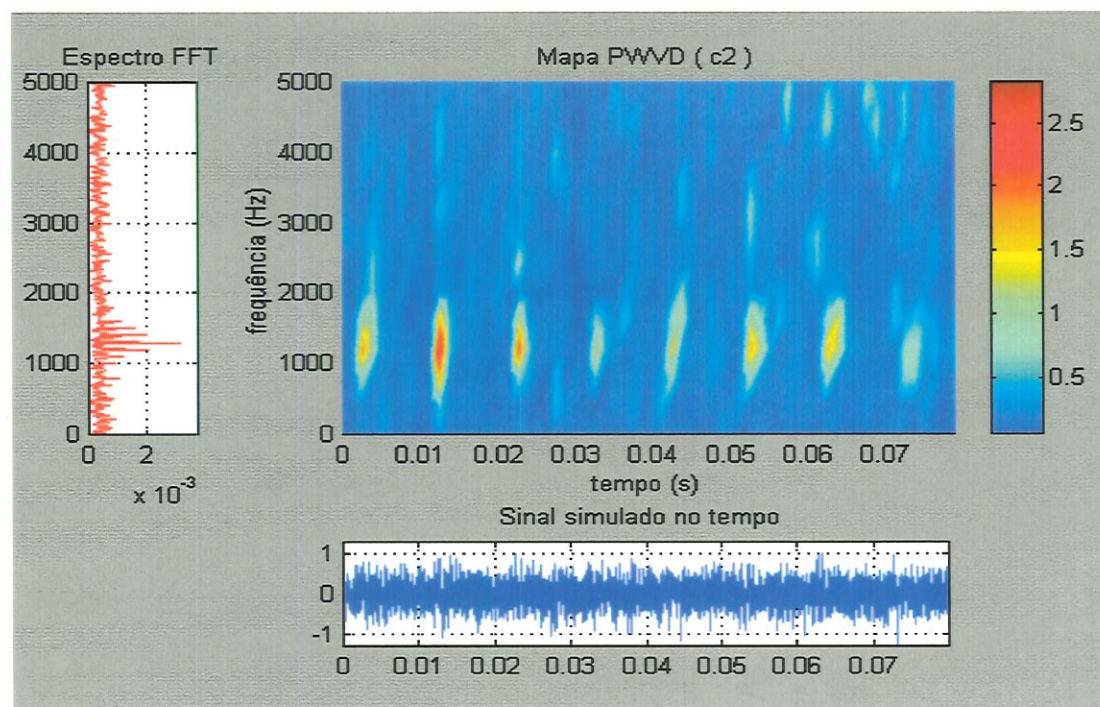


FIGURA 5.10 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c2.

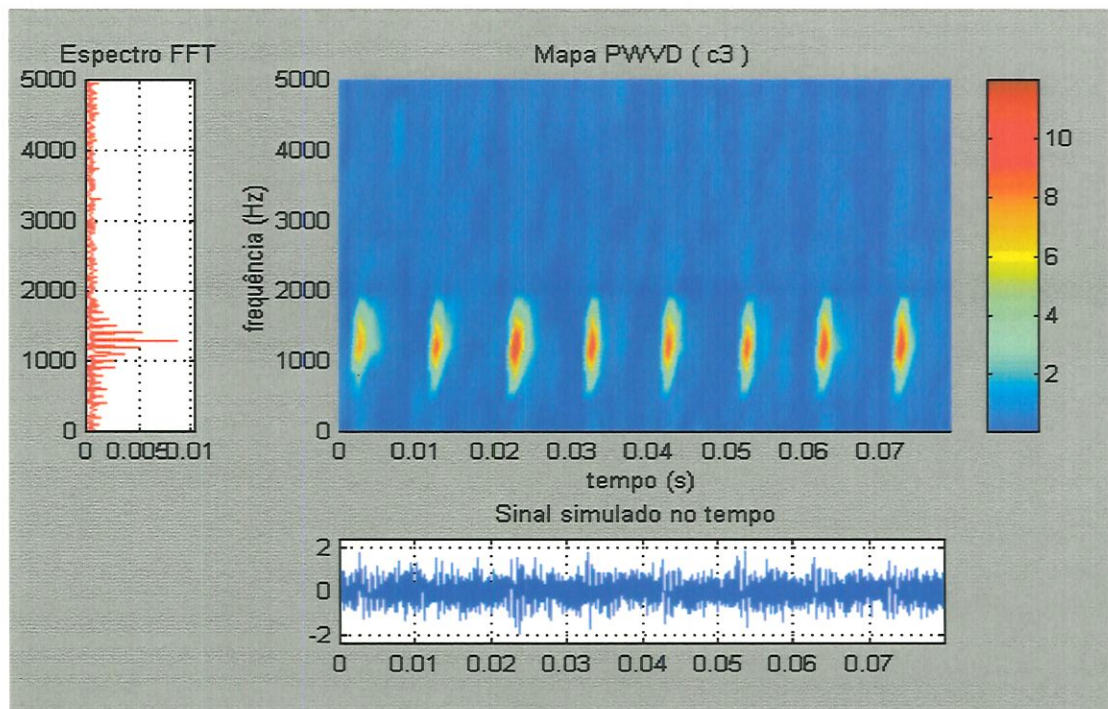


FIGURA 5.11 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c3.

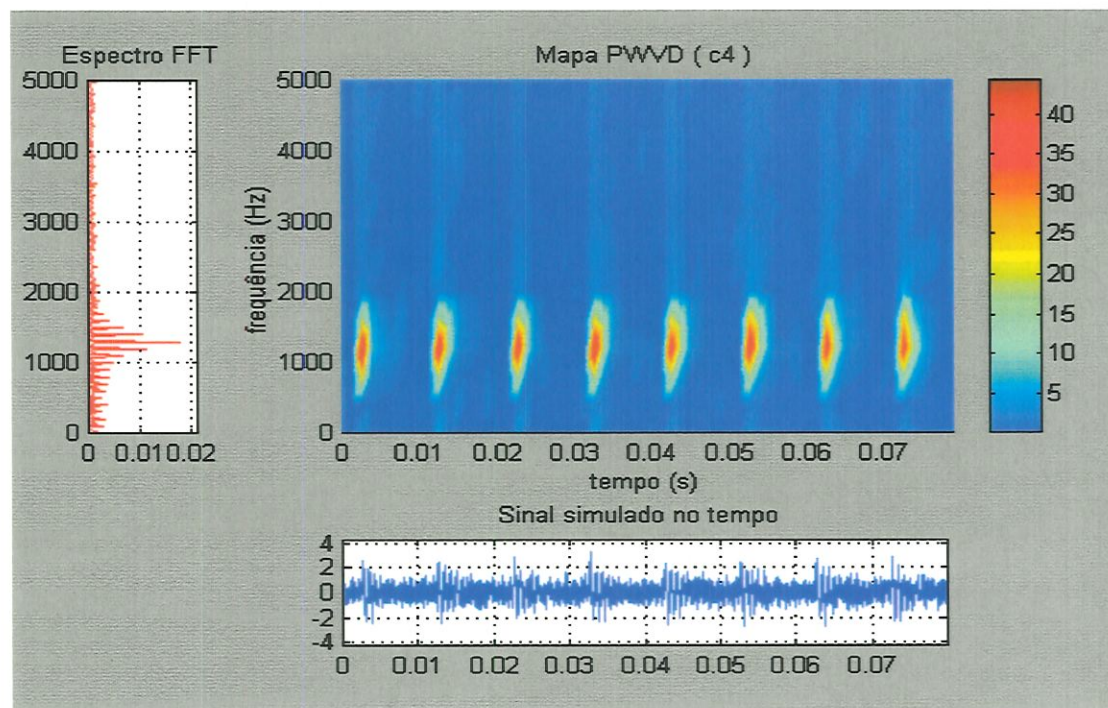


FIGURA 5.12 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c4.

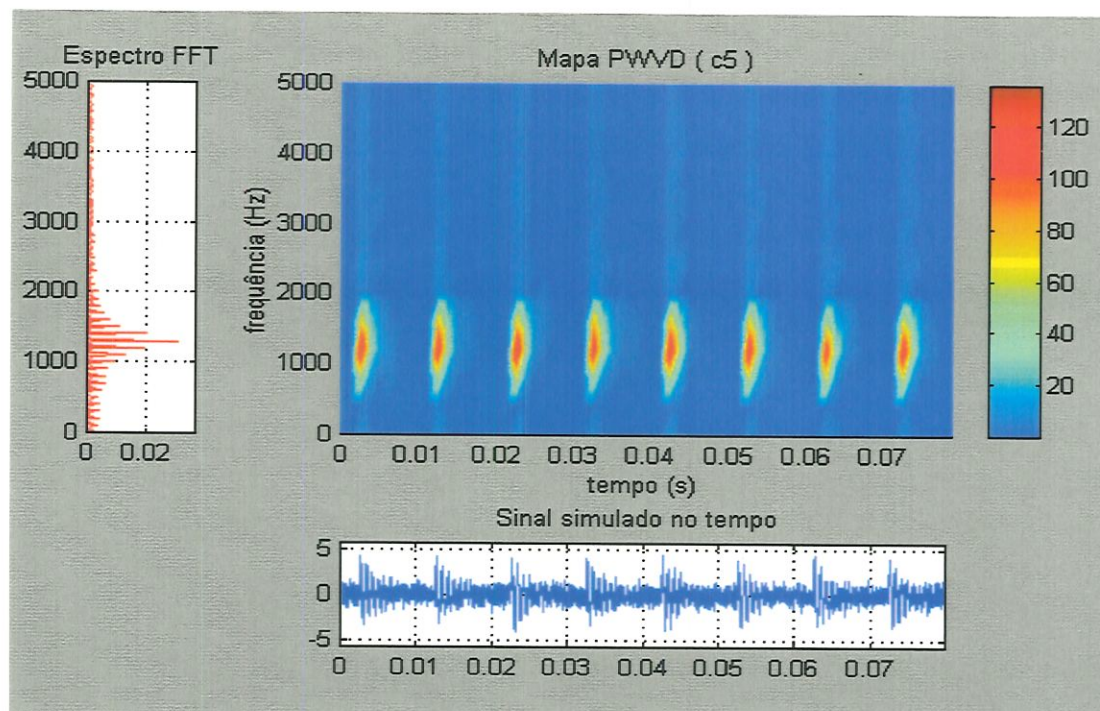


FIGURA 5.13 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c5.

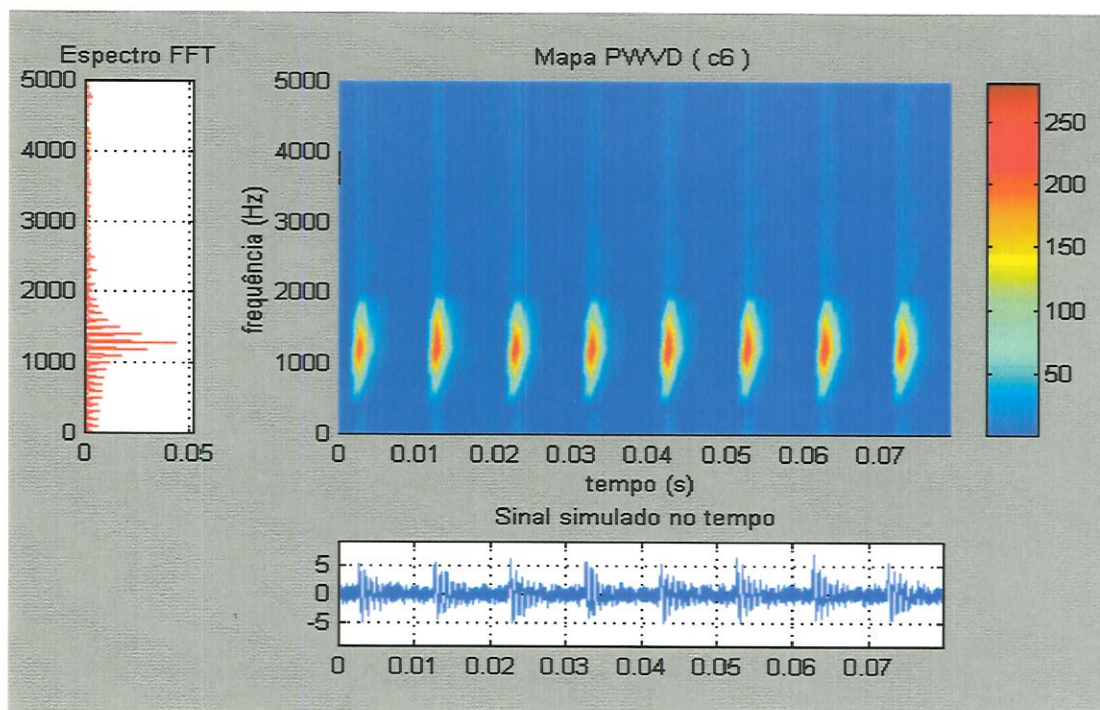


FIGURA 5.14 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c6.

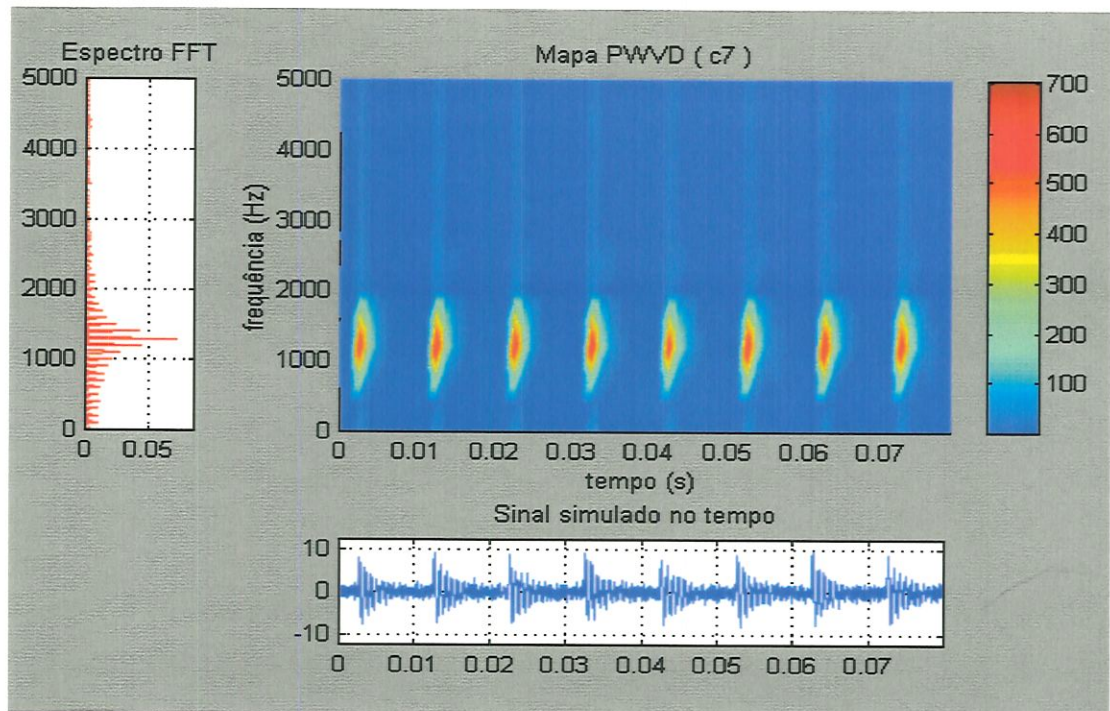


FIGURA 5.15 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c7.

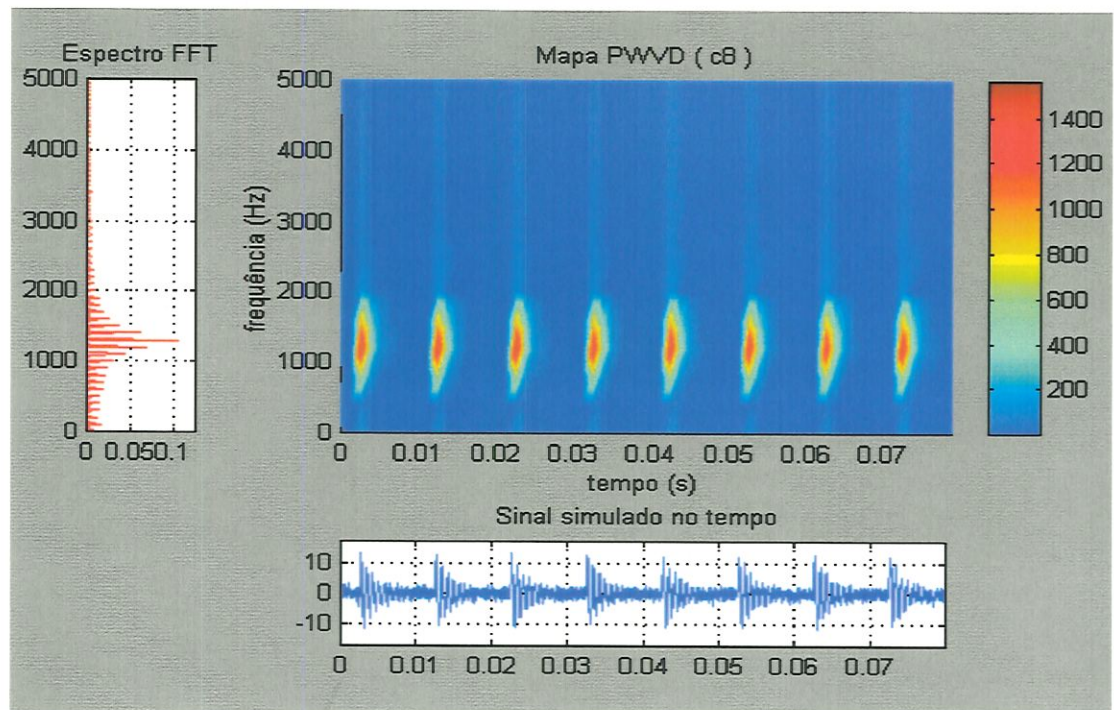


FIGURA 5.16 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c8.

A TABELA 5.4 e a FIGURA 5.17 mostram o comportamento geral dos parâmetros obtidos para o modelo de falha na pista externa, onde o método PWVD é comparado com outros parâmetros de análise.

TABELA 5.4 - Falha na pista externa: comparação de parâmetros.

condição	Xrms	Xpic	Fator K	Rpic HFRT	Tpic PWVD
c1	0.1971	0.6819	0.5580	3.1621	19.3213
c2	0.3158	1.2378	0.9530	12.9246	86.5584
c3	0.4616	1.8111	1.4845	18.5702	222.4672
c4	0.6938	2.7879	2.7404	18.8755	335.9551
c5	1.0440	4.4921	5.1435	20.9159	470.9112
c6	1.4291	6.7288	7.9742	22.3114	546.9328
c7	2.0967	9.1537	12.6408	23.7591	604.5330
c8	3.0994	12.9902	19.8056	23.9099	641.9884

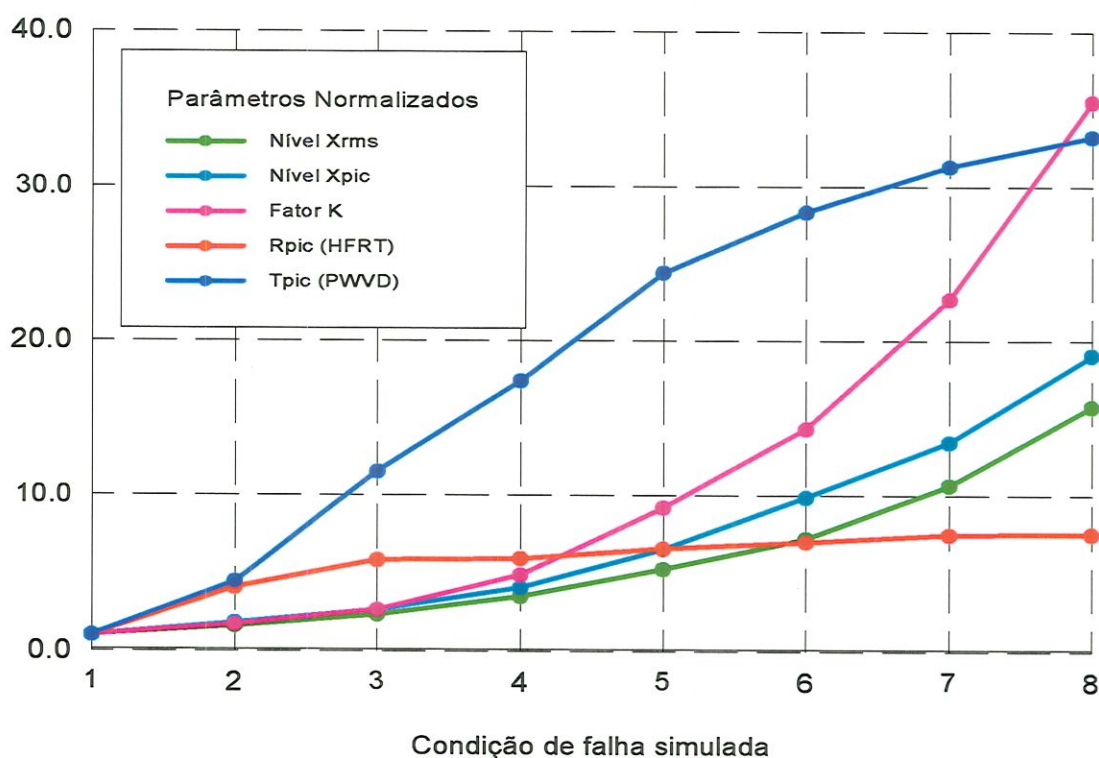


FIGURA 5.17 - Falha na pista externa: comparação de parâmetros.

Analisando-se o gráfico da FIGURA 5.17 observa-se que embora o fator K tenha apresentado um crescimento relativo significativo em condições de falhas mais severas, este não permite a detecção de falhas incipientes devido à pequena variação deste parâmetro nestas condições (c2 e c3). Quanto à razão de picos R_{pic} obtida pela técnica do envelope HFRT, esta só se mostra sensível para as condições de falhas incipientes, porém em seguida tende a se tornar estável para as demais condições. Por outro lado, a razão de picos T_{pic} obtida pela representação PWVD apresentou boa sensibilidade para a maioria das condições adotadas, o que mostra a sua superioridade em relação aos demais parâmetros investigados. Portanto, através dos mapas PWVD é possível obter a frequência característica do defeito que define o tipo de falha no rolamento, bem como fazer um diagnóstico sobre a extensão da falha através do crescimento relativo de suas amplitudes.

Falha na Pista Interna

O modelo de sinal de vibração adotado para simulação de falha na pista interna de rolamentos segue o procedimento descrito por MCFADDEN & SMITH (1984b), conforme desenvolvimento feito no capítulo 3 (equações 3.22 a 3.30). Este modelo apresenta uma interpretação mais complexa que o modelo de falha na pista externa. Como a pista interna é rotativa e a falha gira junto com a pista na frequência de rotação do eixo, surge o fenômeno de modulação devido ao carregamento e ao meio de transmissão.

A FIGURA 5.18 mostra os sinais de vibração de referência obtidos para o modelo de falha na pista interna, para as hipóteses de carga radial e de velocidade de rotação constante, utilizando-se os dados da TABELA 5.1. Analisando o sinal no tempo, observa-se dois impactos principais consecutivos representando a passagem das esferas sobre a zona de carga máxima, separados pelo período de rotação $T_s = 1/f_s$. Dentro de cada modulação, verifica-se dois impactos secundários cuja frequência de ocorrência corresponde à frequência característica do defeito $f_d = 1/T_d$.

Com relação ao espectro FFT obtido nota-se que além do aumento da densidade espectral em torno da frequência central de ressonância f_c , surgem lóbulos laterais mistos resultantes da modulação, espaçados pela frequência característica do defeito f_d .

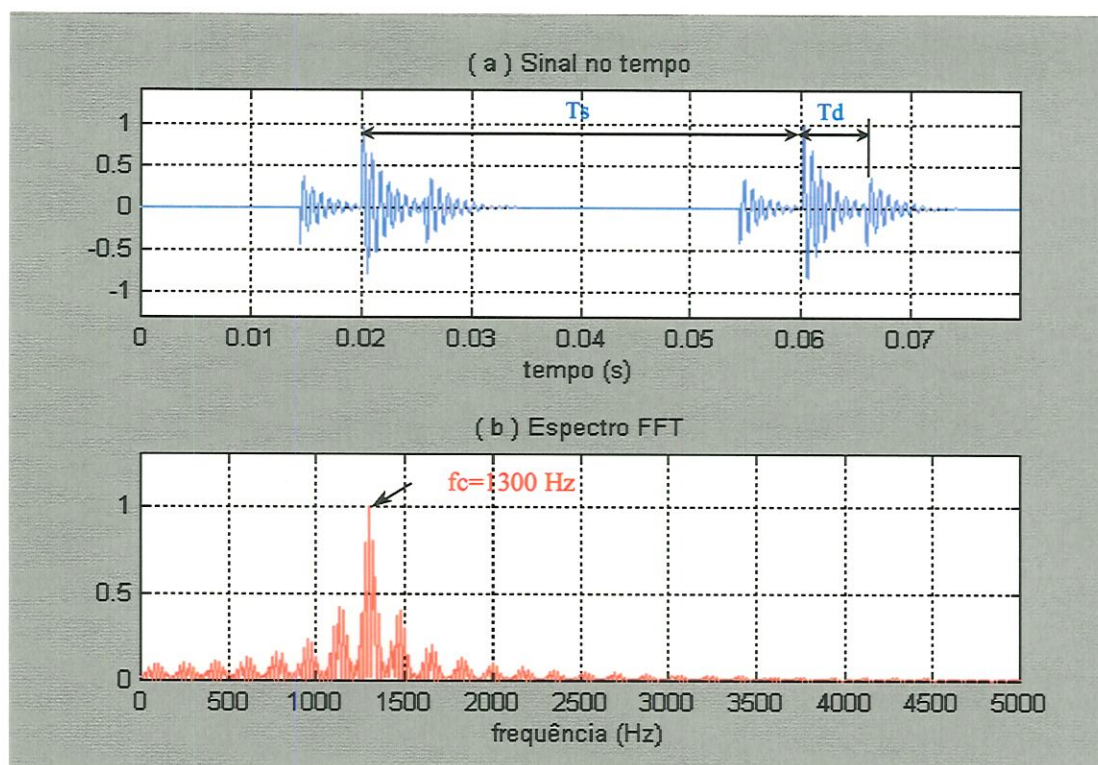


FIGURA 5.18 - Falha na pista interna: sinais de vibração de referência.

Análise no Domínio do Tempo

Conforme procedimento já adotado, inicialmente serão investigadas algumas características no domínio do tempo dos sinais de vibração gerados, visando mostrar detalhes que irão facilitar as análises posteriores. A FIGURA 5.19 mostra os sinais simulados no domínio do tempo para o modelo de falha na pista interna, onde observa-se o aumento progressivo da relação sinal-ruído (SNR) em termos de amplitudes *rms* para os diversos estágios ou condições de falha.

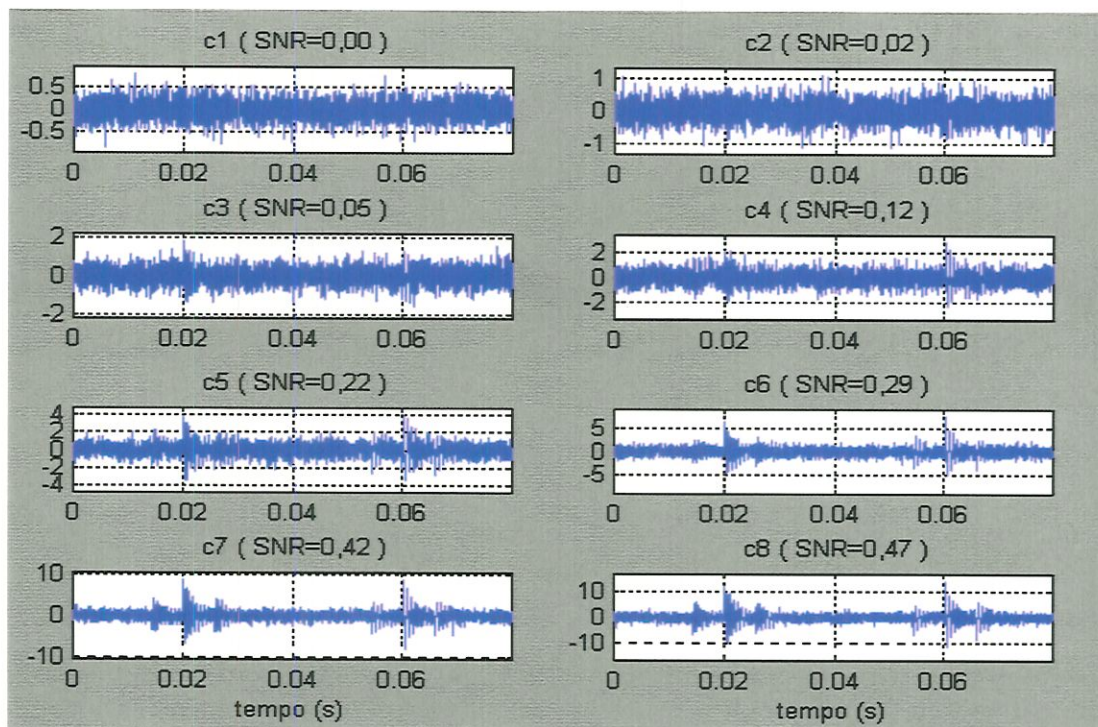


FIGURA 5.19 - Falha na pista interna: sinais simulados no tempo.

Comparando-se os valores das relações sinal-ruído (SNR) da FIGURA 5.19 com os da FIGURA 5.4 para o modelo de falha na pista externa, observa-se que o efeito do ruído se mostra mais acentuado neste novo modelo, especialmente entre as modulações, o que pode resultar em dificuldades para identificação da frequência característica do defeito.

A TABELA 5.5 e a FIGURA 5.20 mostram o comportamento dos parâmetros no domínio do tempo. Observa-se que a variação global do nível x_{rms} diminuiu em relação aos resultados obtidos da TABELA 5.2. Este fato pode ser atribuído à localização da falha na pista rotativa que reduz o número de impactos por rotação. Enquanto para o modelo de falha na pista externa ocorrem quatro impactos por rotação, neste modelo verifica-se apenas um impacto por rotação. Por outro lado, os valores de curtose K_t e do fator de crista F_c se mostraram um pouco mais sensíveis, sendo que o fator de curtose se mostrou mais eficiente que o fator de crista para todas as condições. Portanto, os parâmetros F_c e K_t no modelo de falha na pista interna se

mostraram mais sensíveis que no modelo de falha na pista externa. Com relação aos parâmetros x_{pic} e K estes se mostram eficientes e indicam efetivamente o crescimento da falha, embora não permitam a sua localização.

TABELA 5.5 – Falha na pista interna: parâmetros no tempo.

condição	Xrms	Xpic	Fator Fc	Curtose Kt	Fator K
c1	0.1992	0.7996	4.0147	3.0134	0.6002
c2	0.3064	1.0722	3.4987	3.0008	0.9196
c3	0.4038	1.5717	3.8921	3.3328	1.3459
c4	0.5720	2.4534	4.2892	3.8286	2.1899
c5	0.7745	4.0164	5.1860	4.9515	3.8348
c6	0.9768	6.1567	6.3030	6.6612	6.5067
c7	1.3777	8.2674	6.0007	8.4556	11.6496
c8	1.9235	13.1502	6.8365	10.7477	20.6735

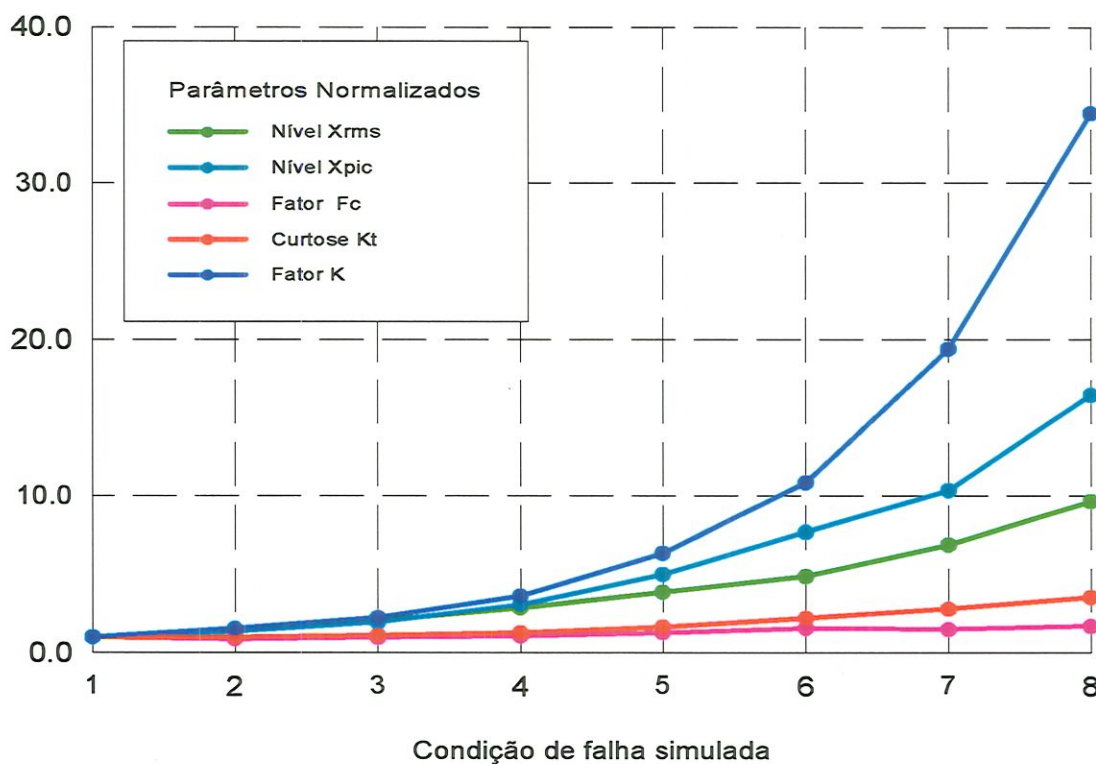


FIGURA 5.20 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo.

Análise no Domínio da Frequência

A FIGURA 5.21 mostra os espectros FFT e HFRT obtidos para algumas condições de falhas simuladas. Nota-se que apesar dos espectros do envelope HFRT apresentarem linhas espectrais adicionais relativas ao fenômeno de modulação, são ainda bem mais fáceis de serem analisados que os espectros obtidos diretamente via FFT. Comparando-se os espectros HFRT dos dois modelos através das FIGURAS 5.7 e 5.21, observa-se que o padrão obtido para o modelo de falha na pista interna se apresenta mais complexo, com maior densidade espectral. O primeiro pico corresponde à frequência de rotação $f_s = 25$ Hz, enquanto que a frequência característica do defeito f_d fica localizada na região central do lóbulo secundário, conforme indicado pela seta, o que pode dificultar a sua análise. Além disso, as amplitudes de picos nesta região são inferiores às do pico principal.

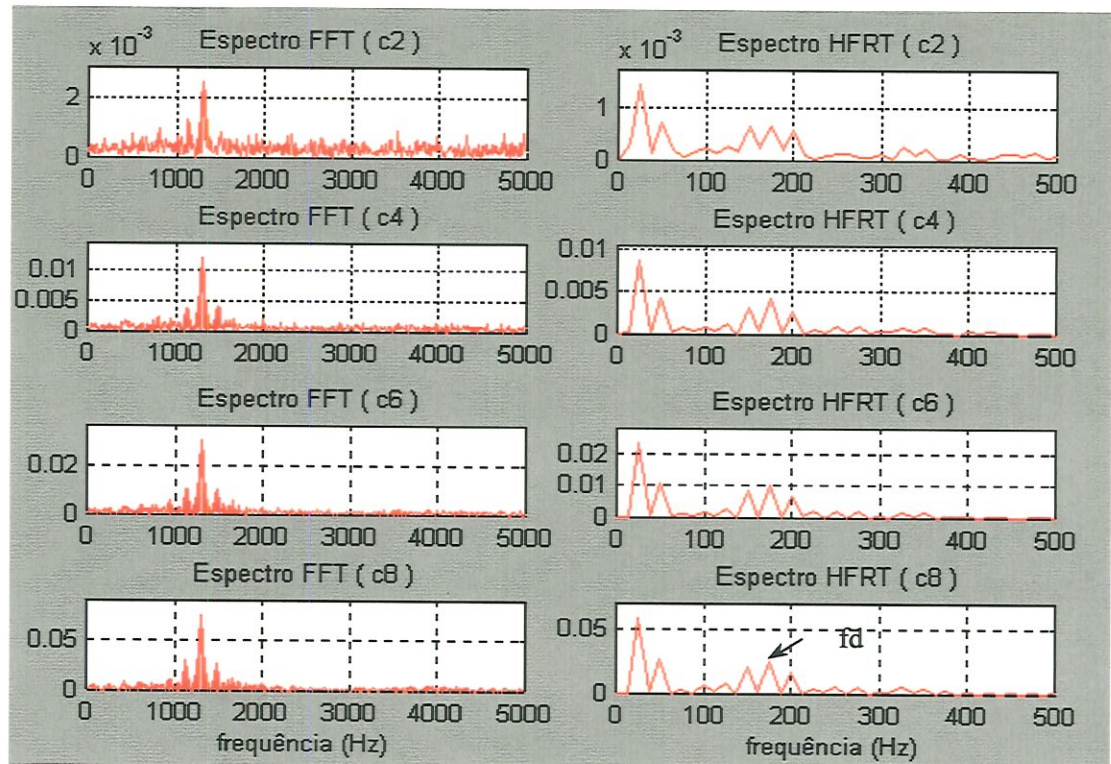


FIGURA 5.21 - Espectros FFT e HFRT de sinais em frequência.

A TABELA 5.6 e a FIGURA 5.22 mostram o comportamento dos parâmetros obtidos no domínio da frequência, em relação a alguns parâmetros no domínio do tempo.

TABELA 5.6 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo e na frequência.

condição	Xrms	Xpic	Curtose Kt	Fator K	Rpic HFRT
c1	0.1992	0.7996	3.0134	0.6002	2.8656
c2	0.3064	1.0722	3.0008	0.9196	2.9523
c3	0.4038	1.5717	3.3328	1.3459	4.5281
c4	0.5720	2.4534	3.8286	2.1899	4.3232
c5	0.7745	4.0164	4.9515	3.8348	4.9895
c6	0.9768	6.1567	6.6612	6.5067	4.7658
c7	1.3777	8.2674	8.4556	11.6496	5.1971
c8	1.9235	13.1502	10.7477	20.6735	5.6386

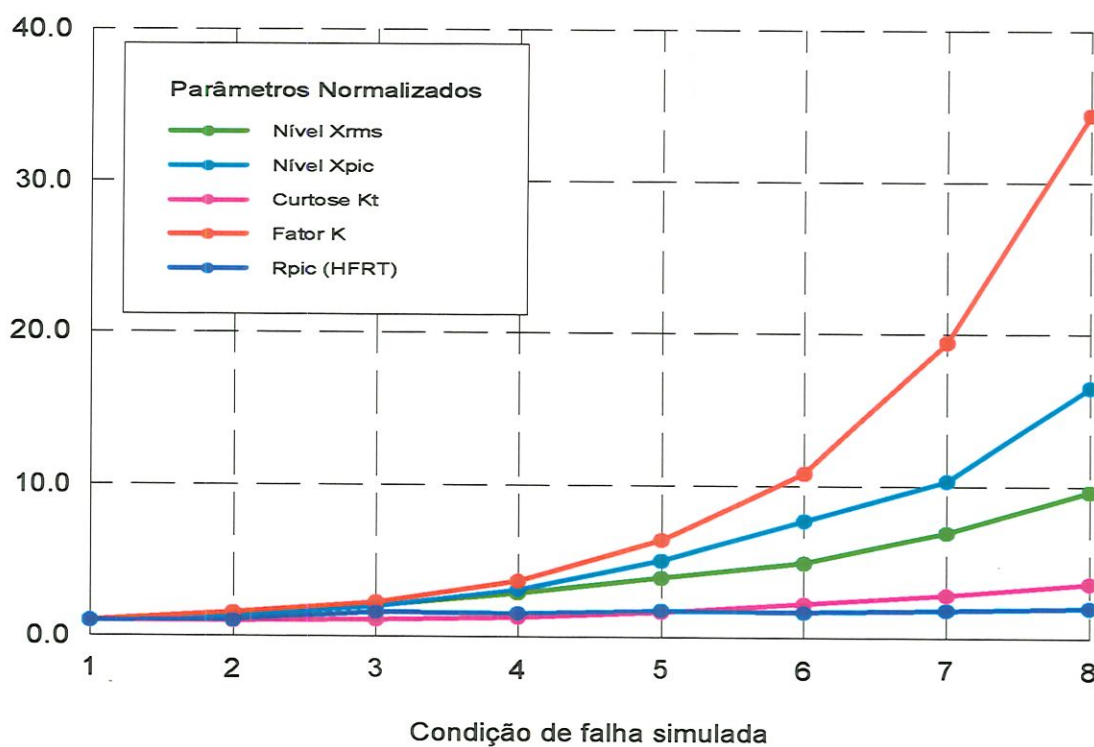


FIGURA 5.22 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo e na frequência.

Comparando-se os indicadores da FIGURA 5.22, verifica-se que a razão de picos R_{pic} apresentou baixa sensibilidade para detecção de crescimento da falha neste modelo. Este fato pode ser explicado devido ao problema da existência de picos no espectro do envelope HFRT que não são múltiplos da frequência característica do defeito, somado ao aumento da amplitude média do espectro. Também a faixa de análise escolhida de 0 a 20 kHz resultou numa baixa resolução em frequência ($\Delta f = 12,5$ Hz), o que pode ter dificultado a análise pela técnica do envelope HFRT.

Análise Conjunta Tempo-Frequência

As FIGURAS 5.23 a 5.30 mostram as representações conjuntas tempo-frequência através dos mapas PWVD obtidos para o modelo de falha na pista interna a partir de oito condições de falhas simuladas no tempo. Observa-se que os sinais no tempo foram normalizados para evidenciar mais os impactos secundários. A partir destas figuras pode-se deduzir que a estrutura típica dos mapas PWVD é caracterizada por duas concentrações principais de energia, sendo que cada uma destas apresenta um pico principal e dois picos secundários. Enquanto a separação entre os picos principais está relacionada com o período de rotação do eixo, a separação entre um pico principal e outro secundário determina o período dos impactos relacionados com a falha $T_d = 1/f_d$. Novamente, estas concentrações ficam localizadas na faixa de frequências coincidente com a região que apresenta maior densidade espectral, em torno da frequência de ressonância adotada $f_c = 1300$ Hz.

Na condição de falha incipiente (c2) observa-se ainda o efeito do ruído presente no plano tempo-frequência, embora já fique evidente as concentrações de energia relacionadas com os impactos principais devido à falha. Nas demais condições visualiza-se duas concentrações principais de energia, onde os impactos principais são mostrados mais nitidamente, junto com os impactos secundários, visualizados como manchas em tons de azul claro, permitindo o cálculo da frequência característica do defeito.

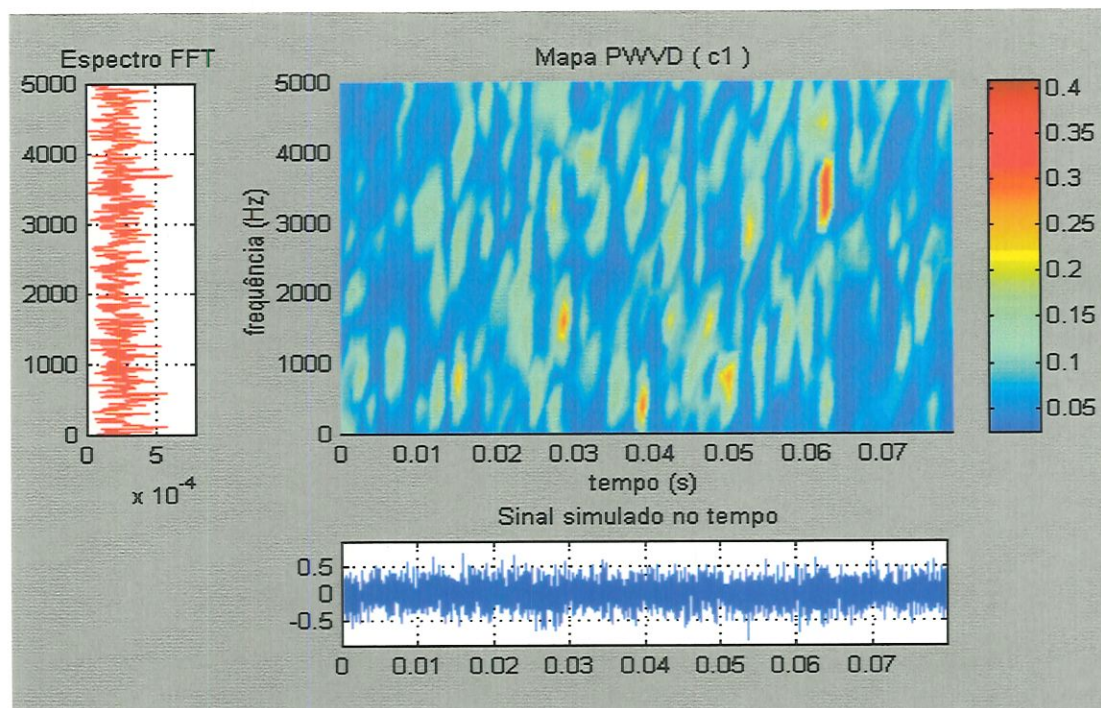


FIGURA 5.23 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c1.

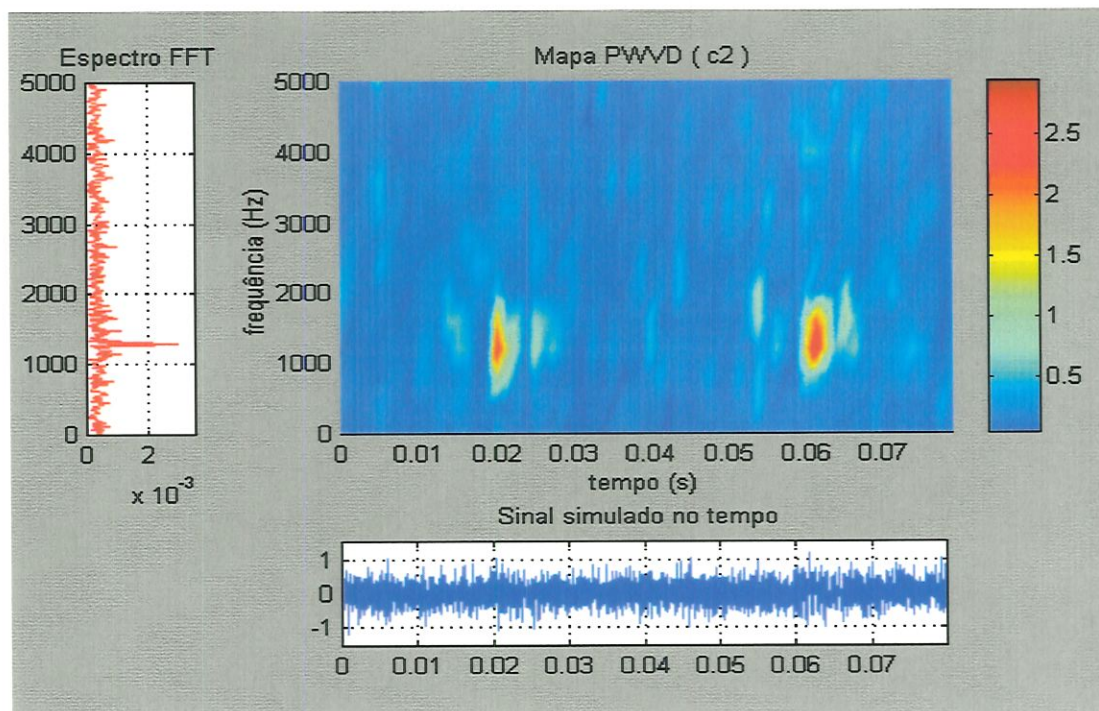


FIGURA 5.24 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c2.

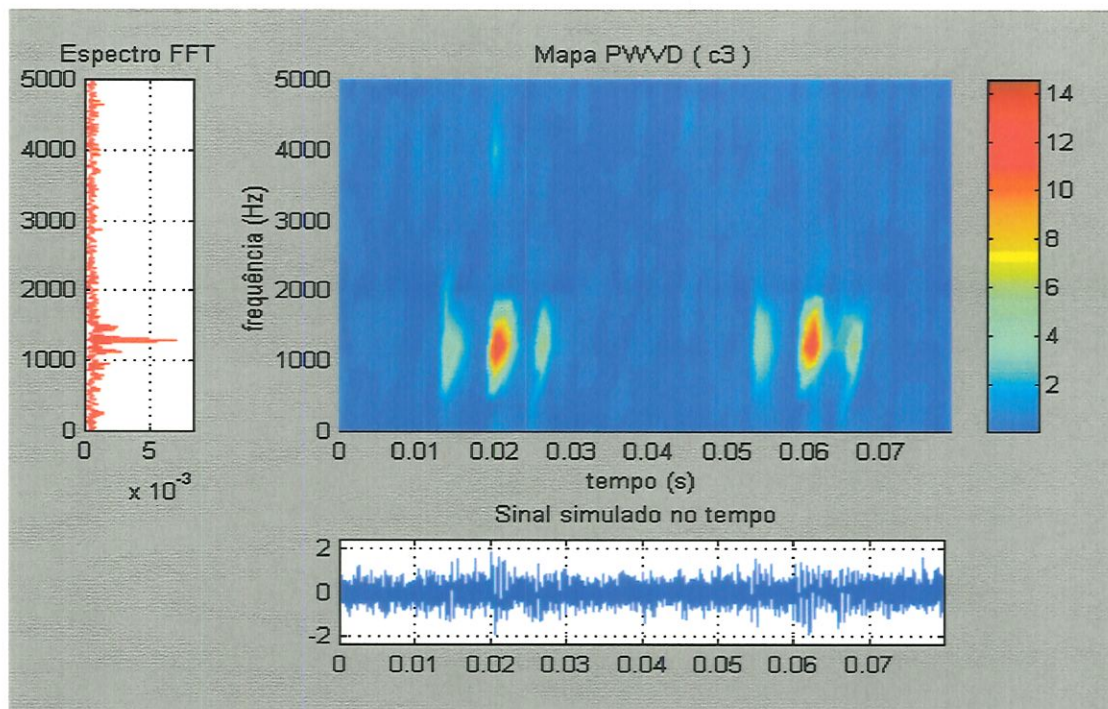


FIGURA 5.25 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c3.

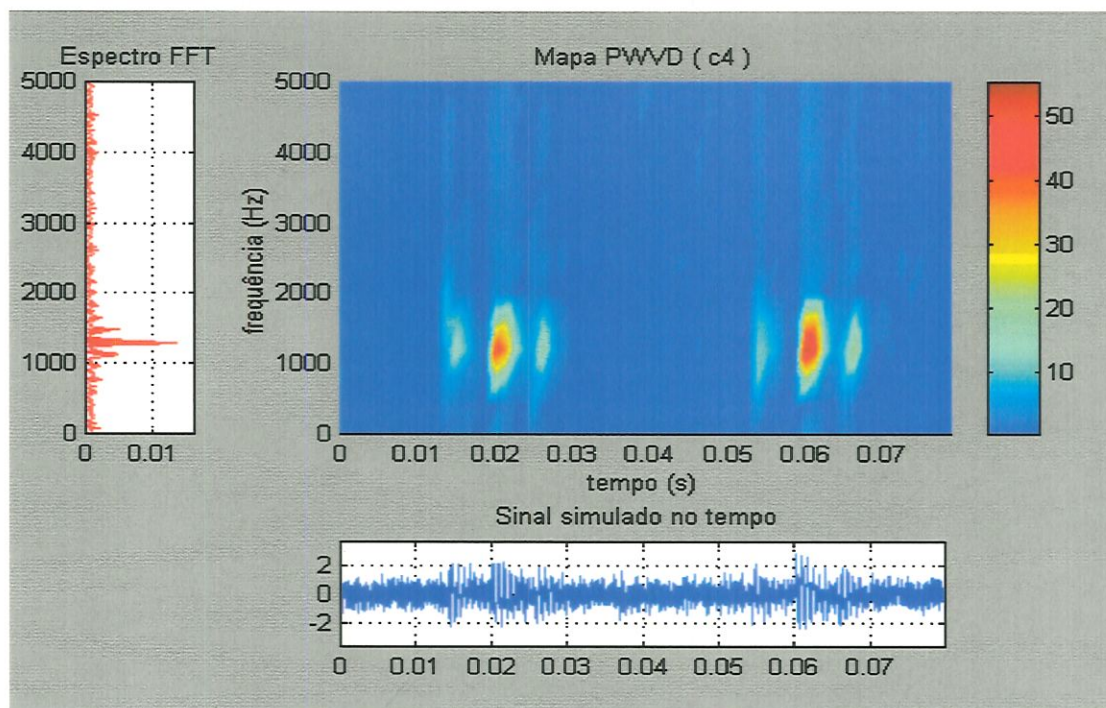


FIGURA 5.26 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c4.

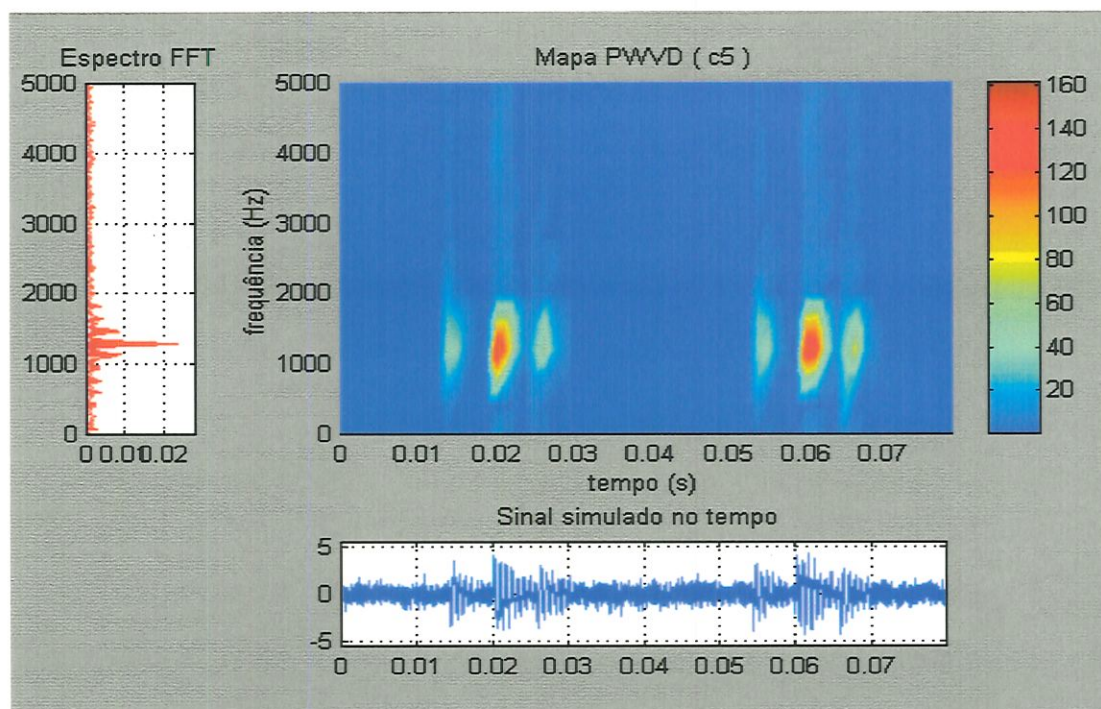


FIGURA 5.27 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c5.

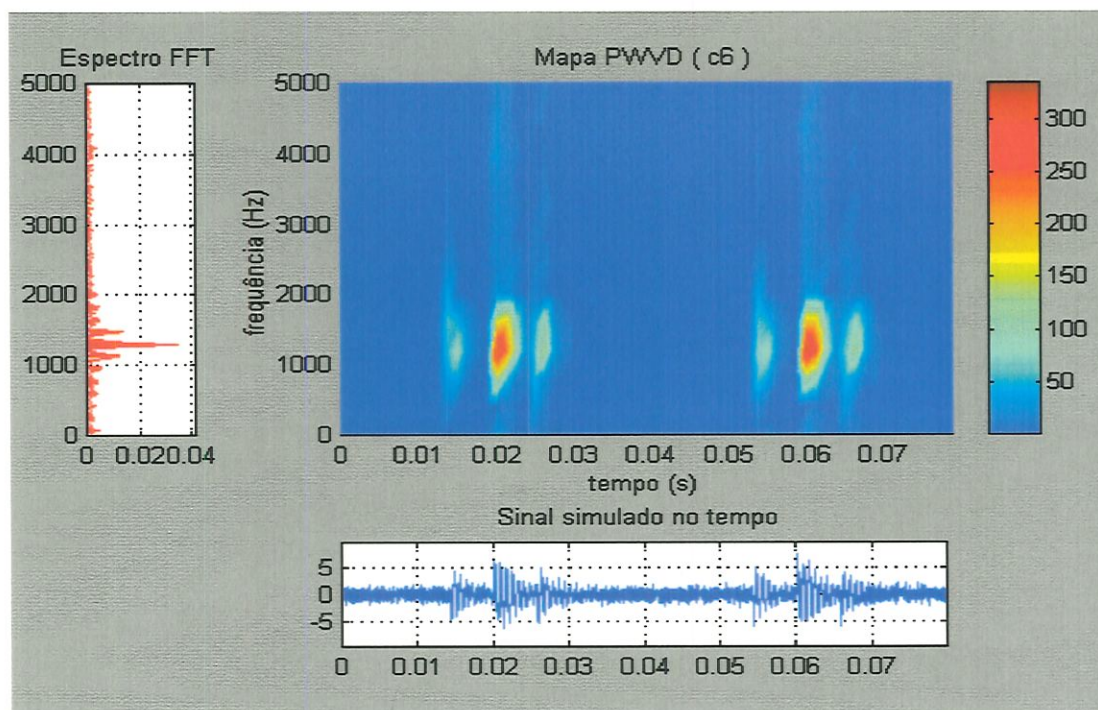


FIGURA 5.28 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c6.

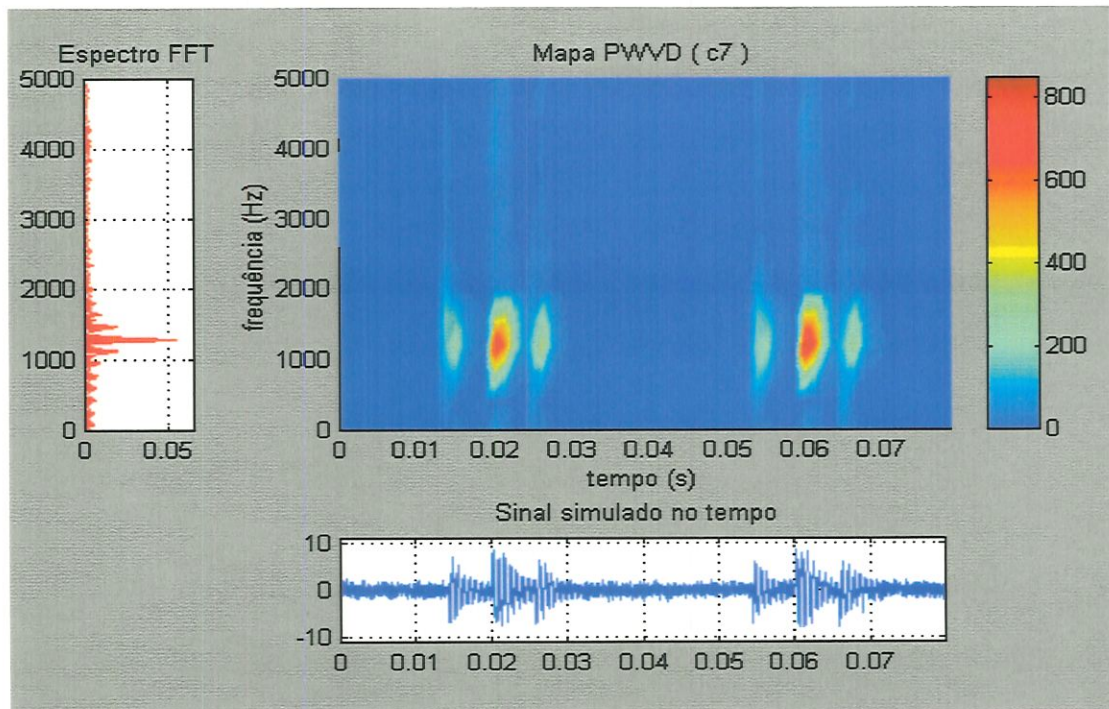


FIGURA 5.29 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c7.

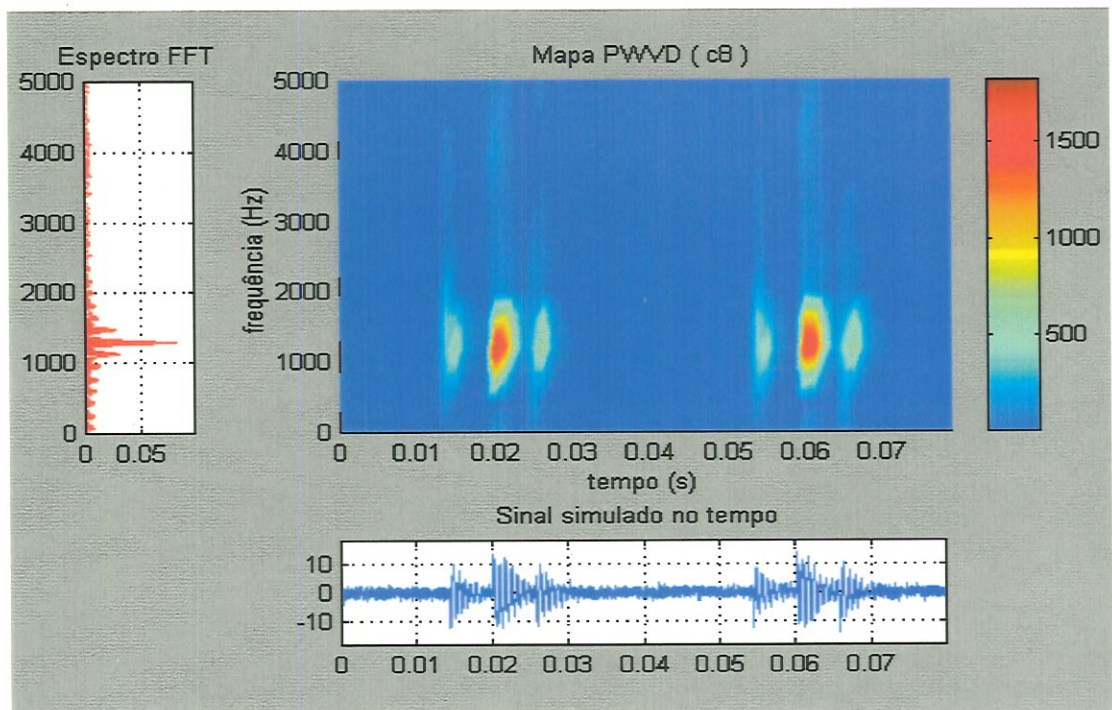


FIGURA 5.30 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c8.

A TABELA 5.7 e a FIGURA 5.31 mostram o comportamento geral dos parâmetros obtidos para o modelo de falha na pista interna, onde o método PWVD é comparado com outros parâmetros de análise.

TABELA 5.7 – Falha na pista interna: comparação de parâmetros.

condição	Xrms	Xpic	Fator K	Rpic HFRT	Tpic PWVD
c1	0.1992	0.7996	0.6002	2.8656	17.4691
c2	0.3064	1.0722	0.9196	2.9523	24.9266
c3	0.4038	1.5717	1.3459	4.5281	77.9985
c4	0.5720	2.4534	2.1899	4.3232	141.3889
c5	0.7745	4.0164	3.8348	4.9895	229.3326
c6	0.9768	6.1567	6.5067	4.7658	309.5245
c7	1.3777	8.2674	11.6496	5.1971	410.1834
c8	1.9235	13.1502	20.673	5.6386	481.4749

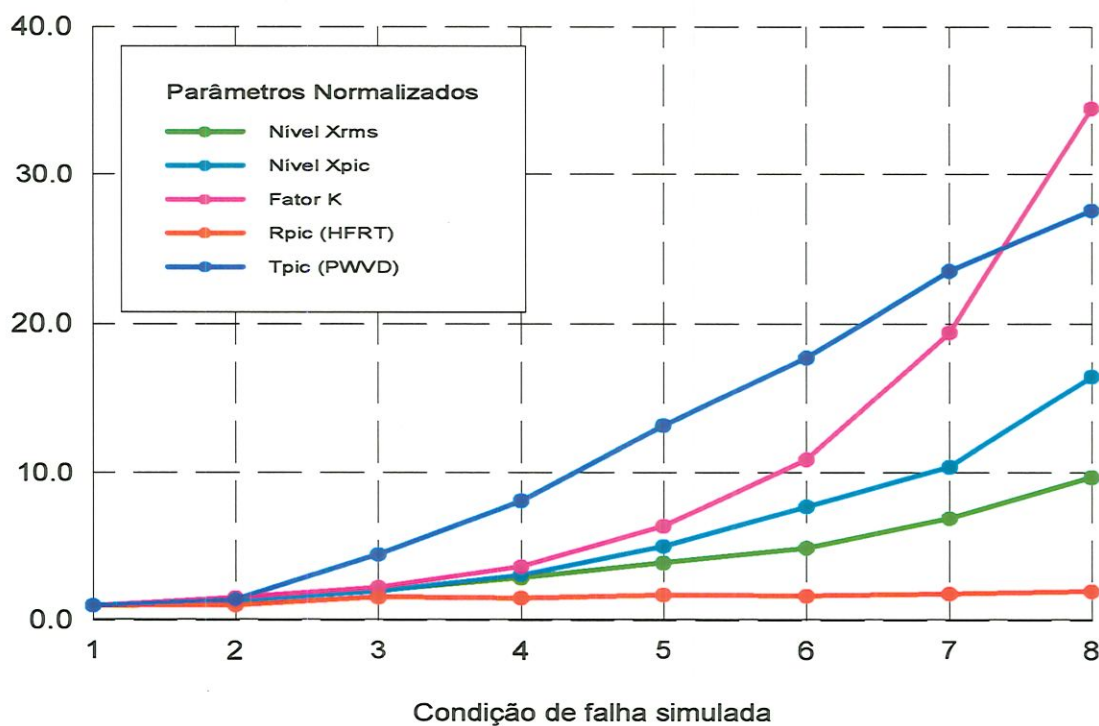


FIGURA 5.31 - Falha na pista interna: comparação de parâmetros.

Analisando os parâmetros mostrados na FIGURA 5.31, verifica-se que o parâmetro da razão de picos T_{pic} obtido através das representações PWVD já apresenta variação sensível a partir da condição c3, e continua sempre crescente, com variação relativa superior ao do fator K para a maioria das condições adotadas. Isto comprova que o método PWVD é uma ferramenta de detecção de crescimento de falha bastante eficiente também para o modelo de falha na pista interna. Por outro lado, a razão de picos R_{pic} obtida através do espectro do envelope HFRT não se mostrou eficiente como indicador de crescimento de falha para este modelo, devido à relação entre as amplitudes de picos relacionadas com a frequência característica do defeito e a amplitude média do espectro do envelope HFRT não apresentar variações sensíveis. Este fato pode ser considerado como mais uma limitação da técnica do envelope.

Falhas Combinadas nas Pistas Externa e Interna

Os modelos de sinais de vibração adotados para simulação de falhas nas pistas externa e interna, com rolamentos, foram analisados até aqui de forma isolada, visando-se uma familiarização com os diversos fenômenos envolvidos e com as dificuldades de análise. Entretanto, nas situações reais é comum o surgimento da falha numa das pistas seguida de sua extensão para a outra pista ou para os elementos rolantes. Neste caso o sinal de vibração apresenta uma interpretação mais complexa e as técnicas de análise usuais nem sempre conseguem detectar estas falhas corretamente. Um modelo proposto neste sentido consiste em analisar o sinal resultante da soma dos sinais de cada modelo tentando simular as condições de falhas nas duas pistas simultaneamente.

A FIGURA 5.32 mostra os sinais de vibração de referência obtidos para o modelo de falhas combinadas nas duas pistas, para as hipóteses de carga radial e velocidade de rotação constante, a partir dos dados da TABELA 5.1. As frequências centrais de ressonâncias para os modelos de falhas nas pistas externa e interna foram adotadas com os valores $f_c = 1300$ e $f'_c = 3300$ Hz.

Observa-se que tanto o sinal no tempo quanto o seu espectro FFT apresentam características do tipo lineares, ou seja: o sinal resultante é a superposição dos modelos de sinais individuais, sem a presença de termos cruzados comuns nas transformações bilineares. Nota-se ainda que para as mesmas condições de simulação, a contribuição em termos de amplitudes de pico ao espectro FFT do modelo de falha na pista externa é maior que a do espectro produzido do modelo de falha na pista interna.

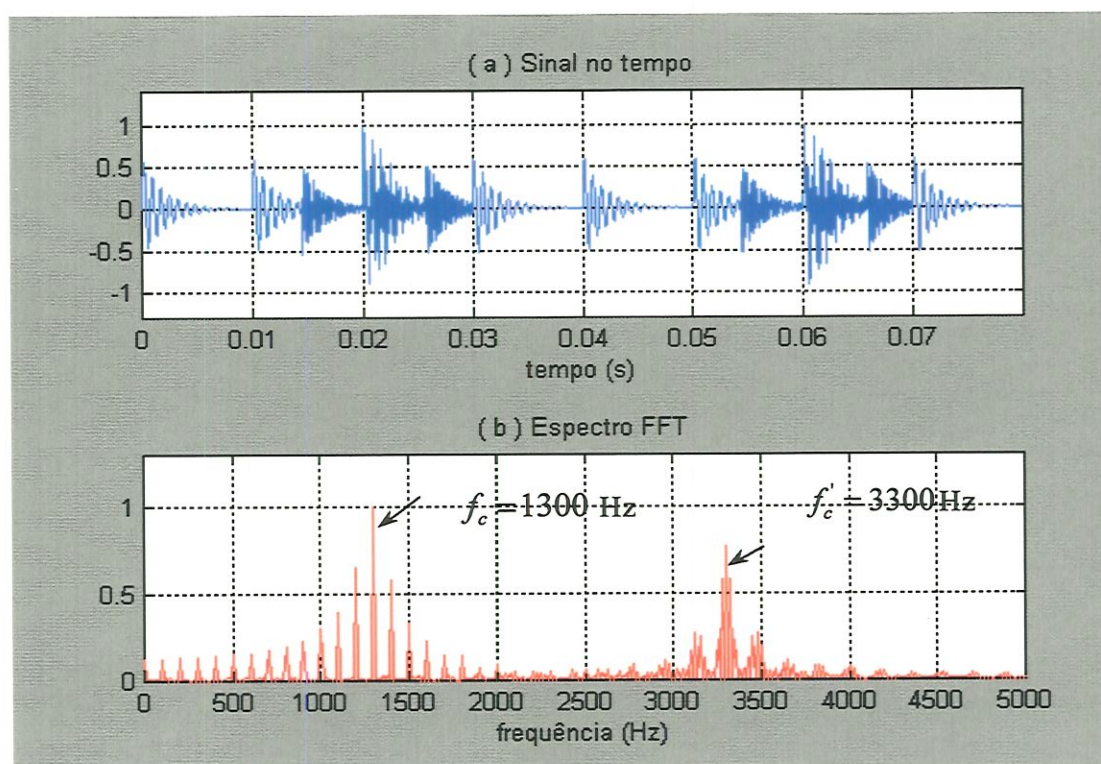


FIGURA 5.32 - Falhas combinadas: sinais de vibração de referência.

Análise no Domínio do Tempo

A FIGURA 5.33 mostra os sinais obtidos no domínio do tempo para o modelo de falhas combinadas nas duas pistas, onde observa-se o aumento progressivo das relações sinal-ruído (SNR) para as diversas condições de falhas. Analisando os sinais simulados no tempo verifica-se que é difícil destacar a periodicidade relativa à condição de falha na pista interna, pois os impactos secundários gerados ficam escondidos dentro dos impactos

resultantes do modelo de falha na pista externa, além do ruído presente no sinal. Este fato pode dificultar o diagnóstico de falhas em rolamentos pelas técnicas usuais, uma vez que os impactos principais irão sempre dominar o espectro resultante. No caso de falhas localizadas nas esferas, a análise se torna ainda mais complicada, pois os impactos gerados não são periódicos, devido a possíveis deslizamentos e à mudança de posição angular da falha devido à rotação.

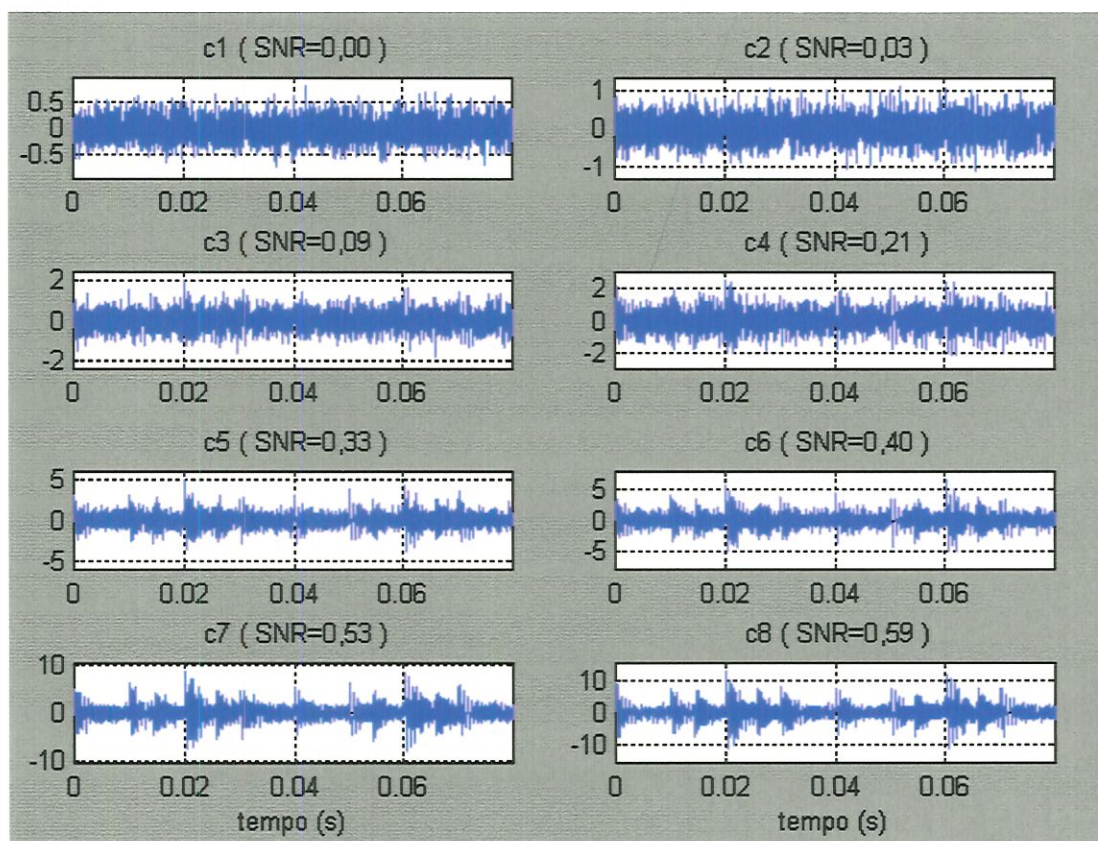


FIGURA 5.33 - Falhas combinadas: sinais de simulação no tempo.

Análise no Domínio da Frequência

As FIGURAS 5.34 e 5.35 mostram os espectros FFT e HFRT obtidos para algumas condições de falhas simuladas, a partir da escolha de duas faixas de frequências de ressonância: $f_c = 1300$ e $f'_c = 3300$ Hz, respectivamente.

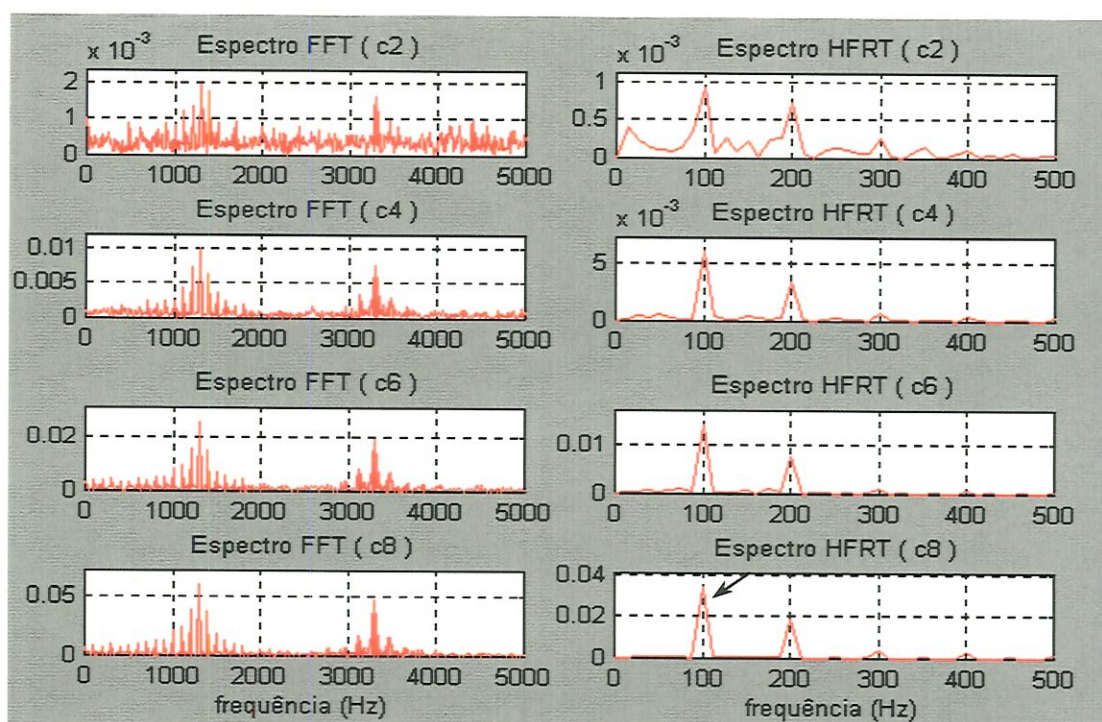


FIGURA 5.34 - Espectros FFT e HFRT dos sinais ($f_c = 1300$ Hz).

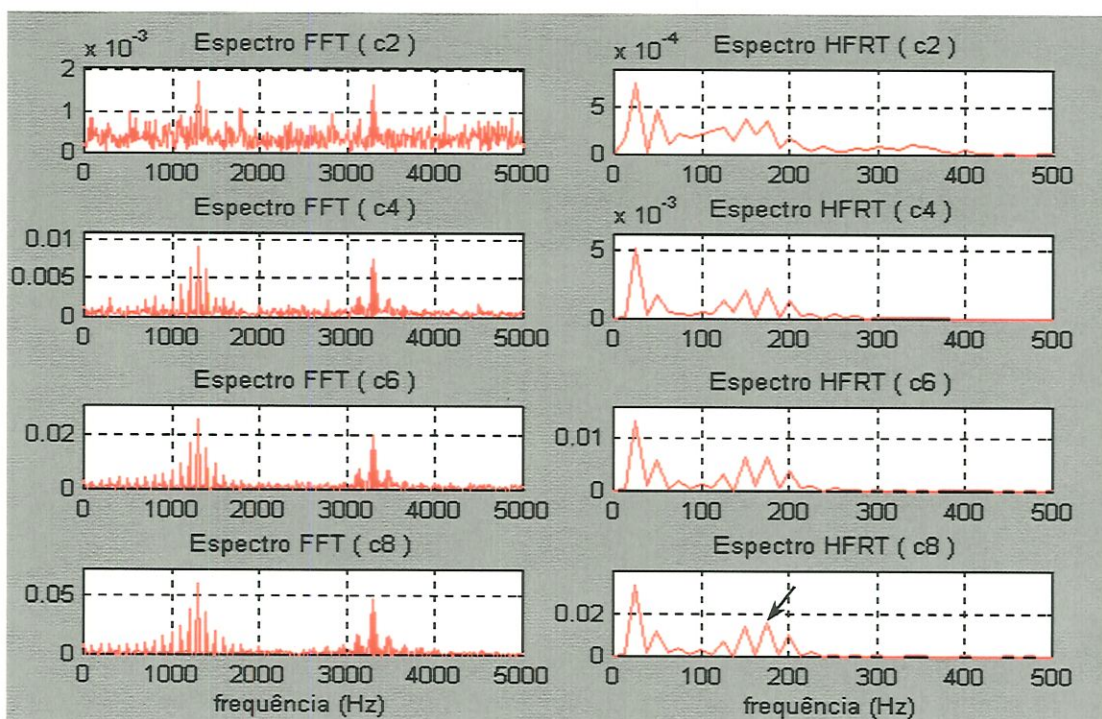


FIGURA 5.35 - Espectros FFT e HFRT dos sinais ($f'_c = 3300$ Hz).

Observa-se que, embora os resultados sejam praticamente análogos aos modelos de falhas obtidos individualmente, a simples mudança na escolha da frequência central de ressonância f_c , aplicada ao modelo de falhas combinadas, pode deixar de evidenciar um tipo de falha e mostrar a outra, confundindo o analista que utiliza a técnica do envelope HFRT. Na prática, é até possível que as faixas de frequências de ressonância excitadas estejam situadas numa mesma região, o que pode complicar ainda mais a análise.

Análise Conjunta Tempo-Frequência

As FIGURAS 5.36 e 5.37 mostram os mapas PWVD obtidos para o modelo de falhas combinadas a partir de duas condições típicas de falhas simuladas no tempo. Analisando estas figuras verifica-se que para a condição c3, representando uma pequena falha, o método PWVD apresenta boa sensibilidade, bem como a estrutura obtida já permite a identificação dos padrões típicos dos impactos devido às falhas, embora o efeito do ruído ainda esteja presente. Já para uma condição de falha mais severa (c6), a estrutura se torna bem mais definida, mostrando os efeitos individuais de cada modelo de falha, conforme já discutido anteriormente.

A TABELA 5.8 e a FIGURA 5.38 mostram o comportamento geral dos parâmetros obtidos para o modelo de falhas combinadas, onde observa-se que foi escolhida a melhor faixa de frequência de ressonância para aplicação da técnica do envelope HFRT, isto é, $f_c = 1300$ Hz. Comparando-se os indicadores, verifica-se que entre os parâmetros obtidos no tempo apenas o fator K continua apresentando crescimento relativo importante, embora só apresente mudança sensível a partir da condição c3. A razão de picos R_{pic} apresentou melhor sensibilidade para detecção de falhas que nos modelos anteriores, embora a partir da condição c4 ocorra uma tendência de estabilização. Já a razão de picos T_{pic} obtida pela PWVD para o modelo de falhas combinadas apresenta comportamento idêntico ao resultado anterior, e se mostra sempre crescente, embora apresente menor variação relativa.

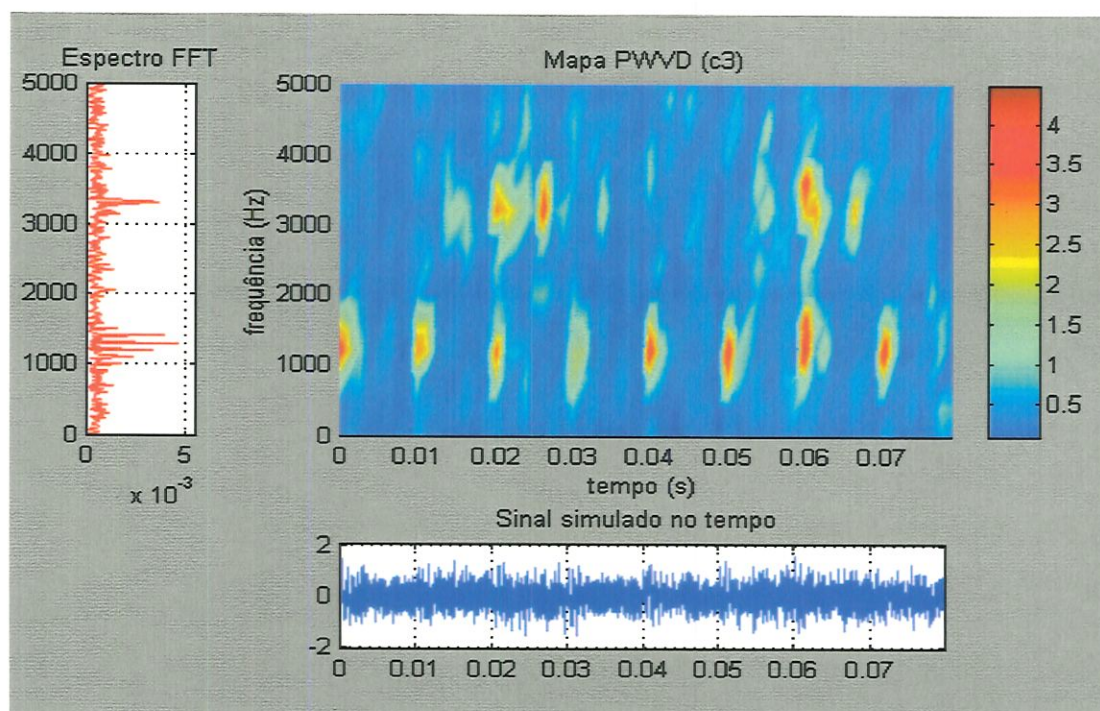


FIGURA 5.36 - Mapa PWVD obtido para condição de falhas combinadas c3.

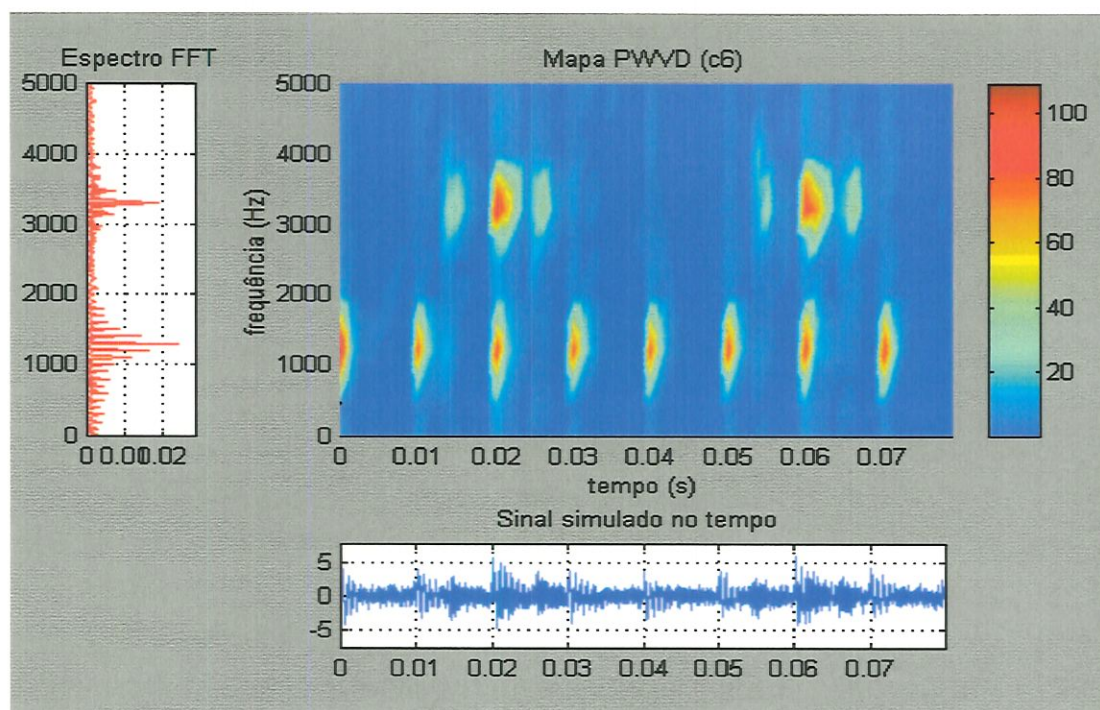


FIGURA 5.37 - Mapa PWVD obtido para condição de falhas combinadas c6.

TABELA 5.8 – Falhas combinadas: comparação de parâmetros.

condição	Xrms	Xpic	Fator K	Rpic HFRT	Tpic PWVD
c1	0.1994	0.9274	0.6030	3.7834	34.7274
c2	0.3129	1.0579	0.8909	9.0764	42.1153
c3	0.4436	1.5953	1.3135	13.6078	100.3758
c4	0.6306	2.5565	2.2608	17.8047	183.9660
c5	0.9033	4.4835	3.7922	18.5303	297.6673
c6	1.1747	6.1098	5.3958	18.5228	329.4248
c7	1.7116	8.5615	9.1545	20.5454	378.3322
c8	2.4733	12.2551	14.2144	20.7715	411.4912

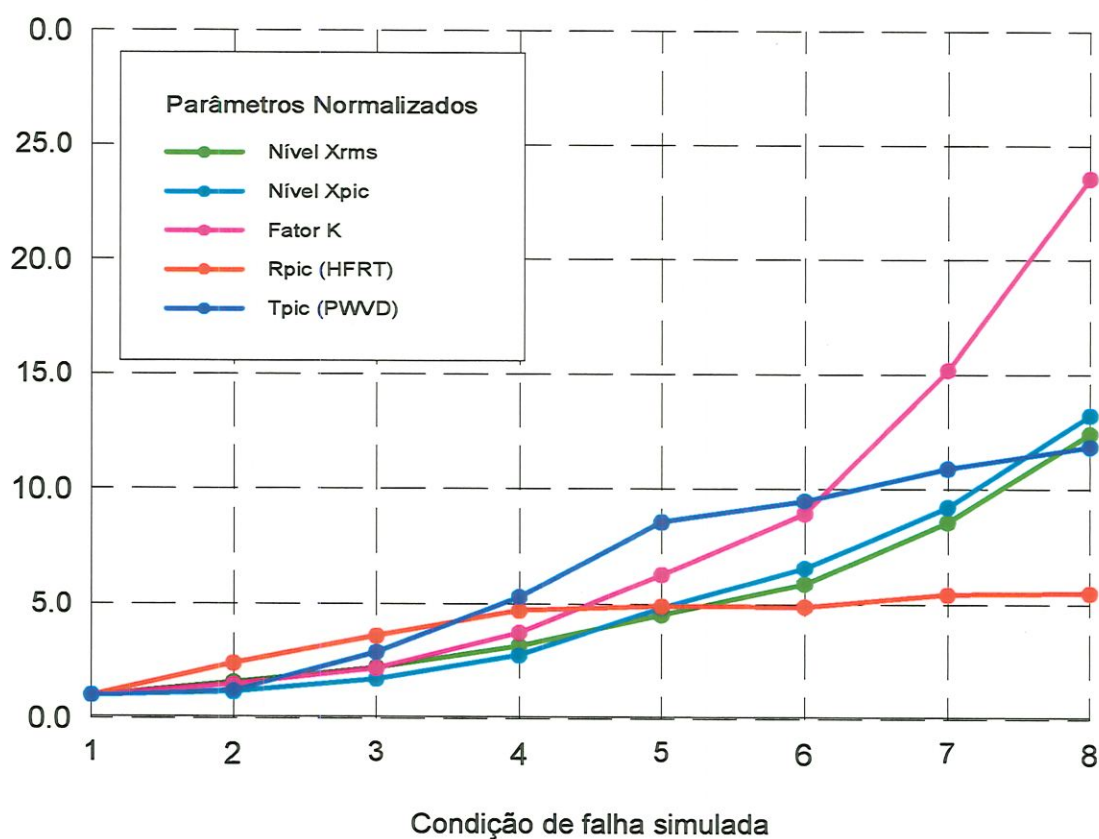


FIGURA 5.38 - Falhas combinadas: comparação de parâmetros.

Capítulo 6

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados das simulações apresentados no capítulo anterior formam um conjunto de referências para os estudos experimentais. Com o objetivo de validar os modelos de falhas em rolamentos foram realizados vários ensaios em condições reais de trabalho. Foi investigado o desempenho do método de análise conjunta tempo-frequência através da PWVD em relação a alguns métodos de análise nos domínios do tempo e da frequência. Para isto foi construído um banco de ensaios experimentais com a finalidade de permitir a aquisição de sinais de vibração em rolamentos sujeitos a diversas condições de falhas. Foi dada ênfase à capacidade de detecção e quantificação da falha, bem como à sensibilidade das diversas técnicas de análise implementadas. Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos através das medidas realizadas no banco de ensaios para duas condições: ensaios de curta duração com falhas introduzidas artificialmente e ensaios de longa duração com falhas geradas naturalmente nos rolamentos.

6.1 BANCO DE ENSAIOS

O sistema mecânico projetado para a realização dos experimentos é constituído de um banco de ensaios especialmente construído com a finalidade de permitir boa flexibilidade aos testes e de modo a tornar os parâmetros de medidas o mais representativo possível da proposta de trabalho. O sistema de acionamento consiste de um motor elétrico trifásico, modelo de carcaça ABNT-71, com potência nominal de 0,5 CV (370 W), ligado a um conversor de frequência modelo CFW-07 com faixa de atuação de 0 a 300 Hz, ambos de fabricação WEG. Este sistema permite a variação da

rotação de 1 rpm com rotação máxima admissível de 3000 rpm. A transmissão entre o motor e o eixo principal de rotação é feita através de duas correias trapezoidais com perfil A-32, fabricação Goodyear, montadas sobre polias de ferro fundido. O apoio do eixo principal de rotação é realizado por dois rolamentos auto-compensadores com duas carreiras esferas, padrão 2207-K, montados através de buchas cônicas de fixação série H-307 e caixas padronizadas de ferro fundido SNA 507.

A concepção do banco de ensaios foi desenvolvida de modo a garantir que as medições representem bem as condições reais de operação de máquinas de pequeno porte, que possuam baixa rigidez estrutural. Considera-se ainda que as principais fontes de excitação são relativas às falhas geradas naturalmente ou introduzidas artificialmente nas pistas dos rolamentos, embora as vibrações provenientes de outras fontes como frequências naturais e ruídos aleatórios sempre estejam presentes. A FIGURA 6.1 mostra uma vista geral do banco de ensaios, onde são observados os principais componentes do conjunto montado. Mais detalhes sobre alguns sub-sistemas do conjunto são apresentados no Apêndice 1.



FIGURA 6.1 - Vista geral do banco de ensaios experimentais.

Uma característica do banco de ensaios é a facilidade de montagem dos rolamentos de teste, feita numa das extremidades do eixo em balanço sem a necessidade de desmontagem dos rolamentos de apoio. Para a aplicação de cargas foi projetado um sistema de carregamento articulado com o suporte do rolamento, sendo constituído por uma barra de aço tipo mecanismo de alavanca, permitindo a variação de cargas no sentido radial através da adição de massas calibradas. A faixa de carregamento possível com este sistema foi de 0 a 4500 N sobre o rolamento de teste.

Os rolamentos de teste escolhidos apresentam características geométricas típicas do padrão 6204, possuindo uma carreira de esferas e estrutura semelhante aos rolamentos fixos de esferas. Para os ensaios de curta duração com falhas introduzidas artificialmente foram utilizados rolamentos do tipo FAG E-20 que possuem um só rebordo na pista externa e são separáveis. Os anéis externo e interno podem ser montados e desmontados separadamente, o que facilita a introdução de falhas em suas pistas ou elementos rolantes. A TABELA 6.1 mostra algumas características destes rolamentos, incluindo especificações geométricas e fórmulas deduzidas para o cálculo das frequências características de defeitos.

TABELA 6.1 - Especificações do rolamento de teste (FAG E-20).

Características do rolamento	Parâmetros
Número de esferas	$n_b = 11$ esferas
Diâmetro médio ou "Pitch"	$D = 34$ mm
Diâmetro das esferas	$d = 8$ mm
Ângulo de contato	$\beta = 0$
Frequência de rotação do eixo	$f_s = 1500$ rpm (25 Hz)
Frequência de defeito na pista externa	$f_e = 4,20 f_s$ (105 Hz)
Frequência de defeito na pista interna	$f_i = 6,79 f_s$ (169,75 Hz)
Frequência de defeito nas esferas	$f_b = 2,0 f_s$ (50 Hz)
Frequência de defeito na gaiola	$f_g = 0,38 f_s$ (9,5 Hz)

6.2 INSTRUMENTAÇÃO PARA AQUISIÇÃO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO

A instrumentação utilizada para a aquisição dos sinais de vibração consiste de dois acelerômetros B&K 4371, montados através de base magnética sobre os suportes dos rolamentos de teste e de apoio. A localização do sensor sobre o rolamento de teste é coincidente com a zona de carga máxima de modo a permitir a extração de sinais mais representativos. O sistema de aquisição dos sinais é composto por um analisador de Fourier, modelo TEKTRONIX 2630 conforme mostra a FIGURA 6.2. Este possui quatro canais, e permite a aquisição de blocos de sinais no tempo com até 4096 pontos e faixa máxima de análise de 0 a 20 kHz. Para condicionamento dos sinais foram usados dois amplificadores de carga, modelo B&K 2626, que permitem uma faixa de variação de voltagem de ± 10 V. O ajuste das amplitudes dos sinais originalmente medidas em Volts foram calibradas para unidades de aceleração em “g” visando facilitar a sua interpretação.



FIGURA 6.2 - Vista geral do sistema de aquisição de sinais.

A escolha de dois transdutores para a realização dos ensaios se deve ao fato de que é possível manter sempre um acelerômetro no rolamento de teste, enquanto o segundo pode ser deslocado para outras partes do banco de ensaios. Além disso, pode-se verificar a relação entre os sinais de referência medidos com os dois acelerômetros num mesmo ponto, o que se caracteriza como um método simplificado de calibração. Uma observação importante é que durante a realização dos ensaios nos rolamentos o analisador serviu apenas como placa de aquisição dos sinais no tempo. Toda a fase de processamento e análise dos sinais foi realizada através de programas implementados no ambiente MATLAB ®. As funções do analisador foram utilizadas apenas quando do estudo da resposta estrutural do sistema.

6.3 RESPOSTA ESTRUTURAL DO BANCO DE ENSAIOS

Com o objetivo de se conhecer melhor o comportamento dinâmico da banco de ensaios projetado, foram realizados alguns testes para a identificação da resposta estrutural do sistema às excitações produzidas através de um martelo de impacto em vários pontos da estrutura. Estes ensaios são importantes para a verificação de possíveis frequências de ressonâncias de componentes que sejam coincidentes com aquelas provenientes dos impactos gerados pela falha nos rolamentos de testes, e de eventuais frequências que venham a ser moduladas pelos impactos. Lembra-se que a abordagem matemática de modelagem de falhas em rolamentos contempla os efeitos do meio de transmissão da vibração e da resposta estrutural do sistema. Neste trabalho a determinação das funções de transferência do sistema é feita através de ferramentas da análise modal experimental, visando-se a identificação das frequências de ressonâncias encontradas dentro de certas faixas de análise, onde ocorrem fenômenos típicos de modulação de frequências pelos impactos devido à falha.

Como ponto de medida da resposta estrutural do sistema à excitação produzida pelo impacto do martelo foi escolhido o suporte do rolamento de teste, considerado como mais sujeito ao efeito do carregamento e de

componentes que apresentam baixas frequências de ressonâncias (barra de carregamento, tirante de suspensão das massas, etc.), dentro da faixa de frequências características de defeitos mostrada na TABELA 6.1. Por outro lado, foram escolhidos vários pontos de excitação da estrutura de modo a garantir que todos os possíveis modos de vibrar do sistema na faixa de interesse sejam observados. Os ensaios foram realizados utilizando um martelo de impacto B&K 8202 acoplado com transdutor de força, cuja faixa de excitação útil é de 0 a 5 kHz, obtida através da colocação de uma ponta de aço na extremidade do martelo. Em cada ponto escolhido para excitação foram tomados a média de 10 impactos. As medidas foram realizadas para as condições estática (parada) e dinâmica (em rotação) do banco de ensaios. No caso das condições dinâmicas, foram escolhidas duas situações de teste: uma com o rolamento novo e outra com uma falha pontual na pista externa. Este procedimento permite visualizar em que faixas de frequências ocorrem maior densidade modal e, com isso, decidir quanto à escolha de uma faixa de filtragem mais adequada, que esteja correlacionada com o desenvolvimento de falhas no rolamento para a aplicação das técnicas de monitoramento.

A FIGURA 6.3a mostra para a condição estática o comportamento típico da excitação por impacto aplicada num ponto do rolamento de apoio, na faixa de análise entre 0 e 5 kHz, a partir da aquisição no tempo feita diretamente pelo analisador, onde observa-se que as medidas estão em escala logarítmicas, e as amplitudes de aceleração em “dB”. Analisando o espectro de excitação captado pelo transdutor de força, este apresenta um decaimento mais lento para valores de frequências até cerca de 2000 Hz, enquanto que decai mais rapidamente para frequências mais elevadas, piorando um pouco a relação sinal-ruído. A FIGURA 6.3b mostra a função de resposta em frequência (FRF) obtida, resultante da relação entre a resposta em frequência medida no rolamento de teste captada pelo acelerômetro e a excitação produzida pelo martelo de impacto sobre a estrutura do rolamento de apoio. Verifica-se que algumas faixas de frequências são mais destacadas apresentando comportamento típico de ressonâncias estruturais (ex. 375, 750, 1200, 2100, 2800 e 3900 Hz), embora nota-se que devido à larga faixa de

análise escolhida, as curvas mostradas até cerca de 2500 Hz apresentam algumas distorções.

A FIGURA 6.3c ilustra a qualidade das medidas realizadas entre a resposta e a excitação através da função de coerência, onde observa-se o efeito da relação sinal-ruído nas medições. Nota-se que para a faixa analisada o comportamento é quase plano e unitário indicando que as medidas estão coerentes com os gráficos obtidos de excitação e resposta em frequência.

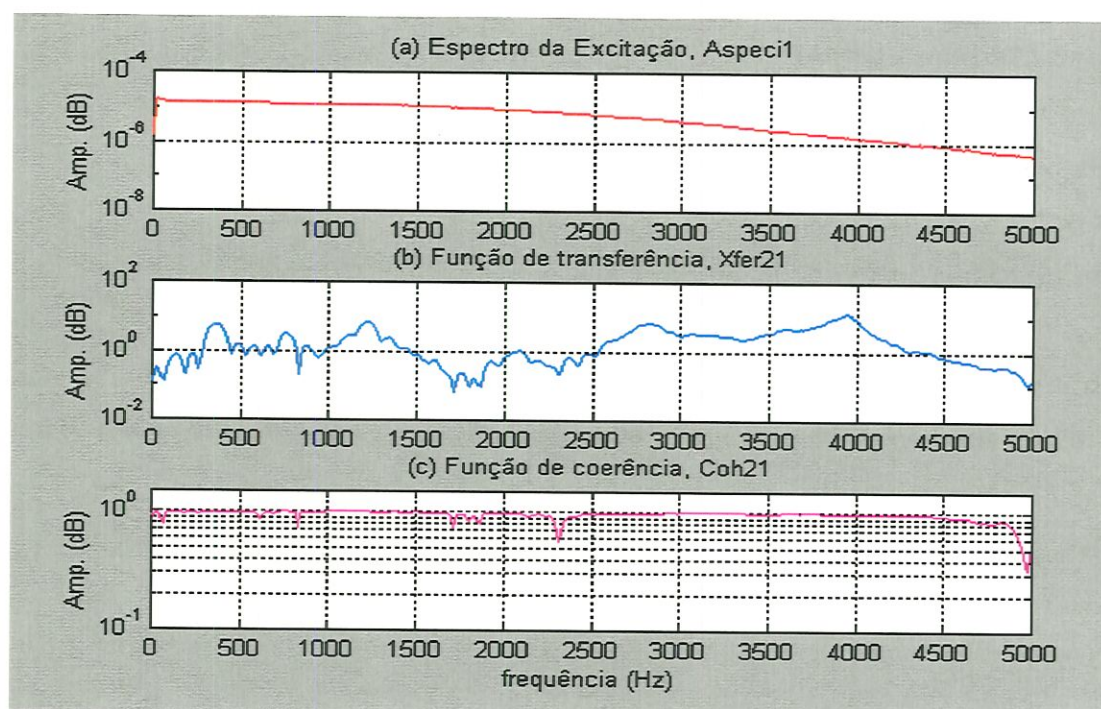


FIGURA 6.3 - Medidas obtidas para condição estática.

A FIGURA 6.4a mostra o comportamento dinâmico típico da excitação por martelo de impacto aplicada no rolamento de apoio com o banco de ensaios em funcionamento, girando com frequência de rotação $f_s = 2500$ rpm, e utilizando rolamentos novos. As FIGURAS 6.4b e 6.4c mostram a resposta à excitação e a FRF obtidas do analisador, onde verifica-se que as faixas de ressonâncias mais excitadas estão em torno de 600, 1300, 2500 e 3600 Hz, respectivamente. Nota-se ainda que as curvas apresentam pequenas oscilações das amplitudes ao longo das frequências, provavelmente devido à uma piora da relação sinal-ruído com o efeito da rotação.

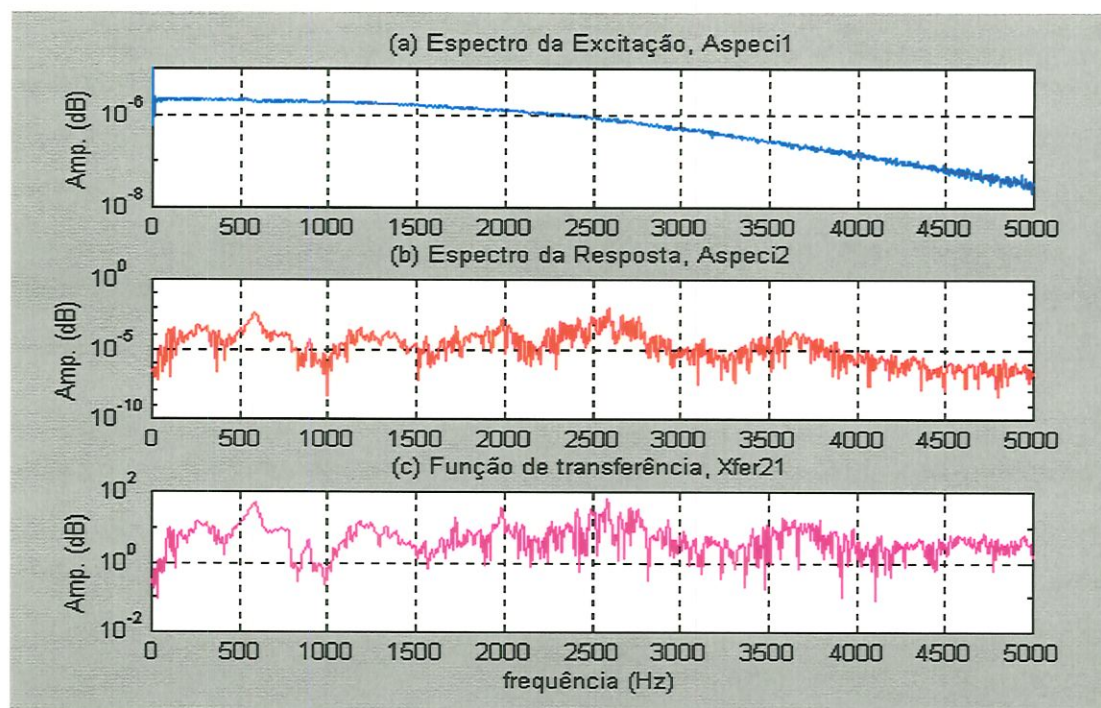


FIGURA 6.4 - Medidas obtidas para condição dinâmica (rolamento novo).

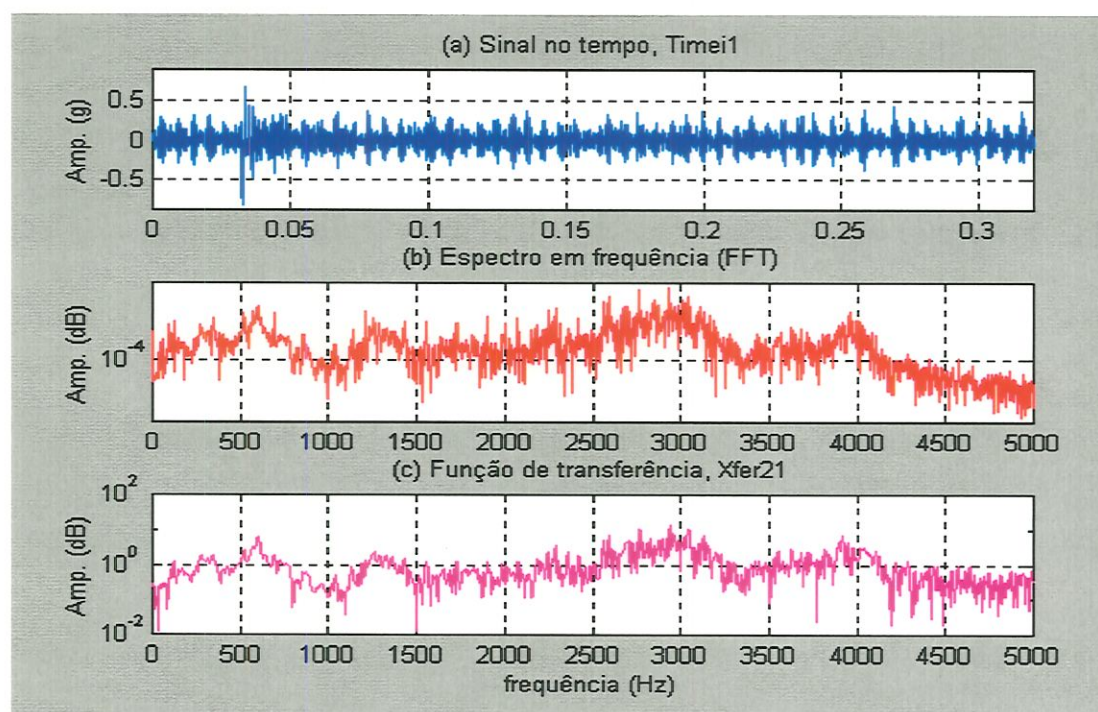


FIGURA 6.5 - Medidas obtidas para condição dinâmica (rolamento defeituoso).



Visando detectar possíveis mudanças no comportamento dinâmico da estrutura quando excitada por impactos devido a falhas nos rolamentos, foi introduzida uma falha do tipo risco transversal na pista externa do rolamento de teste, com área equivalente a $1,5 \text{ mm}^2$, e analisados os gráficos resultantes. A FIGURA 6.5a mostra um dos blocos de sinais obtidos no domínio do tempo, representando a resposta medida no rolamento de teste. Observa-se a forma da excitação principal produzida pelo impacto do martelo, próxima de 0,03 s, que está sobreposta aos impactos gerados pela passagem das esferas sobre a superfície defeituosa do rolamento. As FIGURAS 6.5b e 6.5c mostram o espectro calculado via FFT e a FRF obtida do analisador, respectivamente. Comparando-se com as FIGURAS 6.4b e 6.4c obtidas para os rolamentos em bom estado, pode-se destacar três faixas que foram mais excitadas, em torno de 1300, 3000 e 4000 Hz, o que sugere serem resultantes das excitações produzidas pela falha. Este fato confirma a necessidade do teste de impacto na escolha de faixas de frequências de filtragem adequadas para análise.

6.4 ENSAIOS DE CURTA DURAÇÃO

Crítérios e Condições Gerais Adotadas

Com o objetivo de investigar o desempenho dos diversos métodos de análise, foram realizados ensaios de curta duração através da introdução de falhas propositais nas pistas dos rolamentos de teste. Esta fase da pesquisa envolveu a medição e a análise dos sinais de vibração representando várias condições de falhas com o objetivo de validar os modelos de falhas implementados no capítulo 5. Inicialmente foram realizadas medidas com o rolamento novo (condição c1) e, em seguida, foram produzidas falhas do tipo riscos transversais com tamanhos crescentes, nas pistas externa e interna dos rolamentos, conforme mostra a TABELA 6.2. Os riscos foram produzidos por usinagem através de uma caneta odontológica de alta rotação fixa no porta-ferramentas de um pequeno torno mecânico, acionada por ar comprimido,

com brocas de pontas arredondadas do tipo “Karbit” e diâmetros variando de 0,3 a 1,0 mm. A FIGURA 6.6 ilustra uma das montagens utilizadas para usinagem dos riscos, que representam falhas do tipo trinca por fadiga superficial nas pistas dos rolamentos. Mais detalhes sobre algumas falhas produzidas nos rolamentos são mostradas no Apêndice 2.

TABELA 6.2 - Condições de falhas introduzidas nas pistas dos rolamentos.

Condições de falhas adotadas	Comprimento do risco, l (mm)	Largura do risco h (mm)	Área do defeito A (mm ²)
c1	-	-	-
c2	3,0	0,3	0,9
c3	3,0	0,4	1,2
c4	3,0	0,5	1,5
c5	3,0	0,6	1,8
c6	3,0	0,7	2,1
c7	3,0	0,8	2,4
c8	3,0	1,0	3,0

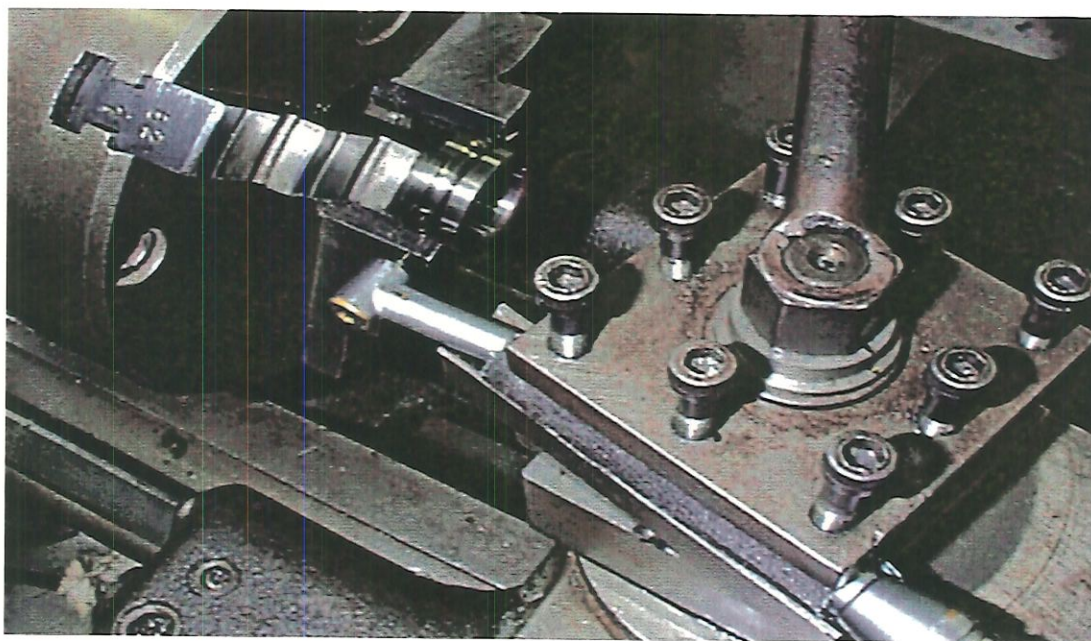


FIGURA 6.6 - Montagem utilizada para usinagem de falhas no rolamento.

Durante a aplicação das técnicas serão investigados vários parâmetros de detectibilidade e sensibilidade em relação a cada uma das variáveis como efeito do carregamento, velocidade de rotação, tamanho e localização da falha, meio de transmissão da vibração e resposta estrutural do sistema. As condições de falhas introduzidas artificialmente seguem, em linhas gerais, alguns estágios de falhas geradas em condições normais de funcionamento. Quanto ao mecanismo de desenvolvimento de falhas em rolamentos, adota-se o procedimento descrito por MITCHELL (1993):

- i) para evidenciar o processo de falha por fadiga superficial como agente de origem nas pistas dos rolamentos considera-se que todas as possíveis causas de falhas prematuras tais como lubrificação inadequada, montagem incorreta, desalinhamentos, desbalanceamentos e vibrações oriundas de outras fontes externas não ocorram durante os ensaios;
- ii) durante o processo de falha por fadiga, o carregamento entre as esferas e as pistas ocorrem inicialmente em pequenas áreas de contato produzindo tensões elevadas de cisalhamento abaixo da superfície, que dão início à formação da trinca. O crescimento da trinca na direção da superfície causa o “pitting” ou trinca superficial. Neste primeiro estágio, em que a falha é considerada pequena, é produzida uma energia mais concentrada nas altas frequências, indicando apenas maior vigilância do rolamento;
- iii) com o surgimento e crescimento da trinca na superfície da pista ou elemento rolante, ocorre um aumento do desgaste e da temperatura local, levando de um estado de falha localizada para falha distribuída produzida pelo desgaste das superfícies de contato. Normalmente este tipo de fenômeno é originado na pista externa ou interna e, posteriormente, propaga-se para os elementos rolantes. Neste segundo estágio, o desenvolvimento da falha é caracterizado por harmônicos múltiplos das frequências características do defeito, observando-se um crescimento dos picos na faixa de 0 a 5 kHz;
- iv) no terceiro estágio de falha, devido ao aumento do grau de deterioração das superfícies de contato, surgem fortes componentes das frequências características do defeito, deslocando as componentes de energia

concentrada das altas frequências para as médias frequências, o que permite uma análise pelo espectro direto via FFT;

- v) o estágio final de falha num rolamento ocorre quando as amplitudes da frequência de rotação e harmônicas de baixa ordem começam a crescer, observando-se bandas laterais espaçadas da frequência de rotação nas frequências características do defeito. Neste caso, o risco de falha é iminente e o rolamento deve ser substituído.

Procedimentos e Parâmetros de Análise

A FIGURA 6.7 ilustra o diagrama esquemático utilizado para processamento e análise dos sinais de vibração medidos no banco de ensaios, seguindo o mesmo procedimento adotado no capítulo 5.

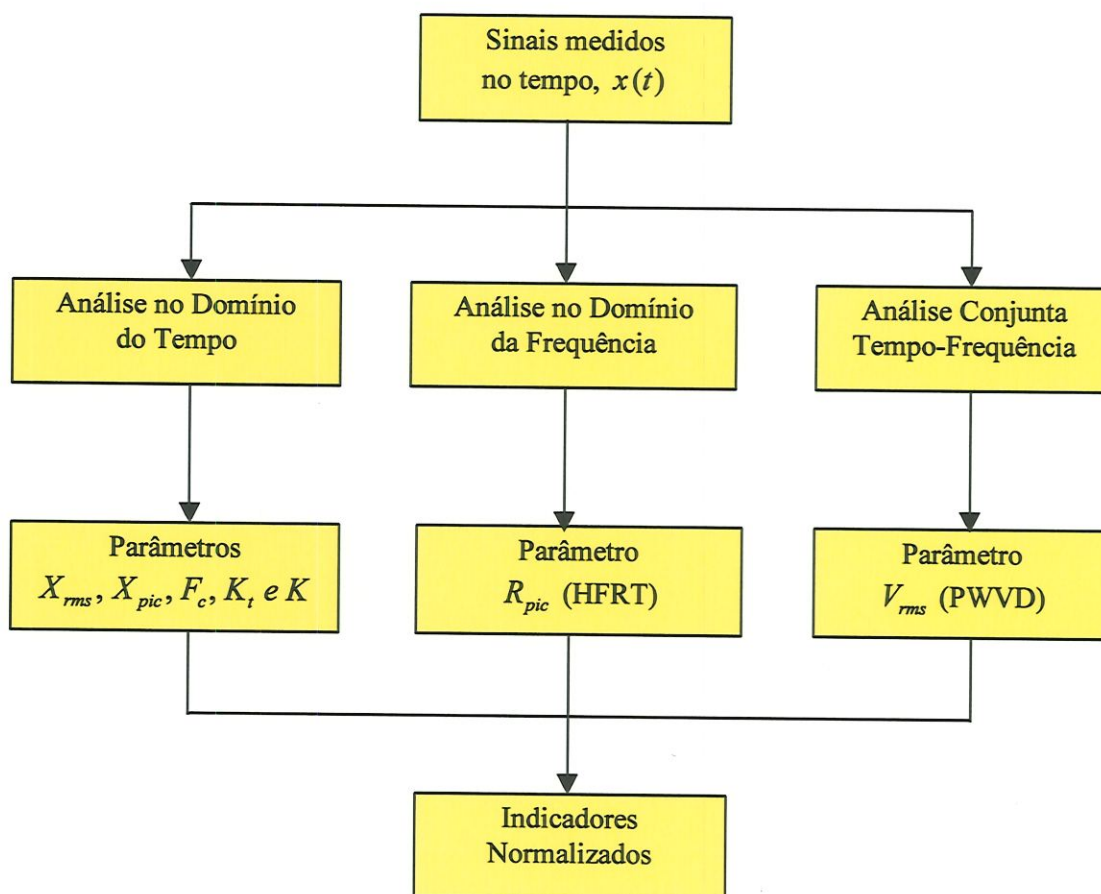


FIGURA 6.7 – Diagrama esquemático: análise dos sinais de vibração.

Observa-se que todos os parâmetros indicadores são normalizados em relação aos menores valores obtidos, correspondente ao rolamento em bom estado (c1), de modo que os parâmetros iniciam com valor unitário. Isto permite uma melhor visualização das variações relativas de cada parâmetro, para as diversas condições analisadas.

Introdução de Falhas na Pista Externa

Análise no Domínio do Tempo

A partir dos procedimentos já adotados para simulação dos modelos de falhas descritos no capítulo 5, e com o objetivo de validar estes modelos, inicialmente serão investigadas algumas características dos sinais de vibração medidos no domínio do tempo após a introdução de falhas na pista externa do rolamento. As unidades dos sinais de aceleração de vibração foram tomadas em “g” diretamente do analisador, que neste caso funciona apenas como placa de aquisição, para as diversas condições de falhas artificialmente induzidas, utilizando-se os mesmos dados da TABELA 5.1. Uma sequência de oito blocos de sinais originais obtidos no tempo com 4096 pontos de discretização e faixa útil de análise de 0 a 20 kHz é mostrada na FIGURA 6.8. Observa-se que estas medidas foram realizadas com velocidade de rotação $f_s = 1500$ rpm (25 Hz) e carga radial no rolamento de $P_r = 2200$ N.

Comparando-se os gráficos das FIGURAS 6.8 e 5.4, observa-se que os sinais medidos no rolamento com falha na pista externa apresentam características semelhantes em relação aos obtidos através do modelo, visualizando-se cerca de oito impactos em cada janela de análise, embora a forma dos impactos se mostrem menos amortecidos que no modelo adotado. Também nota-se que a partir da condição c6 as amplitudes dos sinais medidos experimentalmente crescem de forma mais lenta, não evidenciando bem o crescimento relativo da falha nestas condições.

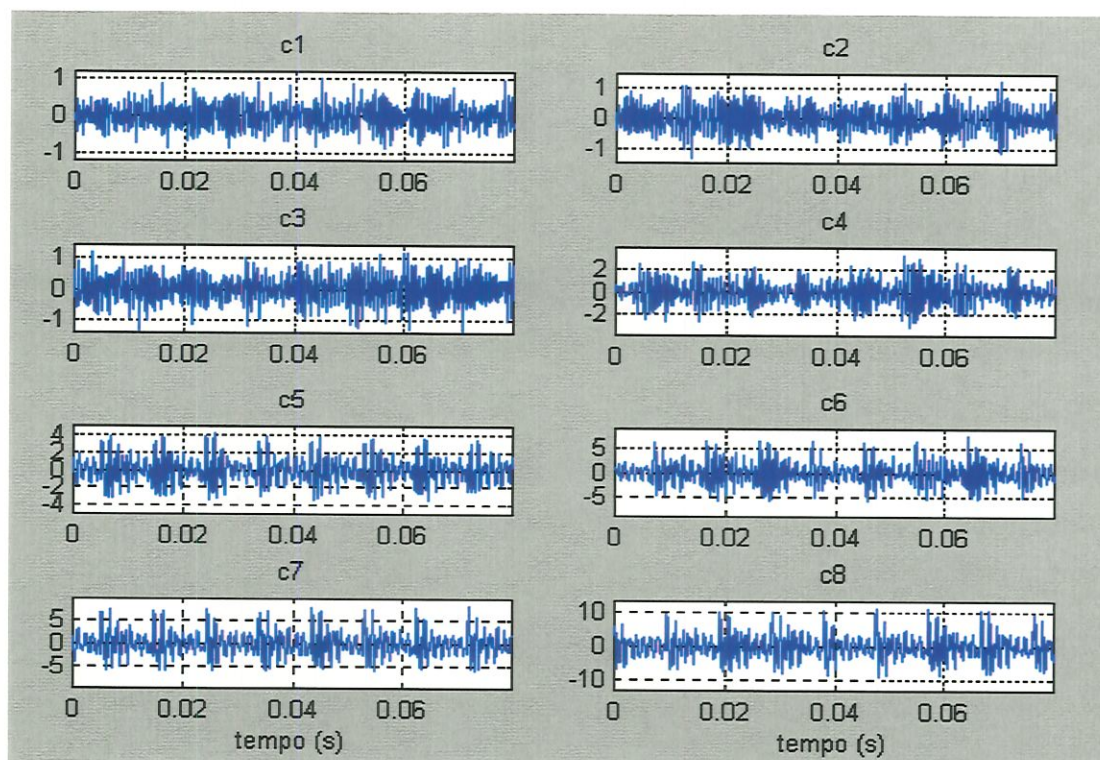


FIGURA 6.8 - Falha na pista externa: sinais medidos no tempo.

A TABELA 6.3 e a FIGURA 6.9 mostram os resultados experimentais para a análise de parâmetros no domínio do tempo obtidos a partir das medidas realizadas no rolamento com falha introduzida na pista externa, conforme as condições de falhas já apresentadas na TABELA 6.2. Os indicadores foram calculados a partir da média ponderada de cinco blocos de sinais para cada condição testada, onde os pontos marcados com o símbolo “x” nos gráficos a seguir representam os valores médios dos parâmetros. Convém ressaltar que estes parâmetros normalizados são adimensionais, e correspondem às diversas condições ou graus de severidade da falha. O valor unitário representa o rolamento em bom estado (c1) e o valor máximo representa a condição de falha mais severa (c8). Observa-se que mesmo para esta última condição (c8), a área do defeito produzido ($A_g \cong 3,0 \text{ mm}^2$) é inferior ao padrão industrial recomendado pela Timken como critério de substituição do rolamento ($A_c \cong 6,45 \text{ mm}^2$) *apud* SHIROISHI *et al* (1997).

TABELA 6.3 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo.

condição	Xrms (g)	Xpic (g)	Fator Fc	Curtose Kt	Fator K (g)
c1	0.2907	0.9223	3.1745	2.8612	0.8301
c2	0.3574	1.2608	3.5261	2.9466	1.0530
c3	0.3847	1.4588	3.7961	3.4013	1.3090
c4	0.8767	3.1631	3.6140	3.2920	2.8840
c5	1.2763	4.2710	3.3459	3.2794	4.1857
c6	1.9898	6.8578	3.4460	3.3347	6.6359
c7	2.1906	7.9555	3.6296	3.7490	8.2106
c8	2.9417	10.5783	3.5978	3.6399	10.7040

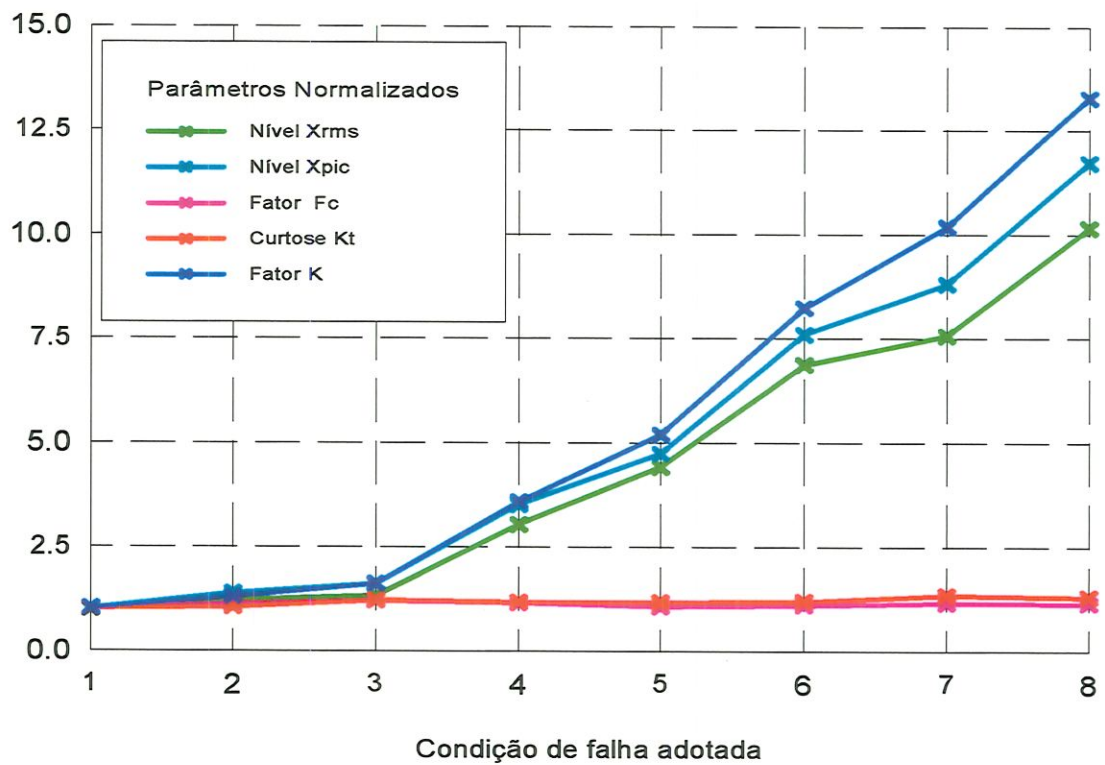


FIGURA 6.9 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo.

Comparando-se os resultados obtidos das TABELAS 6.3 e 5.2 e dos gráficos das FIGURAS 6.9 e 5.5, verifica-se que as faixas gerais de variação dos parâmetros estão coerentes com a faixa de valores identificadas através do modelo. O melhor exemplo são os níveis x_{rms} que seguiram praticamente a mesma faixa de variação do modelo. Os demais parâmetros apresentaram menores variações, como os valores do nível x_{pic} e o fator K que caíram cerca de 22,0 % e 46,5 %, respectivamente. Mesmo assim estes parâmetros se mostraram eficientes na detecção do crescimento da falha, conforme a previsão do modelo. Nota-se ainda que o fator K medido apresentou menor crescimento para as condições mais severas. Este fato pode estar ligado à observação feita sobre o crescimento mais lento das amplitudes de picos dos sinais medidos no tempo, evidenciados a partir da condição c6. Também observou-se uma redução nos valores de curtose K_f e do fator de crista F_c em relação aos valores obtidos do modelo, não apresentando variação que possibilite a detecção de falhas em crescimento. Este resultado também confirma as previsões feitas anteriormente pelo modelo e valida a análise.

Análise no Domínio da Frequência

A FIGURA 6.10 mostra os espectros FFT obtidos a partir dos sinais medidos no tempo, apresentados na FIGURA 6.8. Analisando estes espectros FFT é possível visualizar várias faixas de frequências de ressonâncias estruturais do sistema (ex. 750, 1300, 2300, 3300, e 4300 Hz), bem como uma mudança progressiva das faixas de frequências mais excitadas pela falha. Observa-se que para tamanhos de falha crescentes ocorre um aumento relativo nas amplitudes dos espectros FFT, junto com um deslocamento gradual e aumento dos picos no sentido das frequências mais altas para as baixas. Porém a separação entre as linhas dos espectros FFT correspondentes à frequência característica do defeito f_d é difícil de ser identificada devido à grande densidade espectral em torno da frequência central de ressonância.

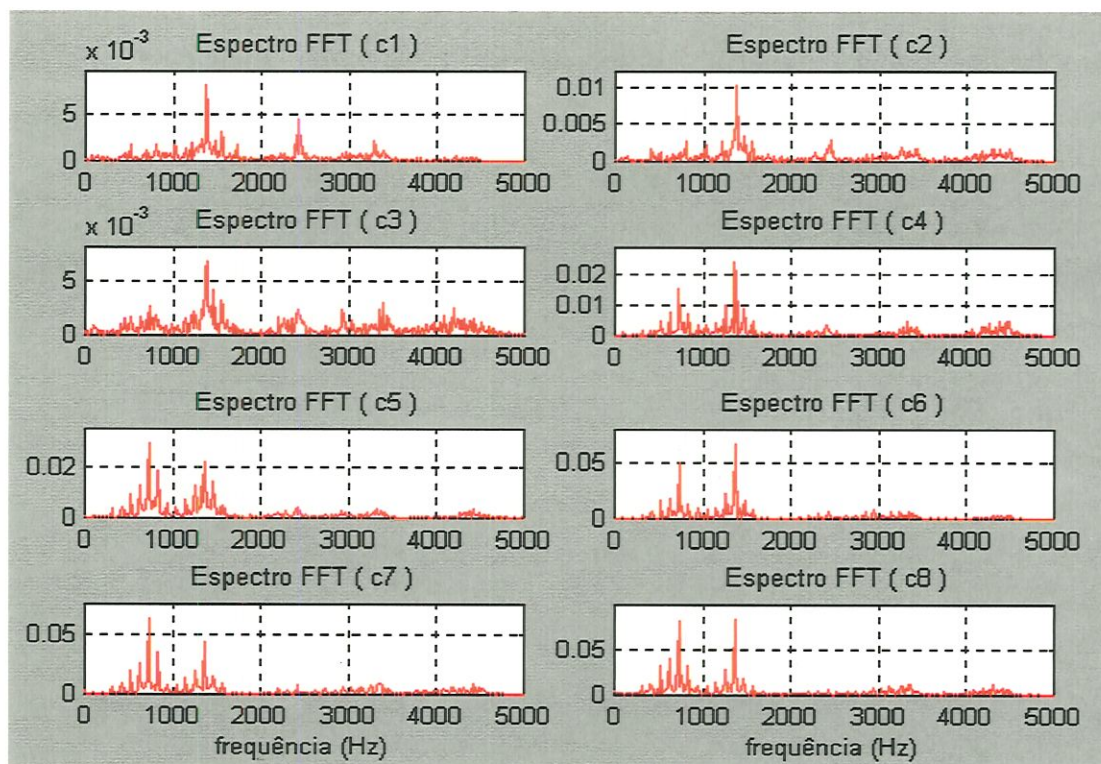


FIGURA 6.10 – Espectros FFT dos sinais em frequência.

Uma técnica mais adequada para a detecção das frequências características de defeitos é obtida através da demodulação dos espectros FFT filtrados em alta frequência. Esta técnica visa reduzir os efeitos de ruídos ou vibrações oriundas de outras fontes de baixa frequência, utilizando-se os espectros do envelope HFRT filtrados em baixa frequência. A FIGURA 6.11 apresenta os espectros FFT e do envelope HFRT, mostrados apenas até 5000 e 500 Hz, respectivamente, obtidos para quatro condições de falhas crescentes na pista externa do rolamento. Foi adotada a faixa de frequência de filtragem $f_c = 1300 \pm 2f_d$ Hz, que se mostra mais evidente nos espectros FFT medidos. Com isto segue-se o mesmo procedimento utilizado nas análises dos modelos feitas no capítulo anterior.

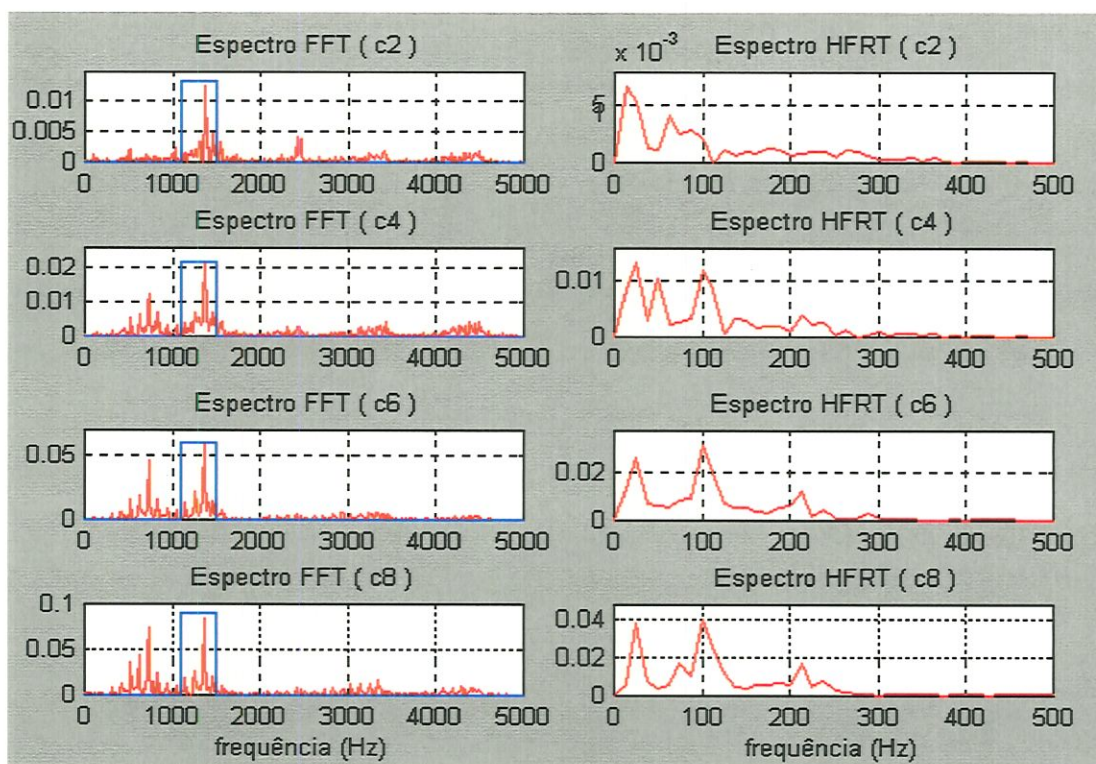


FIGURA 6.11 - Espectros FFT e HFRT filtrados em frequência.

Comparando-se os gráficos das FIGURAS 6.11 e 5.7, verifica-se que os espectros HFRT medidos apresentam um novo pico, identificado em 25 Hz, correspondente à frequência de rotação $f_s = 1500$ rpm, que não havia sido previsto no modelo. Este pico pode estar relacionado com algum problema de desbalanceamento do sistema rotativo. Um segundo pico, observado a partir da condição c4 e identificado em 100 Hz, corresponde à frequência característica do defeito $f_d = 105$ Hz. Analisando mais detalhadamente os espectros do envelope HFRT, observa-se um terceiro pico, visualizado em menor destaque a partir da condição c4, identificado em 212,5 Hz, correspondente à primeira harmônica da frequência característica do defeito $2f_d = 210$ Hz. Convém ressaltar que os valores identificados diferem um pouco dos valores teóricos devido à baixa resolução obtida em frequência, $\Delta f = 12,5$ Hz, o que pode ter dificultado a análise por esta técnica.

Quanto à escolha da faixa de frequência de filtragem mais adequada para aplicação da técnica do envelope HFRT, alguns investigadores recomendam que deve-se evitar frequências inferiores a 1 kHz, para evitar a influência de fontes de vibrações relacionadas com as baixas frequências, como desbalanceamentos e desalinhamentos, frequências de engrenamento, etc. Por outro lado a escolha situada nas altas frequências, acima de 10 kHz, nem sempre é viável, devido à limitação dos sistemas de aquisição tradicionais. Estes sistemas utilizam frequências de corte maior que a metade da frequência de amostragem, geralmente abaixo de 50 kHz. Deve-se considerar também as limitações da faixa de sensibilidade dos instrumentos de medida que atenuam ou distorcem as medidas acima de determinadas faixas de frequências. Portanto, a escolha da faixa deve estar situada entre 1 kHz e 10 kHz (RYCKALTS, 1992).

A TABELA 6.4 e a FIGURA 6.12 mostram o comportamento de alguns parâmetros obtidos no domínio do tempo e da frequência para as diversas condições de falhas introduzidas na pista externa do rolamento.

Comparando-se os gráficos das FIGURAS 6.12 e 5.8 verifica-se que os valores normalizados das razões de pico R_{pic} medidas apresentaram menor sensibilidade que os valores previstos no modelo. Enquanto os valores R_{pic} simulados se mostraram sensíveis já a partir da condição c2 e continuaram crescendo até cerca de 7,5 vezes o valor de referência, os valores R_{pic} medidos só se mostraram sensíveis a partir da condição c3, apresentando variações relativas da ordem de 2,3 vezes o valor de referência.

Observa-se que os parâmetros obtidos no tempo já foram discutidos anteriormente, sendo novamente apresentados apenas para servir de referência de análise. Nota-se ainda que o parâmetro F_c não foi mostrado para dar lugar ao novo parâmetro R_{pic} , que foi utilizado como indicador do crescimento da falha na análise em frequência através dos espectros do envelope HFRT.

TABELA 6.4 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo e na frequência.

condição	Xrms (g)	Xpic (g)	Curtose Kt	Fator K (g)	Rpic HFRT
c1	0.2907	0.9223	2.8612	0.8301	4.0990
c2	0.3574	1.2608	2.9466	1.0530	4.0303
c3	0.3847	1.4588	3.4013	1.3090	4.7053
c4	0.8767	3.1631	3.2920	2.8840	5.8999
c5	1.2763	4.2710	3.2794	4.1857	7.2213
c6	1.9898	6.8578	3.3347	6.6359	7.9068
c7	2.1906	7.9555	3.7490	8.2106	8.5963
c8	2.9417	10.5783	3.6399	10.7040	8.9109

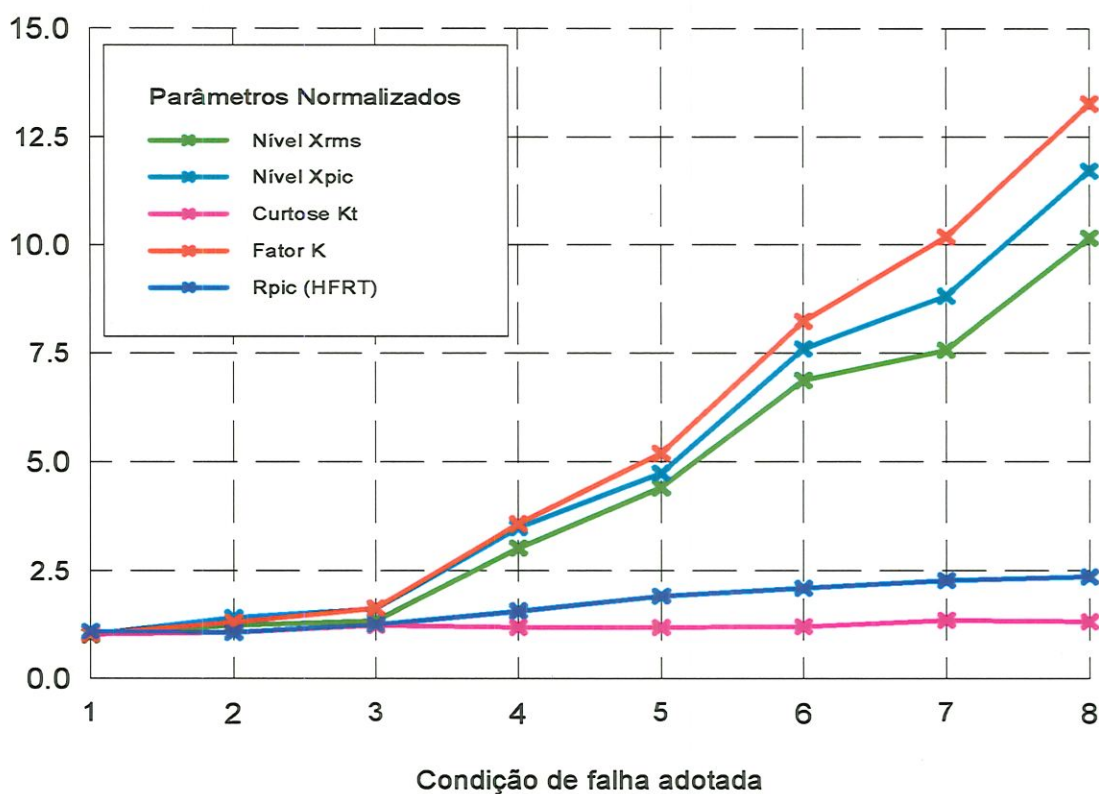


FIGURA 6.12 - Falha na pista externa: parâmetros no tempo e na frequência.

Análise Conjunta Tempo-Frequência

As FIGURAS 6.13 a 6.20 mostram as representações conjunta tempo-frequência através dos mapas PWVD obtidos de sinais de vibração medidos no tempo para oito condições de falhas introduzidas artificialmente na pista externa do rolamento de teste. Observa-se que estas figuras mostram num só gráfico todas as representações do sinal no tempo e em frequência, bem como a estrutura do mapa PWVD com suas amplitudes, visualizadas através da barra de cores, visando facilitar a análise e interpretação do fenômeno.

Analisando-se as FIGURAS 6.13 a 6.20 nota-se que os espectros FFT medidos para as diversas condições de falhas apresentam além da faixa de frequência de ressonância adotada pelo modelo, em torno de 1300 Hz, três faixas adicionais de ressonância nas frequências próximas de 750, 2300, 3300 e 4300 Hz. Isto mostra que na prática várias faixas de frequências de ressonância são excitadas pelos impactos devido à falha, o que pode dificultar a análise pelos métodos usuais. Entretanto, a partir dos mapas PWVD verifica-se que embora os impactos principais representados pelos “spots” de maior energia estejam mais concentrados na região da frequência central de ressonância, surgem impactos secundários de menor energia na forma de pequenas manchas em tons de azul claro, que podem revelar detalhes importantes sobre o surgimento e crescimento da falha. Para a condição do rolamento em bom estado (c1) verifica-se que estas manchas não apresentam uma estrutura definida e pode ser confundidas com ruídos. Porém a partir das condições de falhas iniciais c2 e c3, mesmo com o baixo nível de energia resultante dos impactos nas altas frequências, já é possível visualizar a presença de pequenas manchas repetidas na faixa de ressonância em torno de 4300 Hz. Nas demais condições de falhas as estruturas dos mapas PWVD apresentam “spots” mais definidos nas faixas de frequências de ressonância mais baixas, em torno de 750 e 1300 Hz, representando bem a repetição dos impactos que ocorrem devido à falha. Isto mostra de maneira inequívoca que os mapas PWVD são viáveis como técnica de predição, apresentando boa sensibilidade ao surgimento e crescimento de falhas em rolamentos.

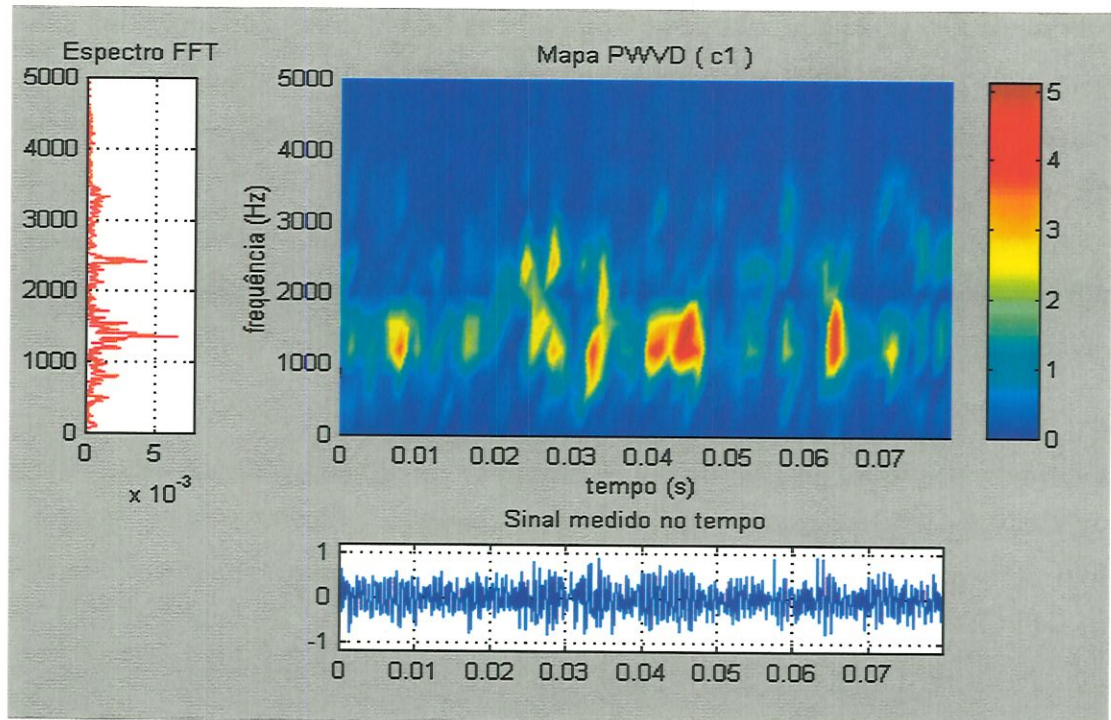


FIGURA 6.13 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c1.

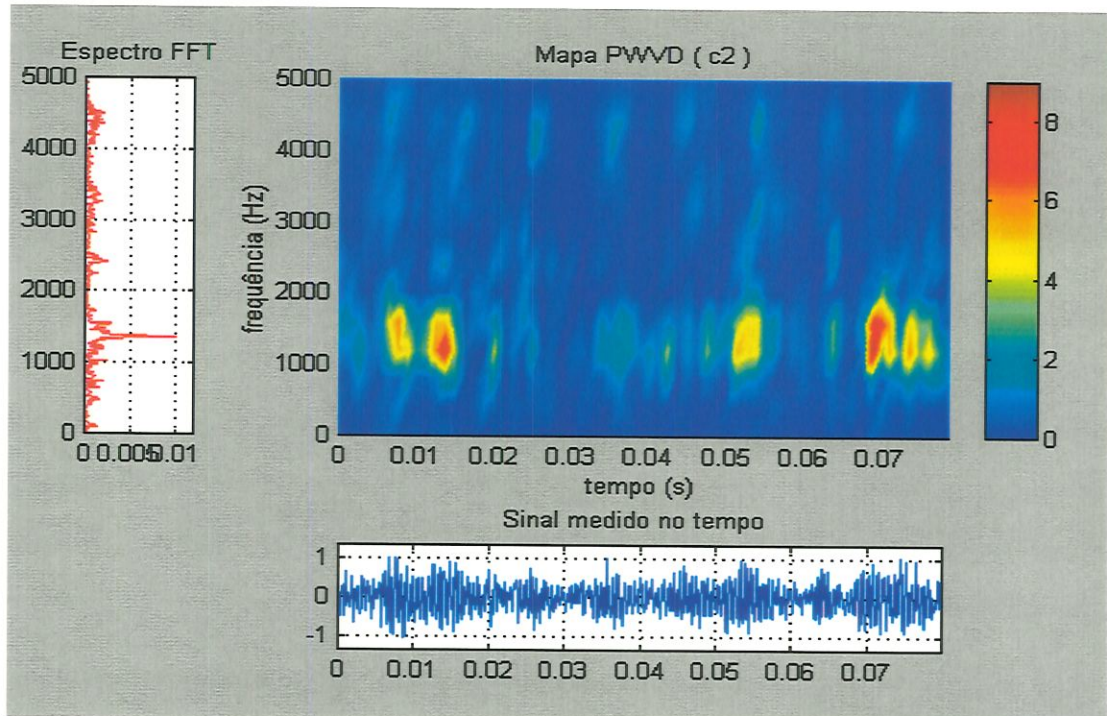


FIGURA 6.14 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c2.

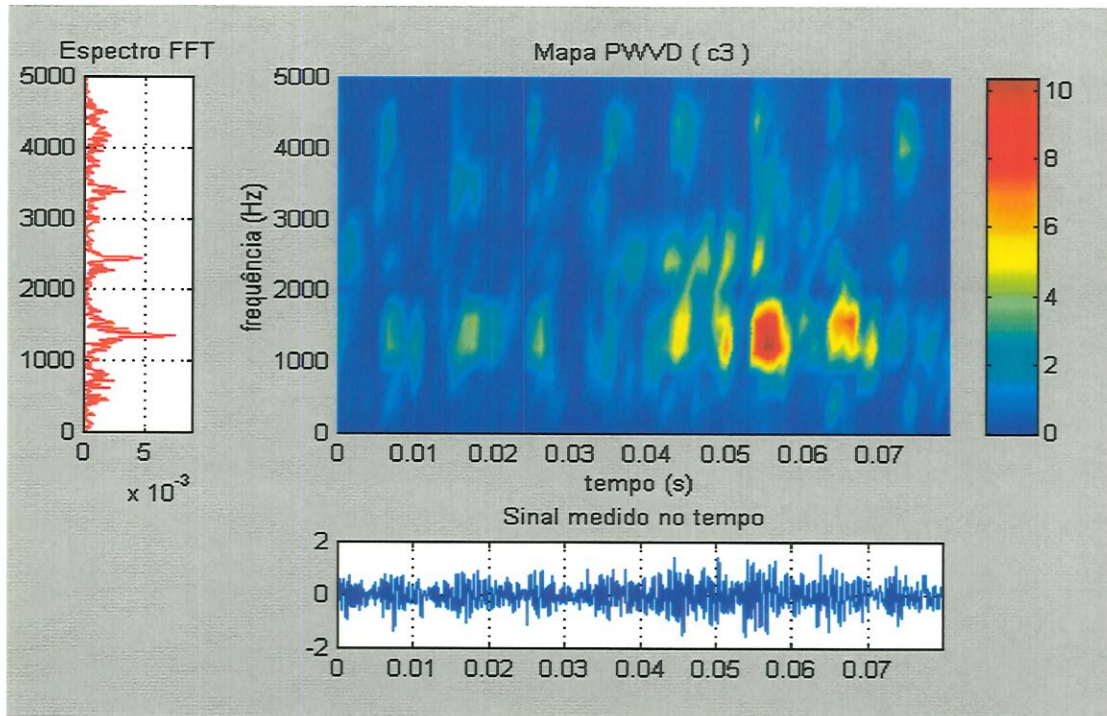


FIGURA 6.15 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c3.

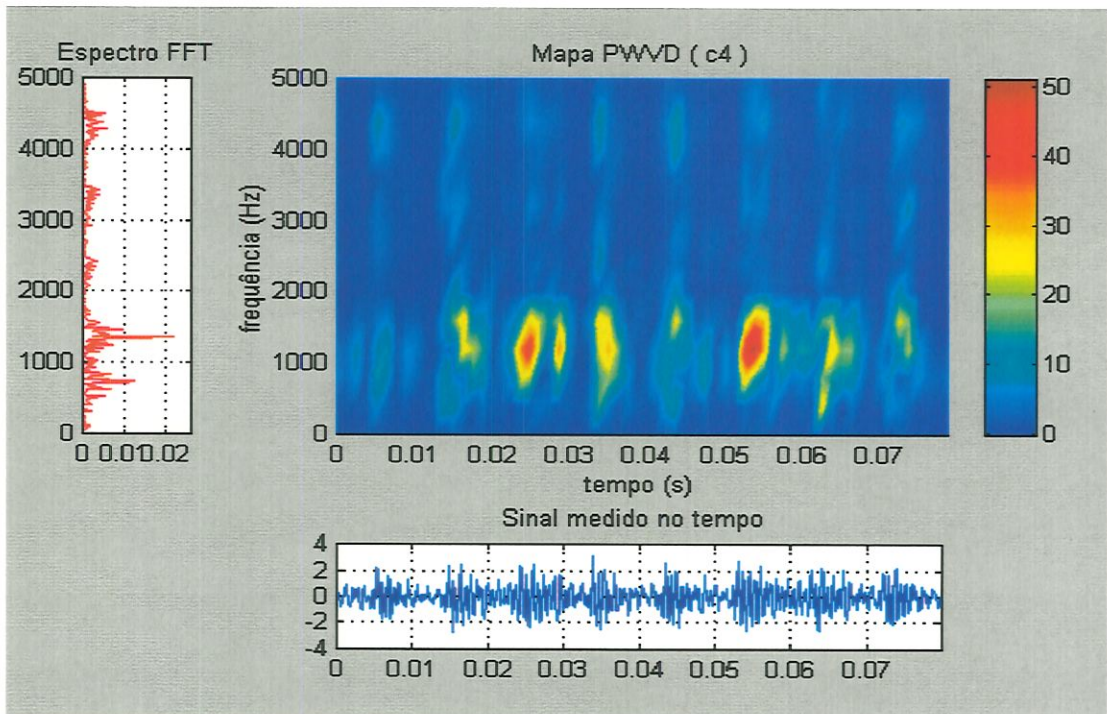


FIGURA 6.16 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c4.

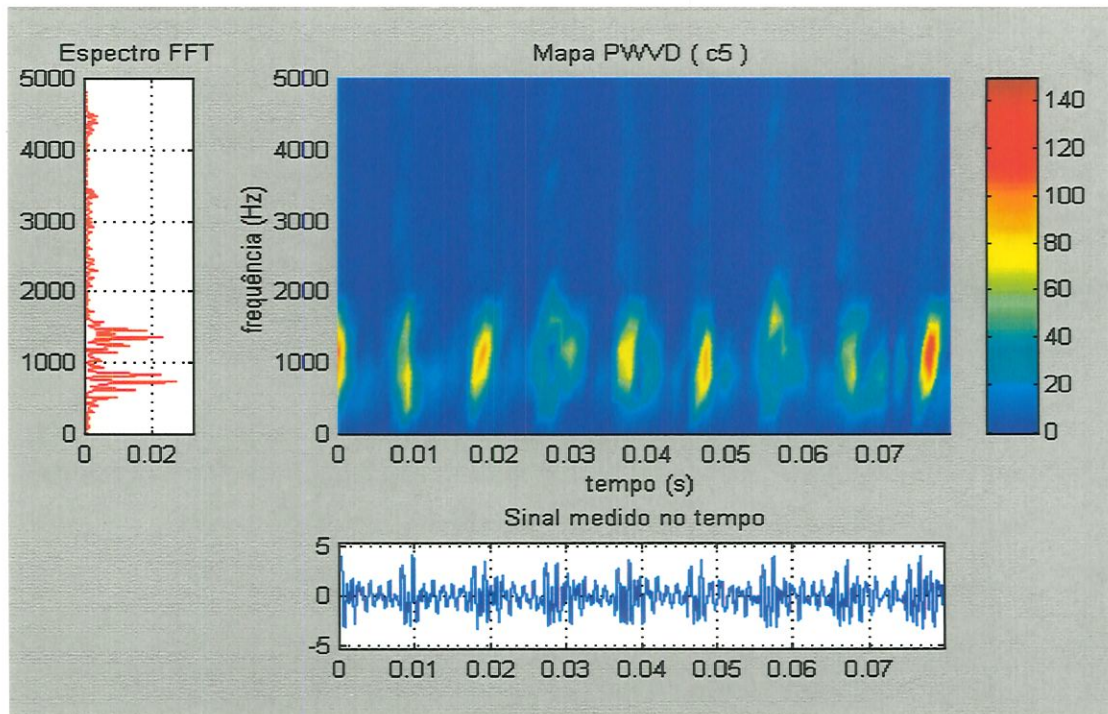


FIGURA 6.17 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c5.

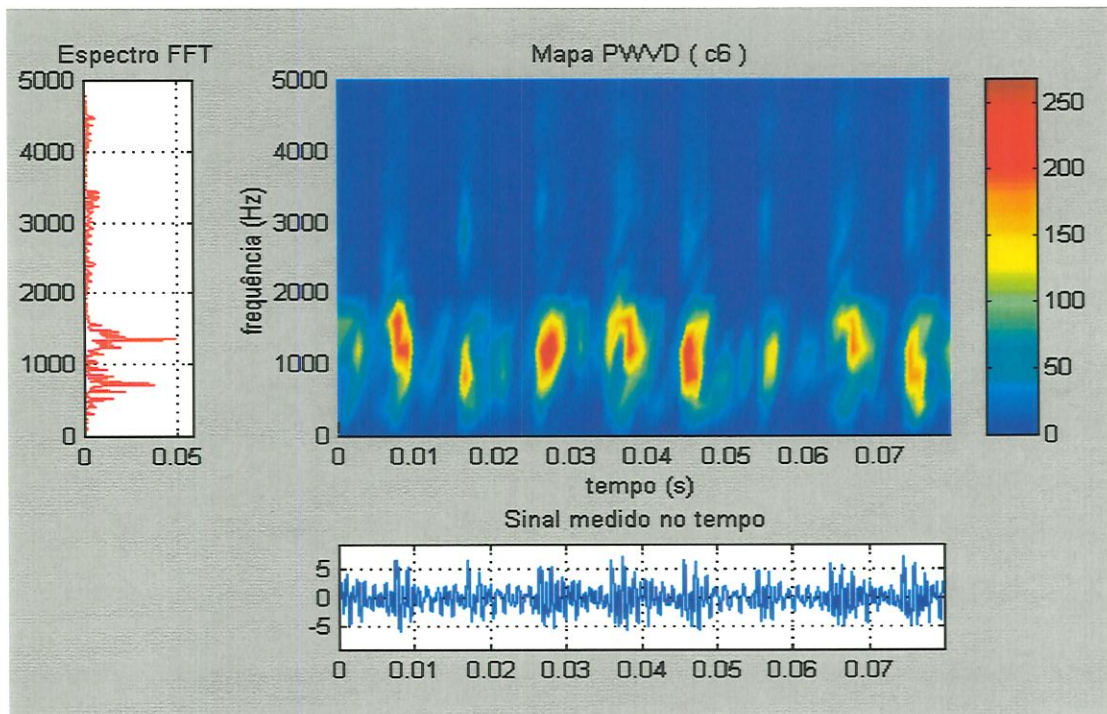


FIGURA 6.18 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c6.

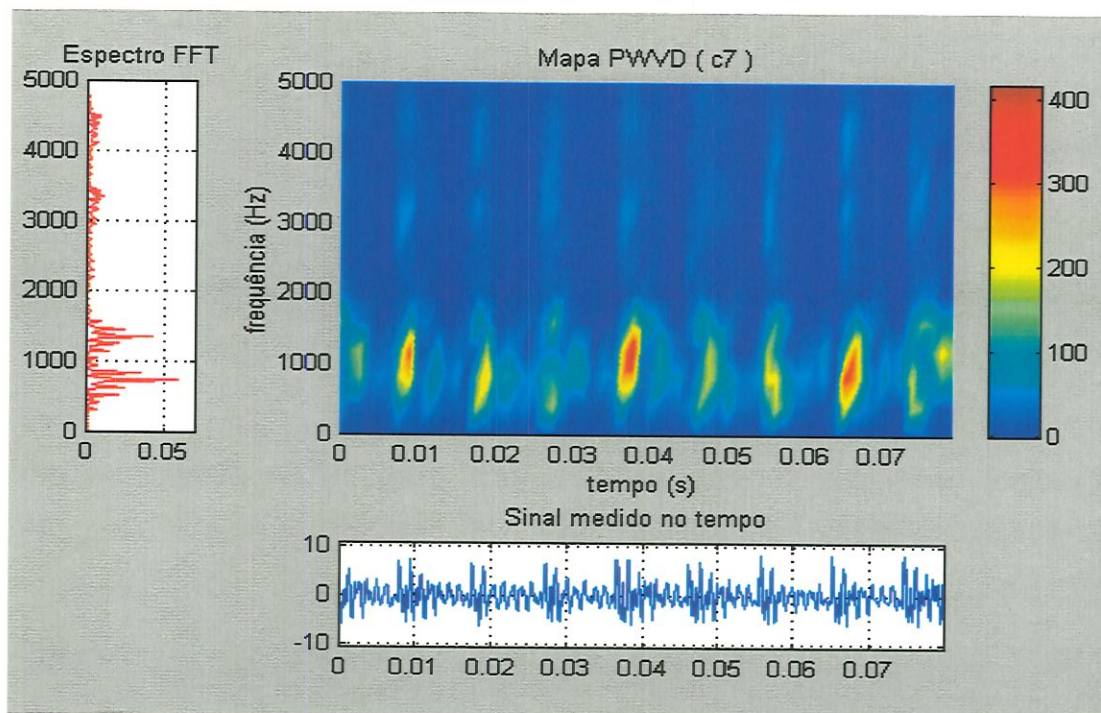


FIGURA 6.19 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c7.

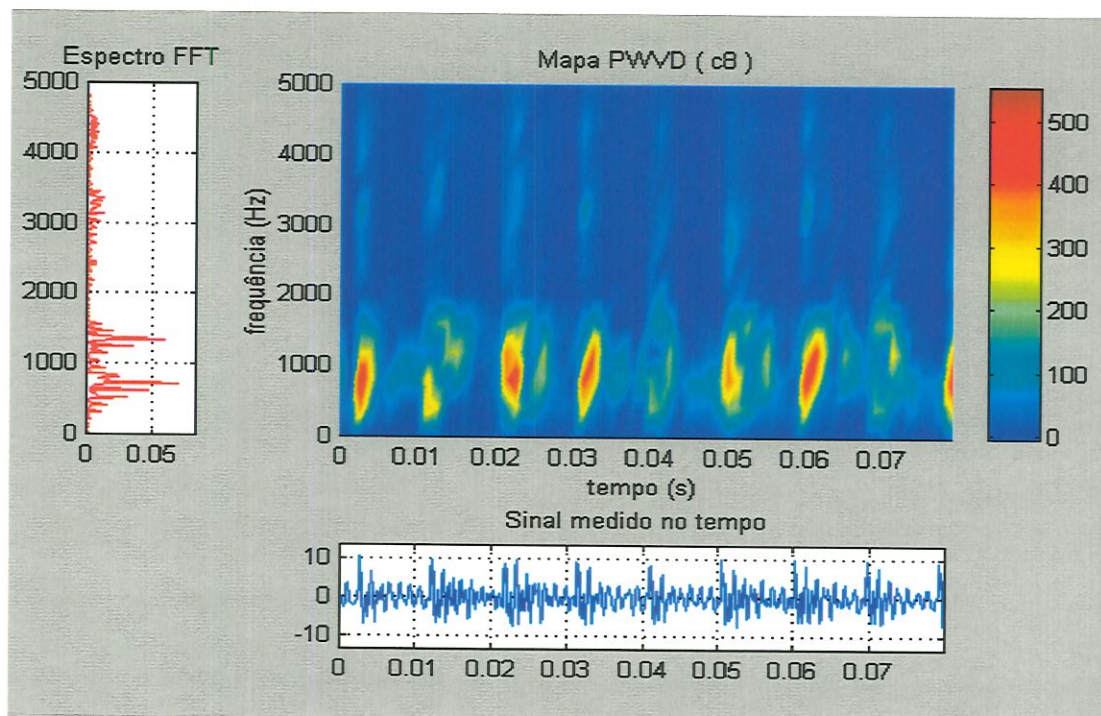


FIGURA 6.20 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c8.

A TABELA 6.5 e a FIGURA 6.21 mostram o comportamento geral dos parâmetros através das representações PWVD obtidos para as diversas condições de falhas introduzidas na pista externa do rolamento de teste.

TABELA 6.5 - Falha na pista externa: comparação de parâmetros.

condição	Xrms (g)	Xpic (g)	Fator K (g)	Rpic HFRT	Vrms PWVD
c1	0.2907	0.9223	0.8301	4.0990	2.5723
c2	0.3574	1.2608	1.0530	4.0303	2.8388
c3	0.3847	1.4588	1.3090	4.7053	3.2315
c4	0.8767	3.1631	2.8840	5.8999	7.0587
c5	1.2763	4.2710	4.1857	7.2213	15.6428
c6	1.9898	6.8578	6.6359	7.9068	33.0325
c7	2.1906	7.9555	8.2106	8.5963	47.6934
c8	2.9417	10.5783	10.7040	8.9109	70.2380

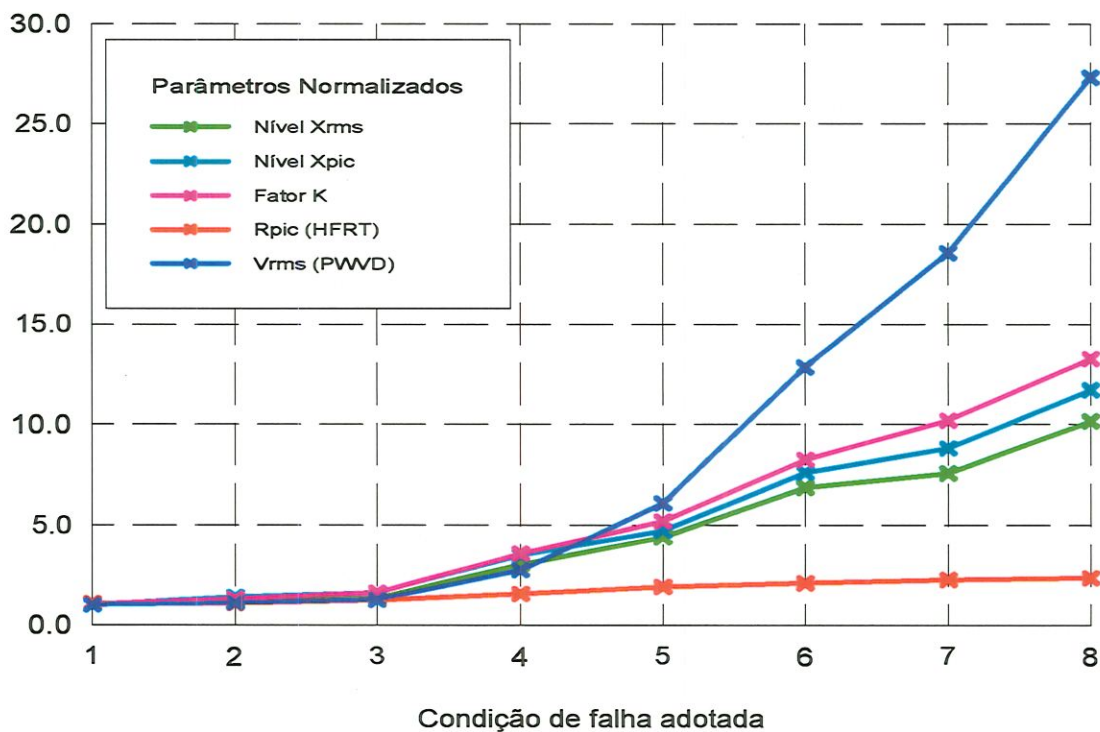


FIGURA 6.21 - Falha na pista externa: comparação de parâmetros.

Comparando-se os parâmetros das TABELAS 6.5 e 5.4 verifica-se que de uma forma geral as medidas experimentais apresentaram menor variação relativa que os valores obtidos do modelo. Dentre os parâmetros no domínio do tempo, o fator K e os níveis x_{pic} e x_{rms} seguiram bem o comportamento do modelo especialmente a partir da condição c4. No domínio da frequência, o parâmetro da razão de picos R_{pic} não apresentou boa sensibilidade, devido à pequena variação nos primeiros estágios de falha e tendência de estabilização nas condições mais severas. Quanto aos resultados obtidos através das representações PWVD, observa-se que no lugar da razão de picos T_{pic} , adotada anteriormente para os modelos de falhas simuladas, utilizou-se o parâmetro V_{rms} que se mostrou mais adequado para as medidas experimentais. Esta escolha se deve ao fato que os valores de pico da distribuição PWVD apresentaram pouca variação em relação aos valores das amplitudes médias medidas. O surgimento de faixas adicionais de frequências de ressonâncias excitadas pelos impactos causa uma redistribuição da energia no plano tempo-frequência, favorecendo o crescimento das amplitudes médias. Portanto, o indicador V_{rms} , que representa o nível x_{rms} dos picos das PWVD ao longo do eixo do tempo, se mostrou eficiente e sempre crescente, especialmente para as condições de falhas mais severas, indicando efetivamente o crescimento da falha.

Introdução de Falhas na Pista Interna

Seguindo o mesmo procedimento anterior, foram introduzidas falhas do tipo riscos transversais na pista interna do rolamento de teste, representando oito condições de falhas distintas conforme os dados da TABELA 6.2. Observa-se que os sinais de vibração foram medidos na superfície do rolamento de testes de modo a permitir analisar o efeito do meio de transmissão entre a localização da falha e o ponto de medida. Os resultados são comparados com o modelo de falha na pista interna, conforme descrito no capítulo 5.

Análise no Domínio do Tempo

A FIGURA 6.22 mostra uma das seqüências de blocos dos sinais medidos no domínio do tempo para as diversas condições de falhas adotadas, onde as medidas foram realizadas utilizando a mesma instrumentação e dados da TABELA 5.1, visando a comparação dos dados coletados com os resultados dos modelos de falha na pista interna, apresentados no capítulo anterior.

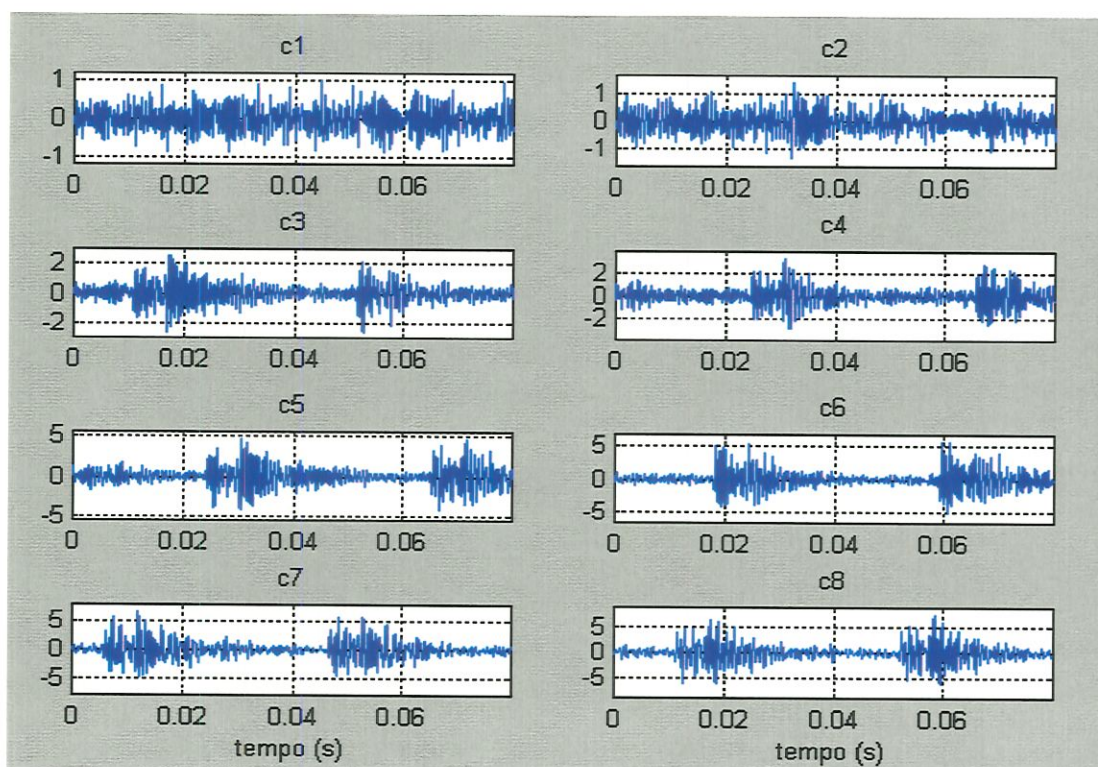


FIGURA 6.22 - Falha na pista interna: sinais medidos no tempo.

Comparando-se as FIGURAS 6.22 e 5.19 observa-se que os sinais medidos apresentaram menor variação das amplitudes e maior efeito de amortecimento que os sinais obtidos a partir do modelo. Os sinais medidos mostram claramente o período entre dois impactos principais, relativo à frequência de rotação, porém não é possível distinguir a separação entre os impactos secundários resultantes da passagem das esferas sobre a falha. Este fato pode confundir o analista quanto à natureza e à localização da falha.

A TABELA 6.6 e a FIGURA 6.23 mostram o comportamento dos parâmetros no domínio do tempo, obtidos a partir do valor médio de cinco blocos de sinais medidos diretamente do sistema de aquisição.

TABELA 6.6 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo.

condição	Xrms (g)	Xpic (g)	Fator Fc	Curtose Kt	Fator K (g)
c1	0.2907	0.9223	3.1745	2.8612	0.8301
c2	0.3338	1.1846	3.5452	3.1056	1.0367
c3	0.5304	2.3836	4.5059	5.0001	2.6456
c4	0.6591	3.3629	5.1111	6.4997	4.2794
c5	1.1009	4.8012	4.3612	4.9468	5.4445
c6	1.2088	6.1764	5.0994	5.8601	7.0685
c7	1.4392	7.0324	4.8907	6.0328	8.6699
c8	1.6781	7.6967	4.5915	5.9793	10.0390

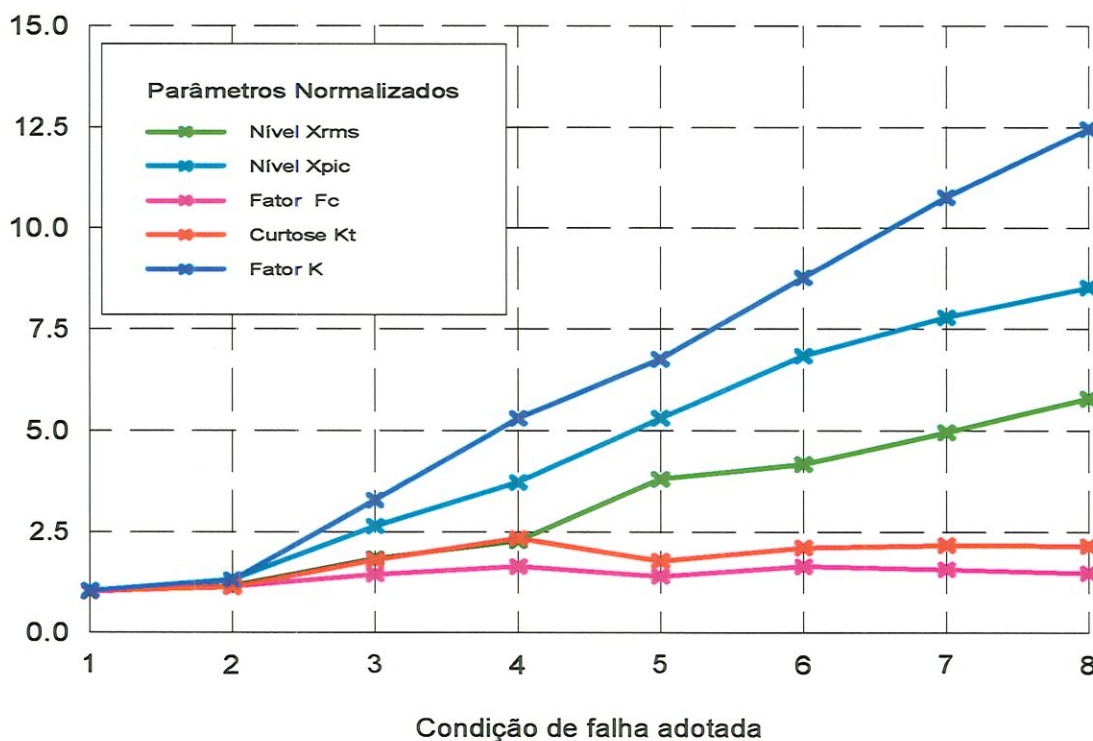


FIGURA 6.23 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo.

Comparando-se as FIGURAS 6.23 e 5.20 verifica-se que embora os parâmetros obtidos das medidas experimentais mostraram menor variação relativa que os resultados obtidos nos modelos, o comportamento das curvas apresentam boa coerência, mantidas as devidas proporções. Os níveis x_{pic} e o fator K medidos se mostraram até mais eficientes, com variação significativa já a partir da condição c3, enquanto que os valores do modelo apresentaram crescimento suave nesta condição. Por outro lado, os fatores de crista F_c e o fator de curtose K_t , aqui também não apresentaram bons resultados, não indicando crescimento da falha para condições mais severas.

Análise no Domínio da Frequência

A FIGURA 6.24 mostra os espectros calculados via FFT obtidos a partir dos sinais medidos no tempo, representados na FIGURA 6.22, para falhas introduzidas na pista interna do rolamento de teste.

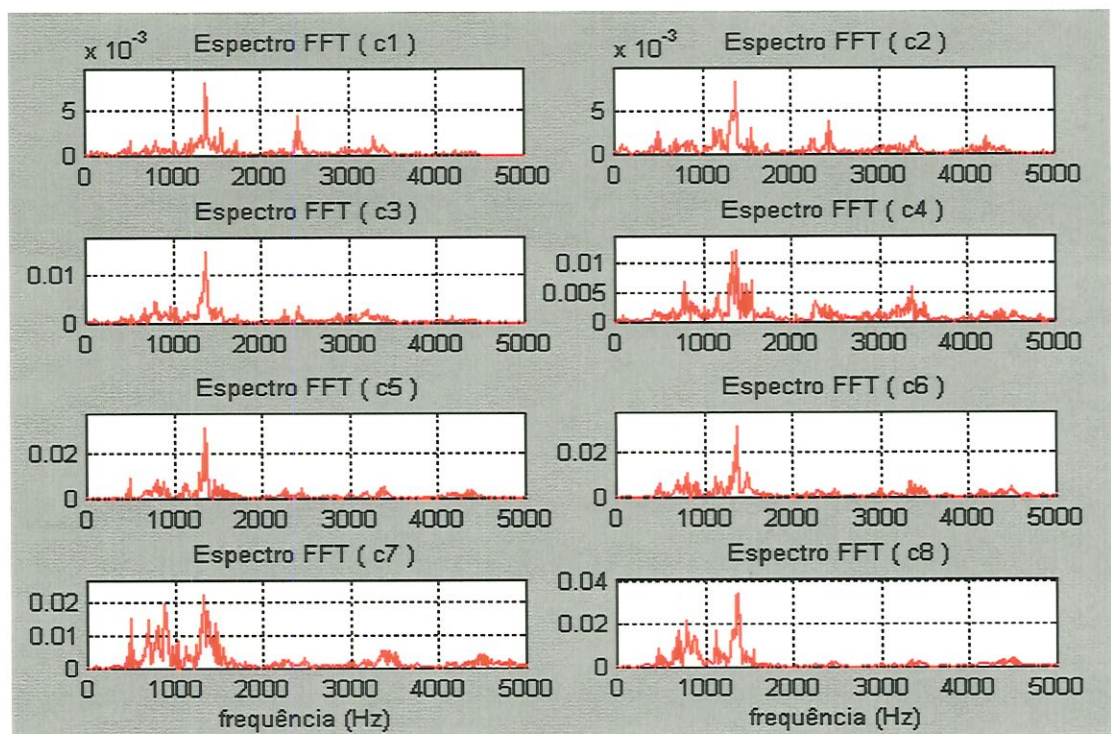


FIGURA 6.24 - Espectros FFT dos sinais em frequência.

Analisando os espectros da FIGURA 6.24 obtidos via FFT também é possível visualizar as várias faixas de frequências de ressonâncias estruturais do sistema, bem como a sua variação espectral para as diversas condições ou estágios de falhas, conforme já observado na análise da FIGURA 6.10, para o caso de falha na pista externa.

A FIGURA 6.25 apresenta os espectros FFT e HFRT obtidos para quatro condições de falhas introduzidas na pista interna do rolamento, onde adota-se a mesma faixa de frequência de filtragem anterior. Comparando-se as FIGURAS 6.25 e 5.21 observa-se que os espectros FFT medidos apresentam padrões distintos dos espectros FFT do modelo, que apresentam densidade espectral apenas na região da frequência central de ressonância $f_c = 1300$ Hz. Os espectros dos envelopes HFRT medidos não seguiram precisamente o modelo, embora seja possível destacar o pico relacionado com a frequência de rotação. A frequência característica do defeito f_d não é identificada facilmente, devido às baixas amplitudes do espectro nesta região.

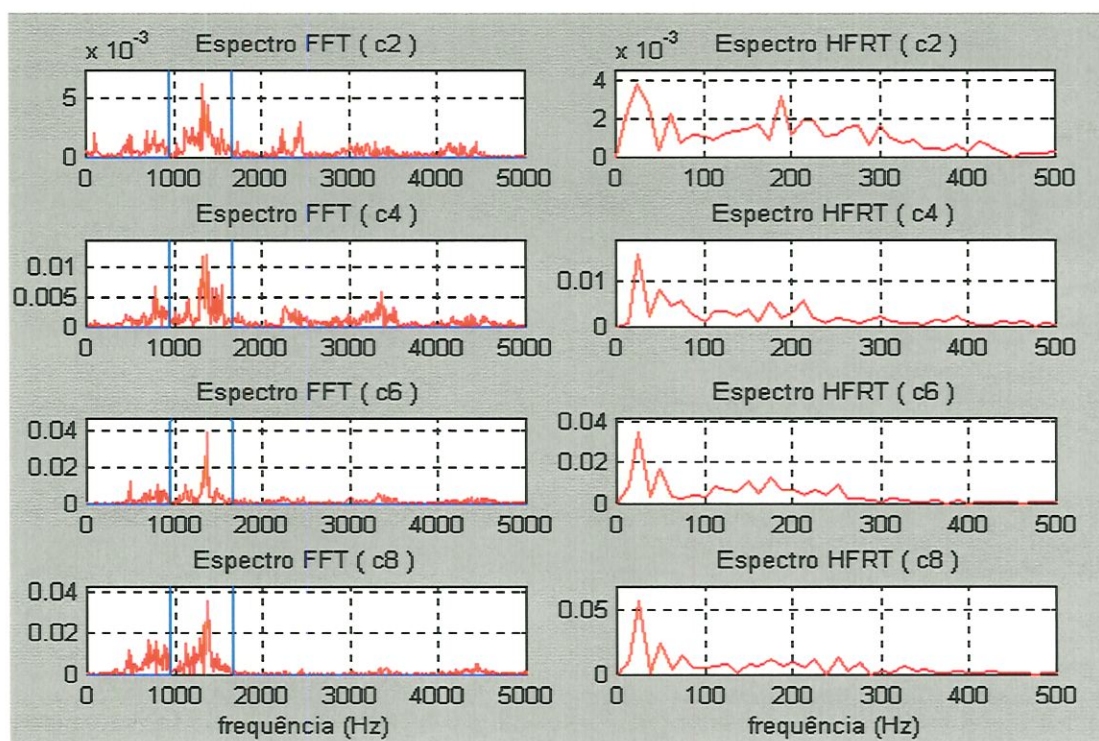


FIGURA 6.25 - Espectros FFT e HFRT filtrados em frequência.

A TABELA 6.7 e a FIGURA 6.26 mostram o comportamento dos parâmetros obtidos no domínio do tempo e da frequência para as diversas condições de falhas introduzidas na pista interna do rolamento.

TABELA 6.7 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo e na frequência.

condição	Xrms (g)	Xpic (g)	Curtose Kt	Fator K (g)	Rpic HFRT
c1	0.2907	0.9223	2.8612	0.8301	3.0356
c2	0.3338	1.1846	3.1056	1.0367	3.4372
c3	0.5304	2.3836	5.0001	2.6456	3.3953
c4	0.6591	3.3629	6.4997	4.2794	3.6061
c5	1.1009	4.8012	4.9468	5.4445	3.7212
c6	1.2088	6.1764	5.8601	7.0685	3.7896
c7	1.4392	7.0324	6.0328	8.6699	3.7688
c8	1.6781	7.6967	5.9793	10.0390	3.8505

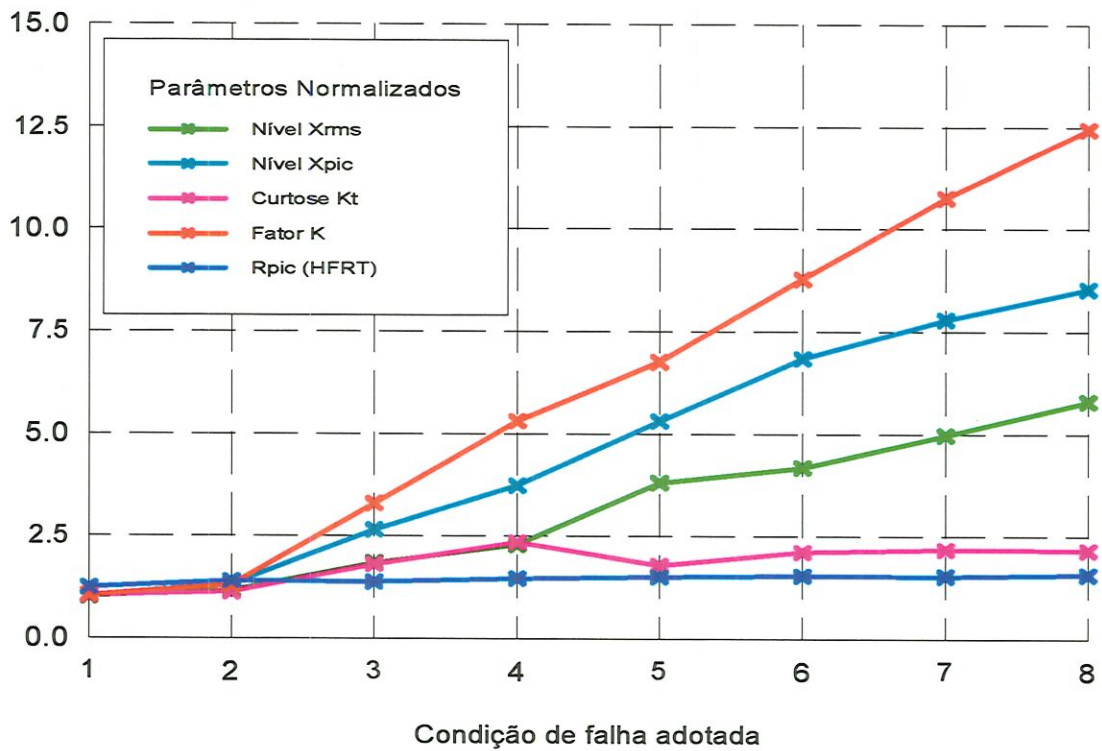


FIGURA 6.26 - Falha na pista interna: parâmetros no tempo e na frequência.

Comparando-se as FIGURAS 6.26 e 5.22 observa-se que a razão de picos R_{pic} medida não apresentou variação sensível capaz de detectar o crescimento da falha, seguindo o comportamento previsto no modelo. Entretanto não se mostra adequada como indicativo do crescimento da falha, devido à localização dos picos relacionados com a frequência característica do defeito se encontrar na região de baixas amplitudes em relação ao pico principal, dificultando a detecção e localização da falha. Também a faixa de análise escolhida (0 a 20 kHz) influenciou nos resultados, devido à baixa resolução em frequência obtida, conforme já discutido anteriormente.

Análise Conjunta Tempo-Frequência

As FIGURAS 6.27 a 6.34 mostram as representações conjunta tempo-frequência através dos mapas PWVD obtidos a partir de oito blocos de sinais no tempo para as diversas condições de falhas introduzidas na pista interna. Para uma condição de falha incipiente (c2), não é possível distinguir bem os impactos resultantes da falha. Observa-se entretanto que o mapa PWVD apresenta uma estrutura que mostra uma maior concentração de energia na região próxima de 0,032 s, devido a um impacto principal resultante da passagem das esferas sobre a falha dentro da zona de carga. Junto do “spot” principal visualiza-se duas outras manchas em tons de amarelo, que podem estar relacionadas com os impactos secundários. Porém é difícil de tirar conclusões nesta fase, devido à presença de ruídos. Analisando as condições de falhas mais severas (c3 a c8), observa-se que a estrutura resultante é mais definida permitindo uma avaliação confiável do tipo e localização da falha.

Comparando-se as FIGURAS 6.27 a 6.34 com as FIGURAS 5.23 a 5.30 verifica-se que as estruturas dos mapas PWVD obtidos das medidas experimentais se mostraram bastante coerentes com os mapas obtidos do modelo de falha na pista interna. Destaca-se que nas condições de falhas mais severas os mapas PWVD mostram os impactos principais separados pela frequência de rotação, bem como alguns impactos secundários, que permitem o cálculo da frequência característica do defeito.

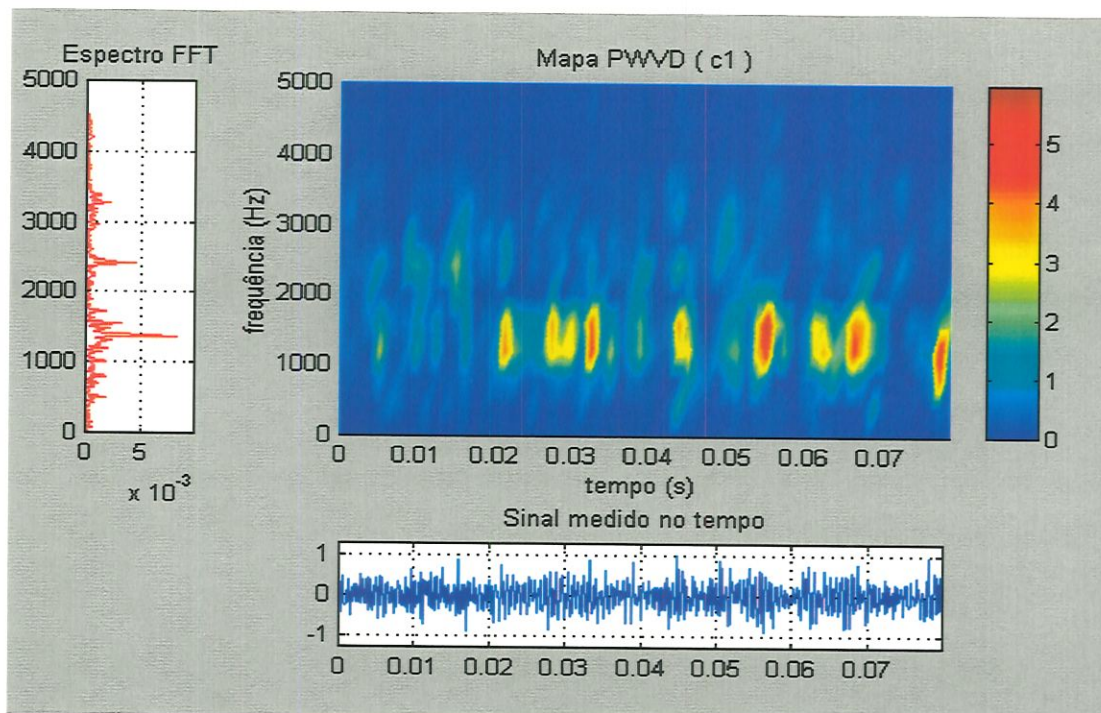


FIGURA 6.27 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c1.

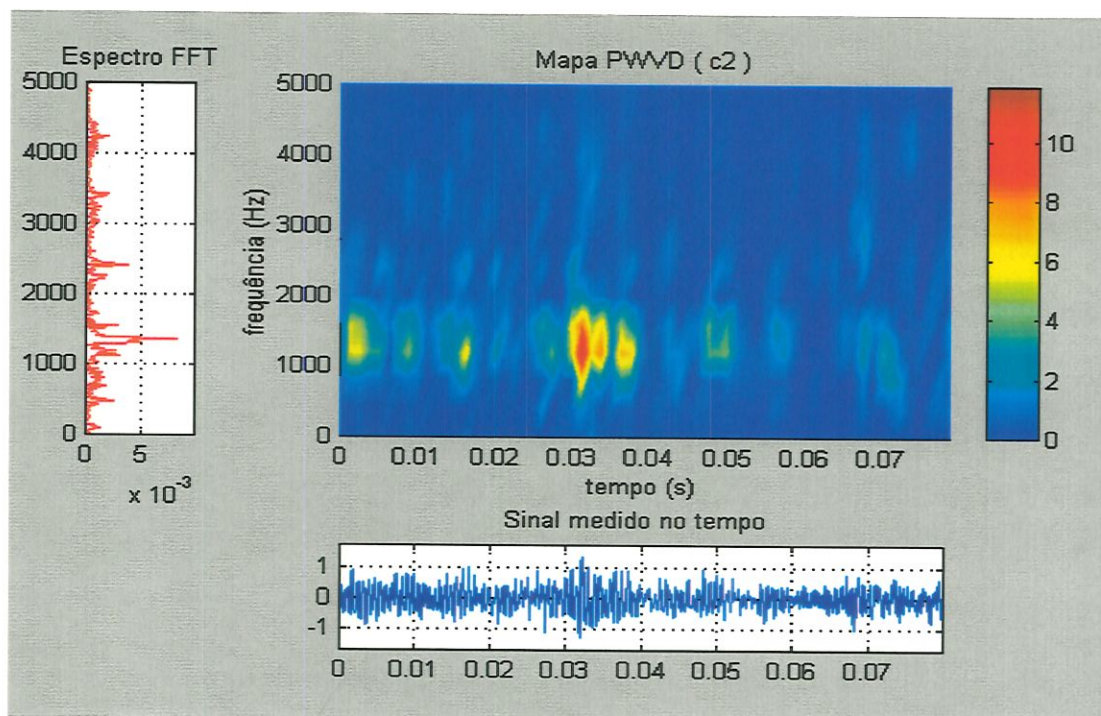


FIGURA 6.28 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c2.

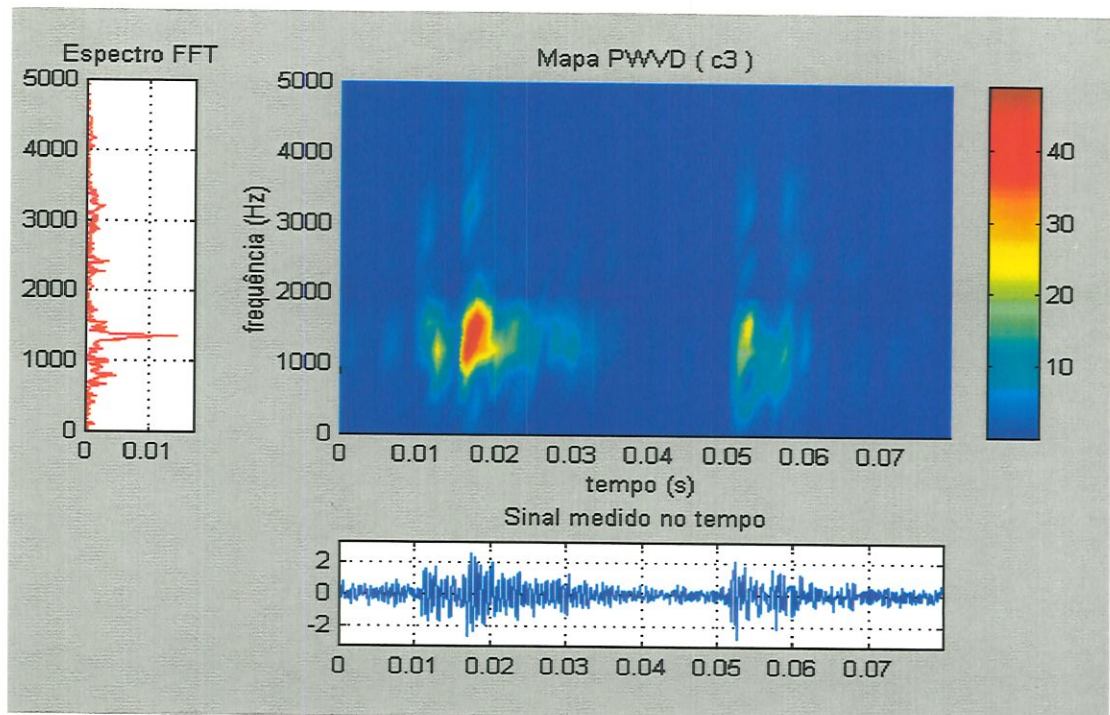


FIGURA 6.29 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c3.

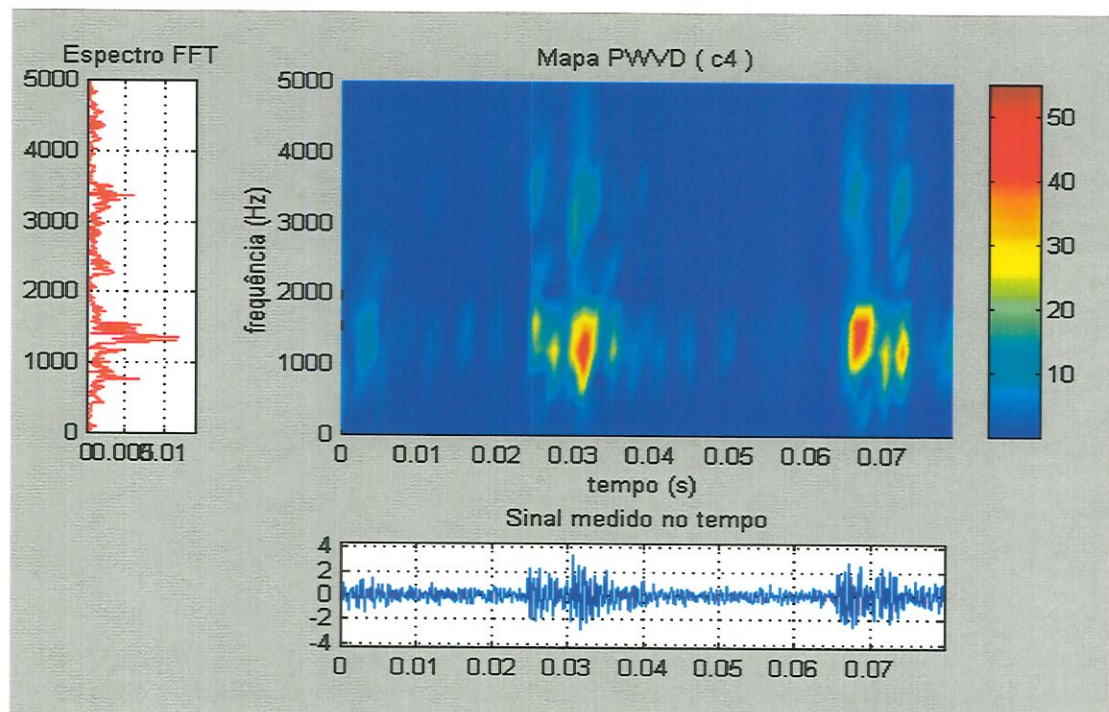


FIGURA 6.30 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c4.

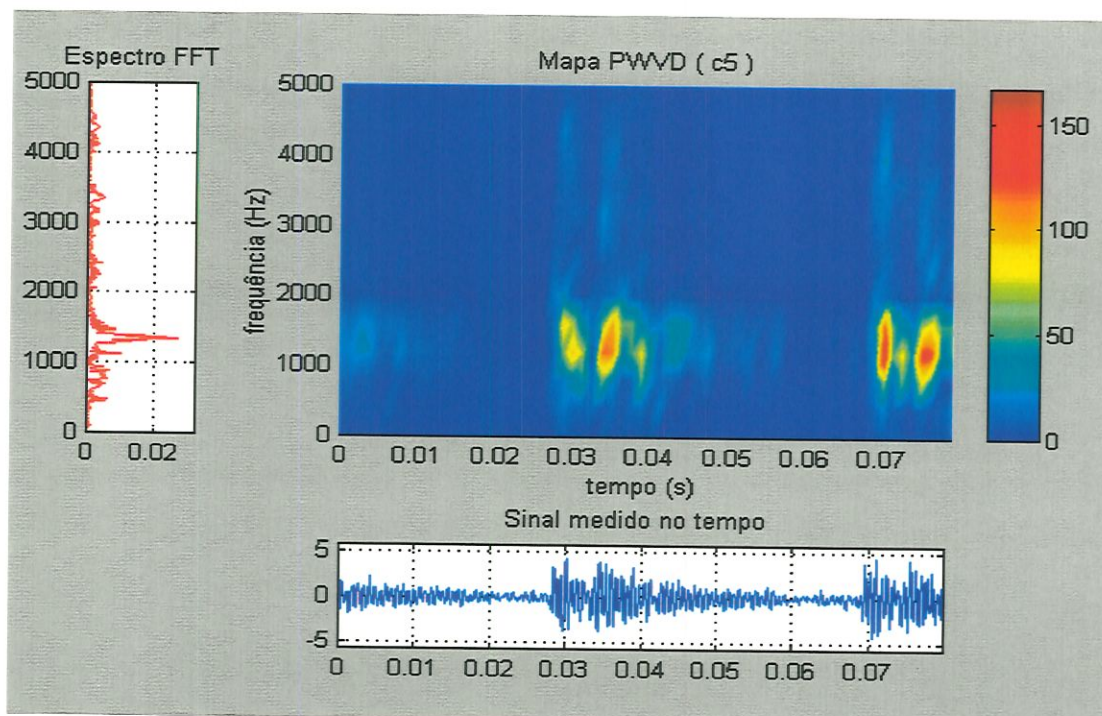


FIGURA 6.31 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c5.

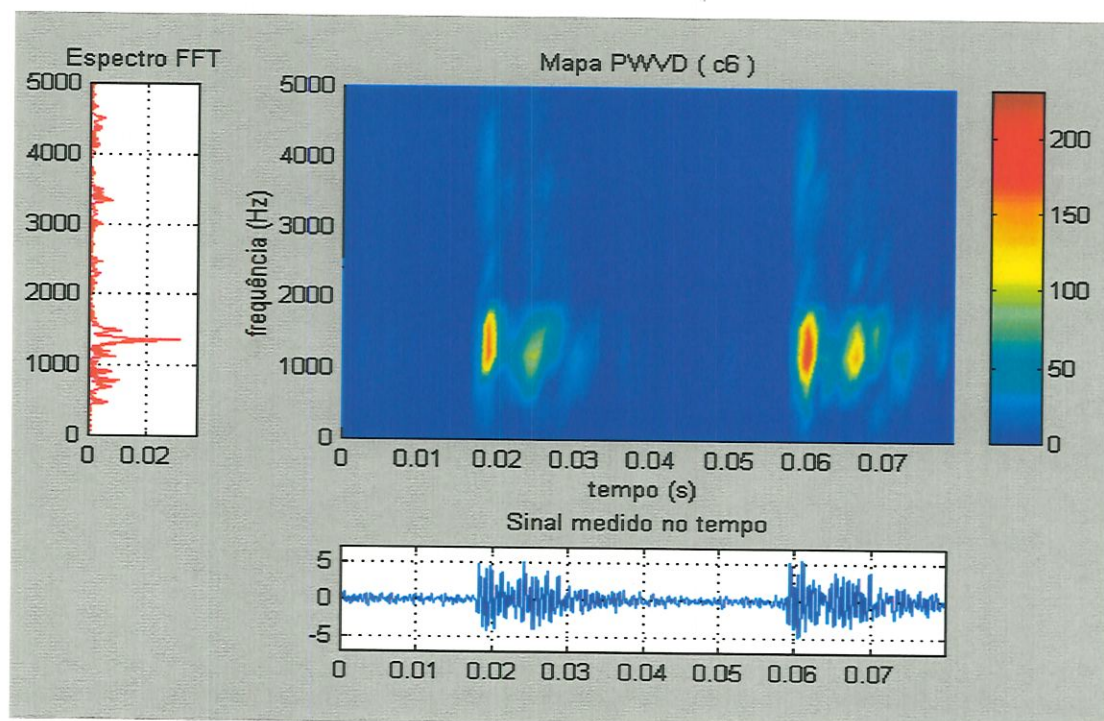


FIGURA 6.32 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c6.

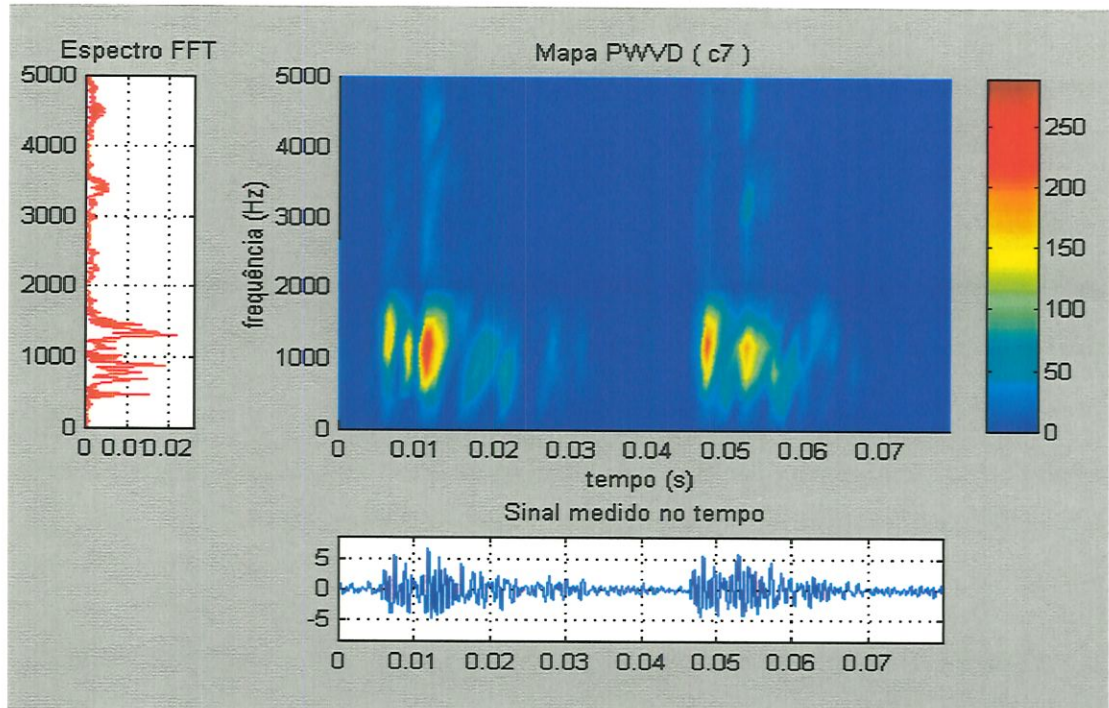


FIGURA 6.33 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c7.

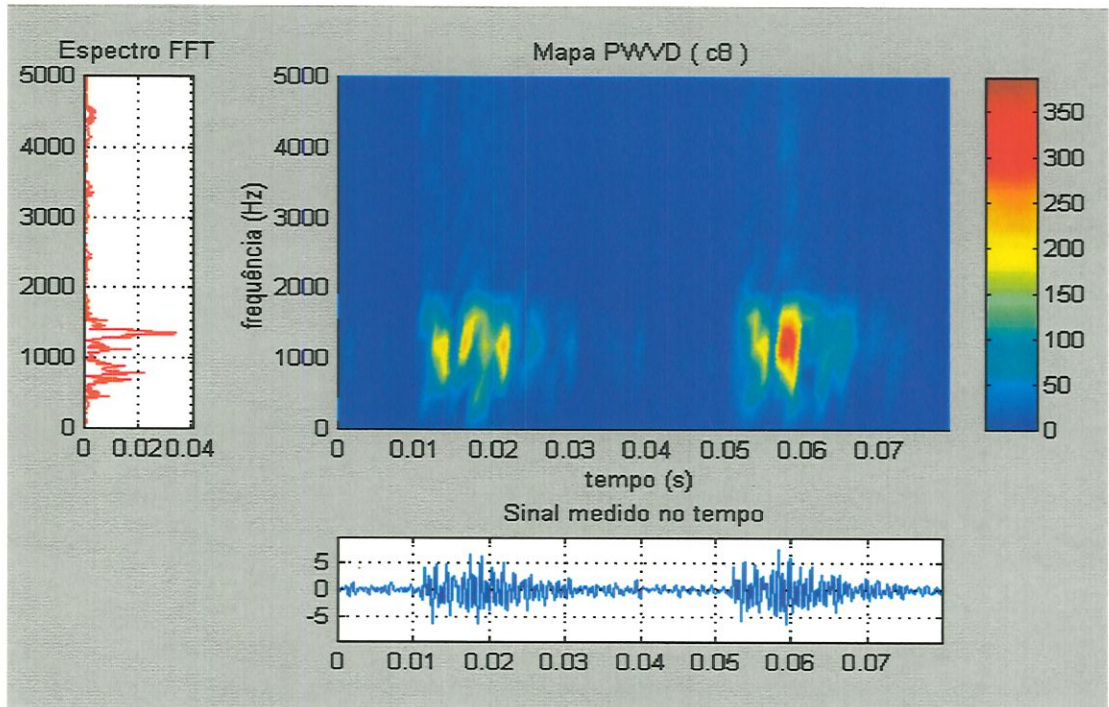


FIGURA 6.34 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c8.

A TABELA 6.8 e a FIGURA 6.35 mostram o comportamento geral dos parâmetros obtidos através de medidas no rolamento com falha introduzida na pista interna, para as diversas condições testadas.

TABELA 6.8 - Falha na pista interna: comparação de parâmetros.

condição	Xrms (g)	Xpic (g)	Fator K (g)	Rpic HFRT	Vrms PWVD
c1	0.2907	0.9223	0.8301	3.0356	2.5723
c2	0.3338	1.1846	1.0367	3.4372	2.7030
c3	0.5304	2.3836	2.6456	3.3953	5.5130
c4	0.6591	3.3629	4.2794	3.6061	9.1425
c5	1.1009	4.8012	5.4445	3.7212	17.9000
c6	1.2088	6.1764	7.0685	3.7896	25.8040
c7	1.4392	7.0324	8.6699	3.7688	33.6466
c8	1.6781	7.6967	10.0390	3.8505	44.8342

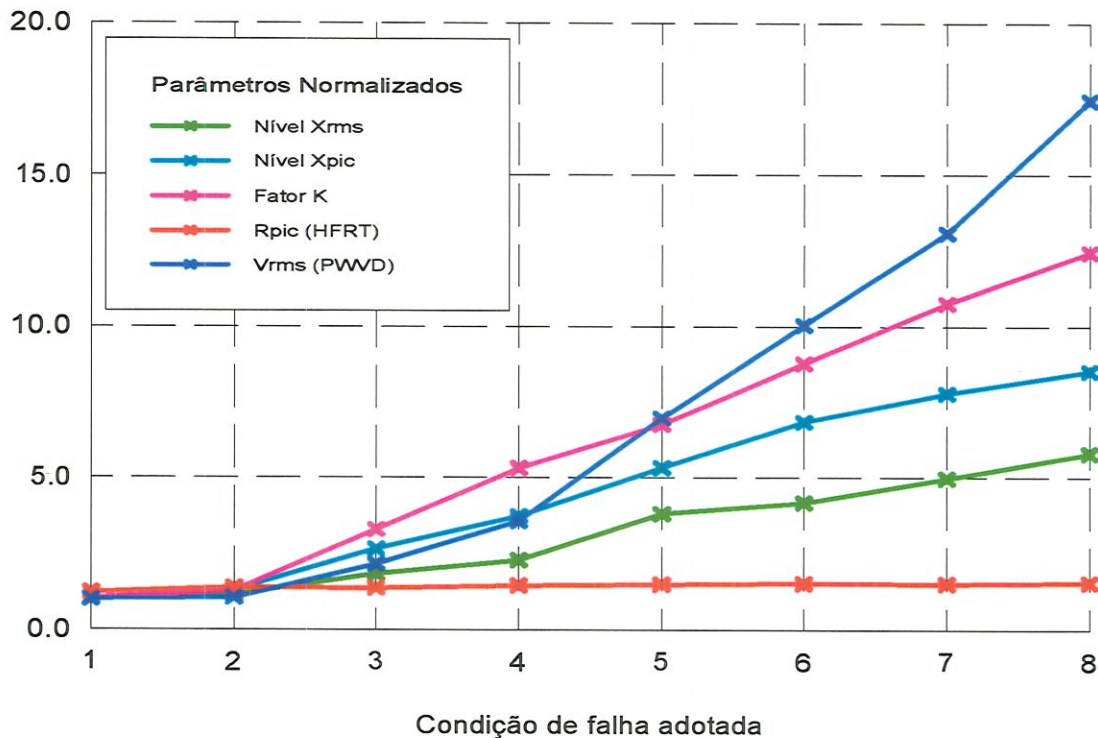


FIGURA 6.35 - Falha na pista interna: comparação de parâmetros.

Comparando-se as FIGURAS 6.35 e 5.31 observa-se que o novo parâmetro V_{rms} utilizado para indicar o crescimento da falha através das medidas experimentais apresenta desempenho idêntico à razão de picos T_{pic} aplicada nos modelos, sendo que nas condições mais severas o nível V_{rms} foi até mais eficiente. Em relação aos demais parâmetros obtidos no domínio do tempo, observa-se que o nível V_{rms} mostra melhor a distribuição de energia do sinal, evidenciando mais os picos resultantes dos impactos gerados pela falha e minimizando o efeito do ruído presente nas medidas.

6.5 ENSAIOS DE LONGA DURAÇÃO

Condições Gerais Adotadas

Com o objetivo de investigar o desempenho dos métodos de análise conjunta tempo-frequência através da PWVD em condições reais de trabalho, foram realizados alguns ensaios experimentais de longa duração utilizando condições de testes que forçam o surgimento de falhas em rolamentos de forma mais acelerada que em condições normais de trabalho. Esta fase da pesquisa envolveu a medição diária e o registro dos sinais de vibração desde a colocação do banco de ensaios em funcionamento com a montagem de rolamentos novos, onde o nível vibratório é baixo e corresponde à resposta de um sistema rotativo em operação normal, até atingir situações consideradas críticas com tamanhos de falhas bastante severas, o que exigiu a parada do equipamento para caracterização das falhas no rolamento.

Quanto ao sistema de monitoramento adotado, foram escolhidas condições de testes que simulam o funcionamento normal de uma máquina trabalhando em regime de 12 horas diárias, com velocidade de rotação de $f_s = 1500$ rpm (25 Hz), e sujeita a uma carga radial constante $F_r = 4300$ N (440 Kgf) sobre o rolamento de teste. Esta carga foi obtida através da colocação de massas calibradas (total de 80 kg) suportadas na extremidade da barra articulada com o rolamento de teste. A partir destes valores foram feitas estimativas da vida útil dos rolamentos de teste (ZKL 6204) e de

apoios (SKF 2207-K), seguindo as especificações dos fabricantes, conforme mostra a TABELA 6.9. No cálculo das reações de forças nos apoios do sistema foram obtidos os valores de $0,43 F_r$ e $1,47 F_r$, para as cargas atuantes nos rolamentos de apoio direito e esquerdo, respectivamente, onde adotou-se para os cálculos o valor obtido do rolamento mais solicitado. Portanto, durante os ensaios este rolamento está sujeito ao desenvolvimento de falhas, razão pela qual também foram feitas medidas neste rolamento.

TABELA 6.9 – Especificações e estimativa de vida útil dos rolamentos.

Especificações Gerais	Parâmetros	Valor adotado
Frequência de rotação do eixo	f_s	1500 rpm
Carga estática aplicada no rolamento de teste (ZKL 6204)	F_r	4300 N
Capacidades de carga estática e dinâmica do rolamento de teste (ZKL 6204)	C_o	6553 N
	C	12774 N
Vida útil do rolamento de teste	L_h	~ 251 h
Carga estática aplicada no rolamento de apoio (SKF 2207-K)	$1,47 F_r$	6321 N
Capacidades de carga estática e dinâmica do rolamento de apoio (SKF 2207-K)	C_o	8800 N
	C	30700 N
Vida útil do rolamento de apoio	L'_h	~ 1273 h

A TABELA 6.10 mostra os valores das frequências características de defeitos calculadas para os dois tipos de rolamentos utilizados a partir das equações 3.8 e 3.10. Observa-se que a maior frequência de interesse não chega a 200 Hz, o que permite a utilização de uma faixa de análise mais baixa, visando a melhoria da resolução em frequência para a aplicação da técnica do envelope HFRT. Por outro lado, pretende-se mostrar o efeito da redução da resolução no tempo nas representações conjunta tempo-frequência.

TABELA 6.10 – Frequências características de defeitos.

Frequências Características	Parâmetros	Valor adotado
Frequência de rotação do eixo	f_s	25 Hz
Freq. de defeito na pista externa, rolamento de teste (ZKL 6204)	$f_e = 3,04 f_s$	76,2 Hz
Freq. de defeito na pista interna, rolamento de teste (ZKL 6204)	$f_i = 4,95 f_s$	123,8 Hz
Freq. de defeito na pista externa, rolamento de apoio (SKF 2207-K)	$f'_e = 4,71 f_s$	117,75 Hz
Freq. de defeito na pista interna, rolamento de apoio (SKF 2207-K)	$f'_i = 7,29 f_s$	182,25 Hz

Procedimentos e Parâmetros de Análise

Seguindo o procedimento apresentado no diagrama da FIGURA 6.7, a fase de processamento e análise dos sinais de vibração medidos no banco de ensaios utiliza os mesmos parâmetros indicadores normalizados para a avaliação da condição do elemento nos diversos estágios de falhas. Nesta análise, adotaram-se apenas os cinco parâmetros que evidenciaram melhor a detecção e o crescimento de falhas durante os ensaios com falhas artificialmente induzidas: x_{rms} , x_{pic} , K , R_{pic} , e V_{rms} .

As medidas foram realizadas diariamente visando-se não perder informações relevantes devido às pequenas mudanças no estado dos rolamentos, o que resultou num volume muito grande de dados coletados. Dentre estes dados, foram selecionados algumas sequências de blocos de sinais que representam situações típicas de transição entre um estágio de funcionamento normal, relativo ao rolamento em bom estado, e outras fases subsequentes, relativas ao surgimento e desenvolvimento de falhas ao longo do tempo. As medidas foram realizadas através da aquisição de cinco blocos de sinais no tempo, sob as mesmas condições de carga e rotação. A escolha

de uma segunda faixa de análise foi feita com o objetivo de melhorar a resolução em frequência dos espectros obtidos pela técnica do envelope HFRT, e permitir a comparação com o método PWVD, embora numa situação de análise menos favorável para este último.

A TABELA 6.11 resume seis condições de medidas realizadas no banco de ensaios, desde as primeiras horas de funcionamento com todos os rolamentos novos (c1), até uma situação de surgimento (c4) e desenvolvimento de falha ocorrida na pista externa do rolamento de apoio mais solicitado (SKF 2207-K), quando esta atingiu um tamanho crítico da ordem de $A \cong 10 \text{ mm}^2$ (c6), conforme pode ser vista nas duas fotos da FIGURA A2.9 (Apêndice 2). Observa-se que devido às condições de carga impostas neste rolamento, a vida útil atingida foi reduzida em cerca de 30 % enquanto que o rolamento de teste (ZKL 6204) ultrapassou cerca de 67 % da vida útil calculada, conforme os valores teóricos apresentados na TABELA 6.9.

TABELA 6.11 – Condições de falhas para análise (Rolamento SKF 2207-K).

Condições	Observações	horas
c1	Rolamentos em bom estado (novos)	10 h
c2	Rolamentos em funcionamento normal	266 h
c3	Rolamento de apoio antes da falha	348 h
c4	Rolamento de apoio com uma pequena falha	388 h
c5	Rolamento de apoio com uma falha crescente	405 h
c6	Rolamento de apoio com uma falha severa	420 h

Análise nos Domínios do Tempo e da Frequência

As FIGURAS 6.36 e 6.37 mostram seis blocos de sinais medidos no tempo e seus respectivos espectros FFT, escolhidos de modo a visualizar algumas fases ou estágios de falhas, para a faixa de análise de 0 a 5 kHz.

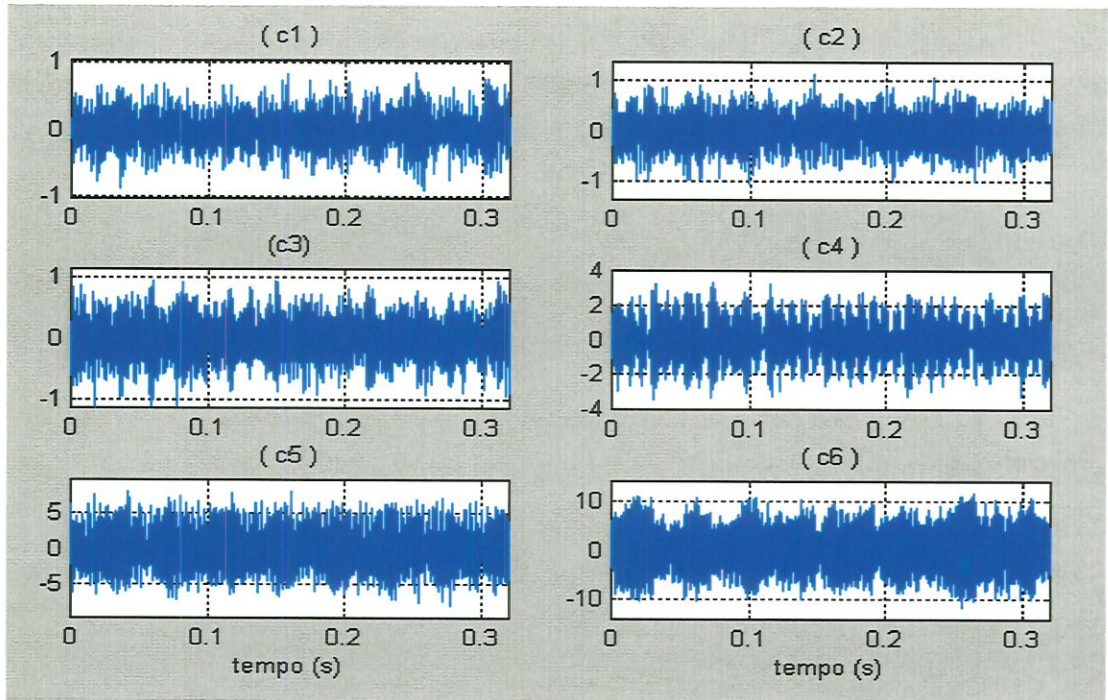


FIGURA 6.36 – Falha na pista externa: sinais medidos no tempo.

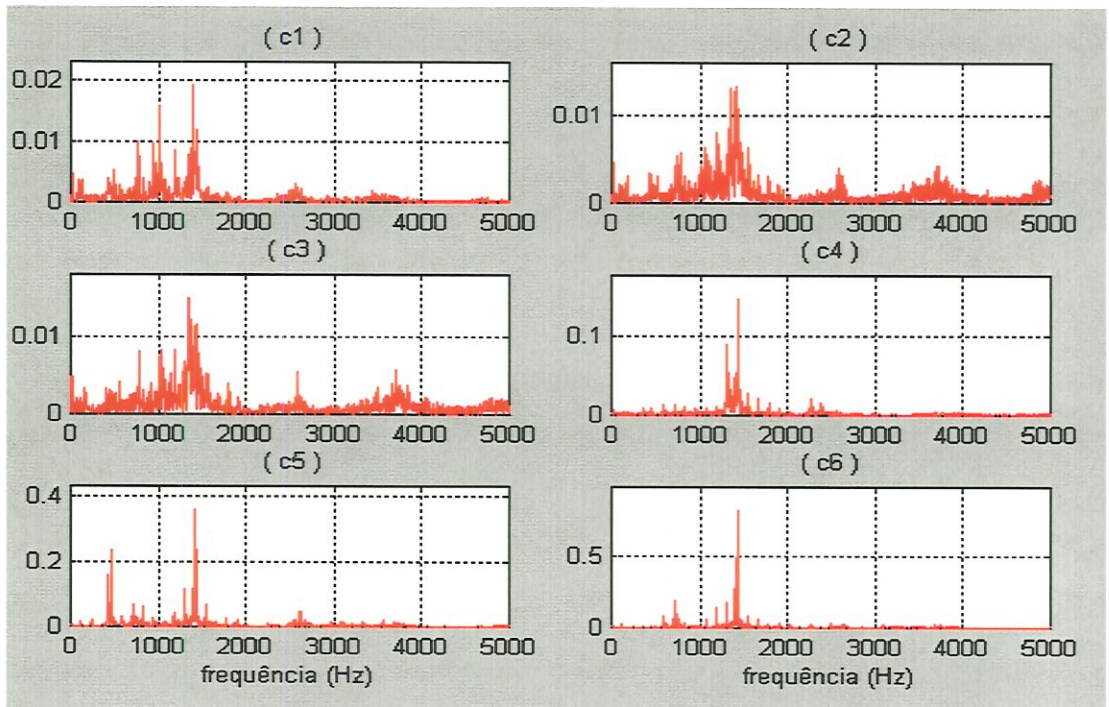


FIGURA 6.37 – Espectros FFT dos sinais em frequência.

Analisando os sinais no tempo observa-se que as amplitudes mantêm-se praticamente constantes para as condições c1 a c3, não mostrando variações sensíveis que evidenciem a presença da falha. Porém a partir da condição c4, devido ao surgimento de uma pequena falha, nota-se um aumento relativo das amplitudes e a presença de picos periódicos característicos da falha em desenvolvimento. Para uma condição de falha mais severa (c6), embora as amplitudes sejam altas, não é mais possível visualizar a periodicidade dos impactos devido à falha, pois o seu tamanho já se estendeu por uma área maior, resultando na ocorrência de impactos múltiplos devido à passagem de mais de uma esfera sobre o defeito ao mesmo tempo. Quanto aos espectros FFT obtidos, observa-se nas três primeiras condições a presença de frequências de ressonância nas faixas mais altas (ex. 4800, 3600 e 2600 Hz). Porém a partir da condição c4, devido ao desenvolvimento da falha, a densidade espectral fica mais concentrada em torno das frequências de ressonância mais baixas (500, 750 e 1300 Hz).

A FIGURA 6.38 mostra os espectros FFT e HFRT obtidos para três condições de falhas, onde adotou-se a faixa de análise de 0 a 5 kHz e a frequência de filtragem em torno de $f_c = 1300$ Hz. Esta mudança na faixa de análise resultou numa resolução em frequência $\Delta f = 3,125$ Hz, o que permite identificar com maior precisão as frequências características relacionadas com o defeito através do espectro do envelope HFRT. Analisando estes espectros verifica-se que para a condição normal (c2) não é possível destacar qualquer frequência característica de defeito. Porém nas condições de pequena falha (c4) e falha mais severa (c6) fica bem evidente o padrão espectral típico de falha na pista externa, com a frequência característica de defeito identificada na frequência de 118,75 Hz, bastante próxima do valor calculado $f_d = 117,75$ Hz ($\xi \cong 0,85$ %). Na condição c6, nota-se um pico identificado na frequência de 25 Hz, coincidente com a frequência de rotação do eixo, representando um possível problema de desbalanceamento ou desalinhamento do sistema rotativo. Também observa-se dois outros picos secundários, múltiplos da frequência característica do defeito, conforme previsto no modelo de falha na pista externa.

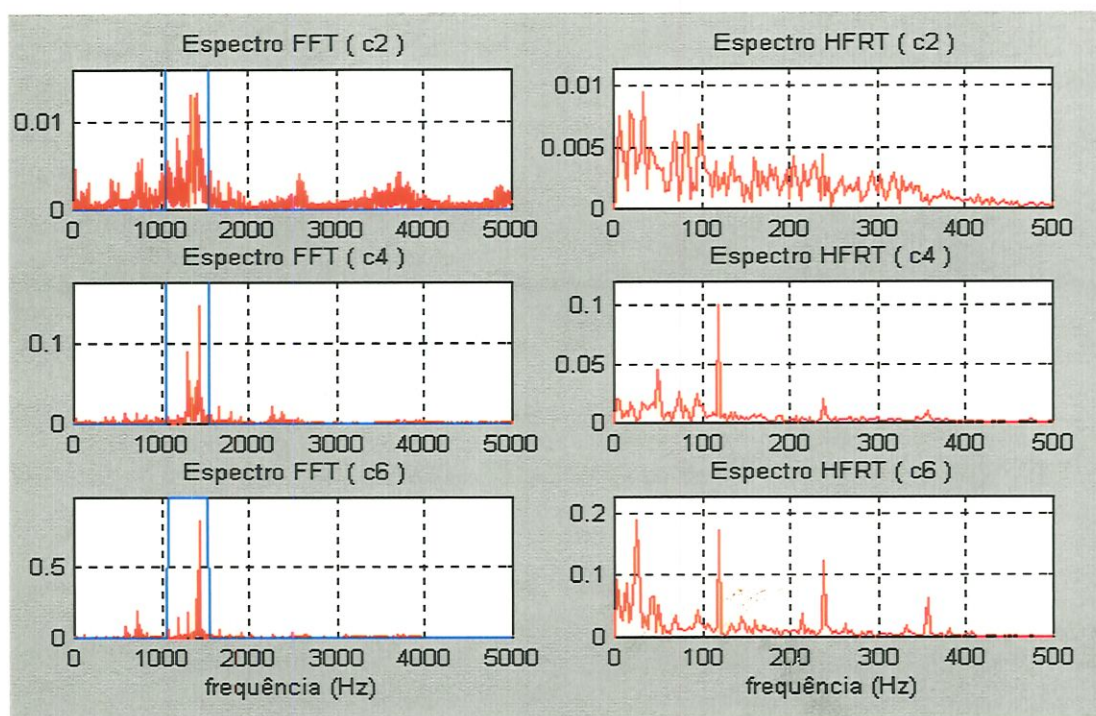


FIGURA 6.38 - Espectros FFT e HFRT filtrados em frequência.

Análise Conjunta Tempo-Frequência

As FIGURAS 6.39 e 6.40 mostram as representações conjunta tempo-frequência através dos mapas PWVD obtidos a partir de dois blocos de sinais no tempo medidos diretamente do sistema de aquisição, com $N=4096$ pontos, largura de janela com $n_{win} = 32$ pontos e faixa de análise de 0 a 5 kHz. Para análise foram escolhidas duas condições de falhas, uma representando os sinais do rolamento com uma pequena falha (c4) e outra num estágio de falha mais severa (c6). Observa-se que a escolha desta faixa de análise, utilizada para melhorar a resolução em frequência na aplicação da técnica do envelope HFRT, resultou numa pior resolução no tempo. Uma boa resolução no tempo é importante para aplicação do método PWVD. Este problema de resolução é visualizado nos mapas PWVD onde o número de impactos, dentro de cada janela de análise no tempo, apresenta cerca de 38 impactos, dificultando bastante a análise.

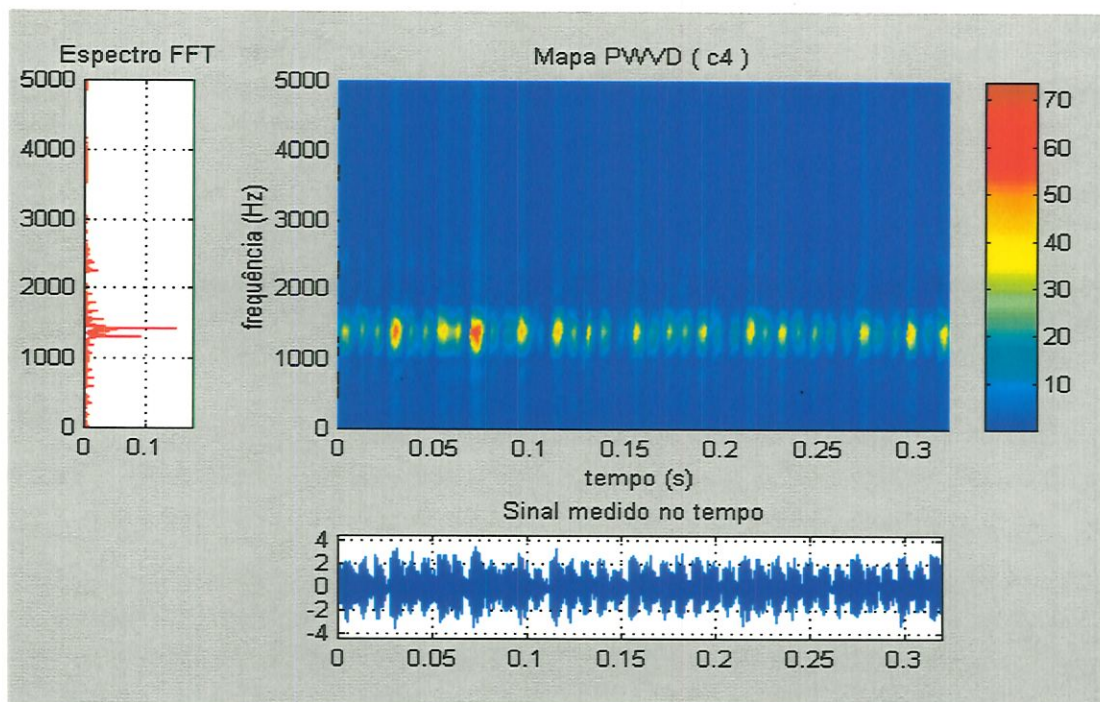


FIGURA 6.39 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c4.

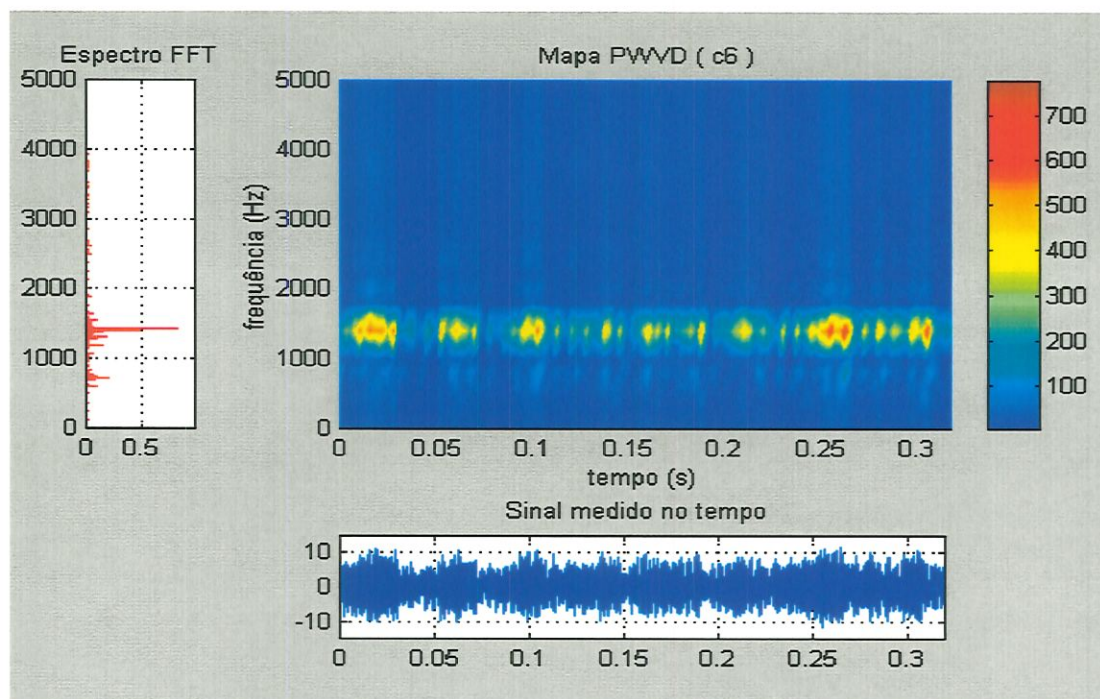


FIGURA 6.40 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c6.

Com o objetivo de melhorar a análise dos impactos gerados pelas falhas através das representações tempo-frequência e interpretar corretamente os mapas obtidos, as FIGURAS 6.41 a 6.43 mostram três mapas PWVD obtidos para condições de falhas típicas, onde a faixa de análise foi estendida para 0 a 20 kHz, com a largura de janela $n_{win} = 64$ pontos.

A FIGURA 6.41 mostra a representação conjunta PWVD obtida para um bloco de sinal no tempo numa condição do rolamento de apoio SKF 2207-K ainda em bom estado (c3). Observa-se no espectro FFT, mostrado apenas até 5 kHz (“zoom”), as diversas faixas de frequências de ressonância excitadas, onde destaca-se a faixa de maior densidade espectral em torno de 1300 Hz. O mapa PWVD mostra através das concentrações de energia que os “spots” principais estão distribuídos de maneira não uniforme nesta região. Por outro lado, observa-se diversas manchas em tons de azul claro, distribuídas de forma aleatória no plano tempo-frequência, o que caracteriza uma estrutura de análise para condições de funcionamento normal do sistema rotativo.

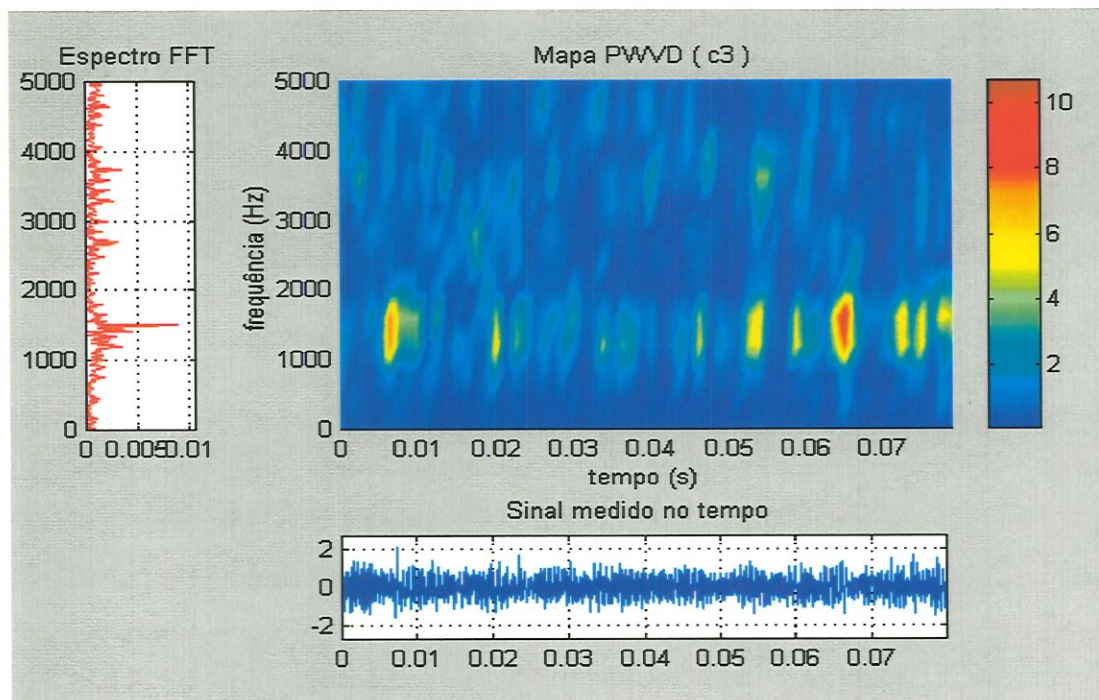


FIGURA 6.41 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c3.

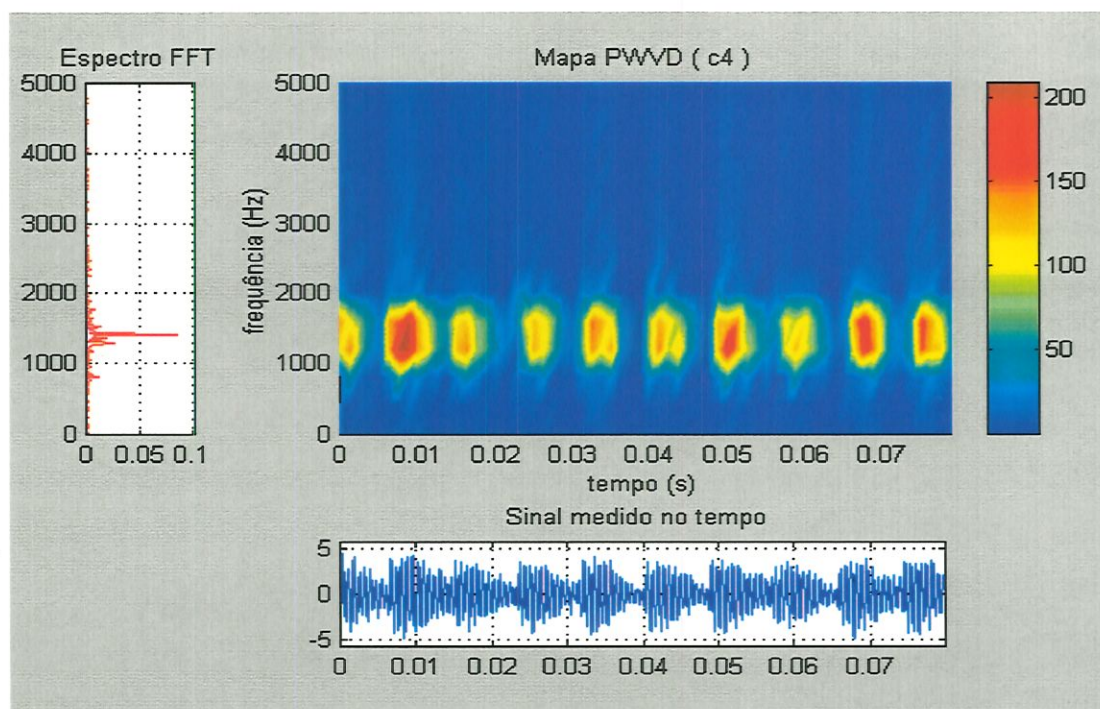


FIGURA 6.42 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c4.

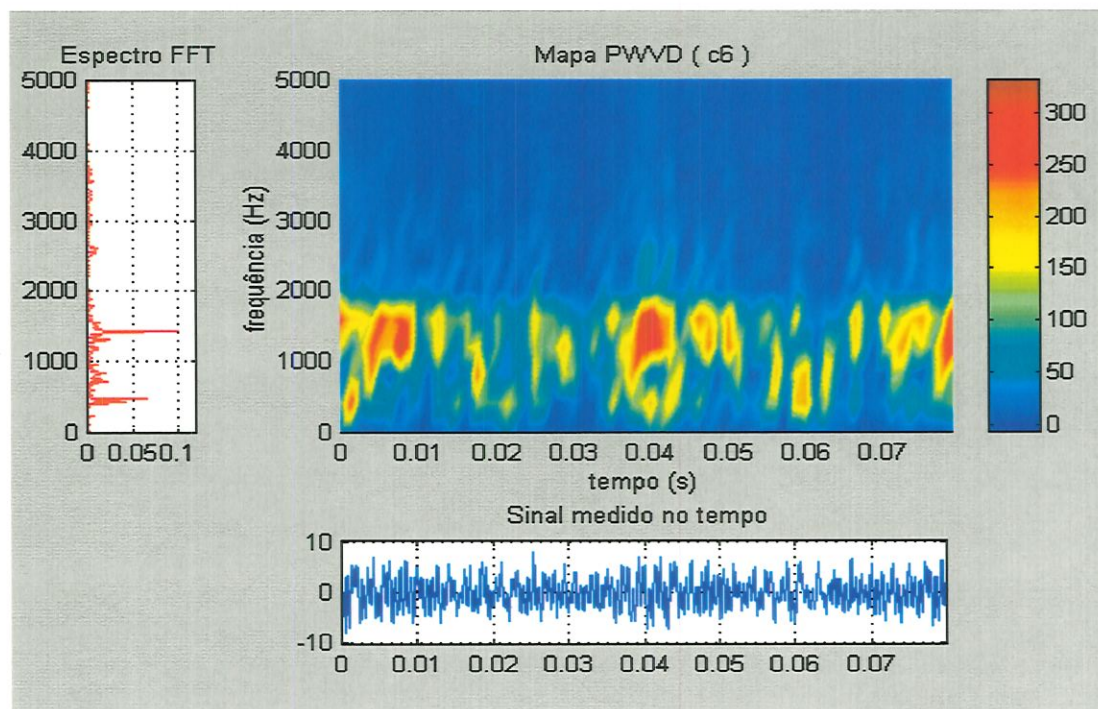


FIGURA 6.43 - Mapa PWVD obtido para a condição de falha c6.

A FIGURA 6.42 mostra a representação conjunta PWVD obtida para um bloco de sinal no tempo representando a condição de uma pequena falha (c4) produzida pelo surgimento de “pitting” numa das pistas do rolamento de apoio SKF 2207-K. A partir do espectro FFT observa-se o aumento da densidade espectral em torno da frequência central de ressonância $f_c = 1300$ Hz, com conseqüente redução das amplitudes nas demais faixas de frequências. Como a janela de análise no tempo é $T = 0,08 s$ e o período de repetição dos impactos devido à falha na pista externa é $T_d = 1/f_d = 0,0085 s$, obtém-se cerca de 10 impactos na janela de tempo. O mapa PWVD obtido mostra em detalhes a representação destes impactos, onde observa-se a ocorrência de dez impactos no eixo de tempo, o que está coerente com o cálculo anterior. Nota-se ainda um aumento significativo das amplitudes dos picos da PWVD, representada na barra de cores, passando de cerca de 10 para 200 os valores máximos obtidos para as condições c3 e c4, respectivamente.

A FIGURA 6.43 mostra a representação conjunta PWVD obtida para um bloco de sinal no tempo representando uma condição de falha muito severa do rolamento de apoio SKF 2207-K (c6), com tamanho de falha correspondente a uma área de $A \cong 10 \text{ mm}^2$. Observa-se que este valor é bem superior aos padrões industriais recomendados pela Timken ($A \cong 6,45 \text{ mm}^2$) *apud* SHIROISHI *et al* (1997). Comparando-se os espectros FFT obtidos para as condições c3 e c6, nota-se que houve um deslocamento e um aumento progressivo da densidade espectral com a condição do elemento, no sentido das altas para as baixas frequências, com o surgimento e crescimento da falha. Este fato comprova a necessidade de aplicação dos métodos de análise conjunta tempo-frequência visando distinguir as diferentes fases ou estágios de falhas ao longo do tempo. O mapa PWVD obtido para a condição c6 ilustra bem o que ocorre nesta fase. Com o aumento do tamanho da falha no sentido longitudinal da pista, é possível que mais de uma esfera passe sobre o defeito ao mesmo tempo, o que resulta numa distribuição irregular dos impactos, visualizados no plano tempo-frequência abaixo de 2000 Hz.

Resultados Numéricos dos Ensaios de Longa Duração

A TABELA 6.12 e a FIGURA 6.44 mostram o comportamento geral dos parâmetros obtidos através das medidas para algumas condições de falha do rolamento de apoio (SKF 2207-K), utilizando a faixa de análise de 0 a 5 kHz.

TABELA 6.12 - Falha na pista externa: comparação de parâmetros.

condição	Xrms (g)	Xpic (g)	Fator K (g)	Rpic HFRT	Vrms PWVD
c1	0.2471	0.9012	0.7234	2.8533	0.6991
c2	0.3294	1.2091	0.9588	3.0893	1.2702
c3	0.3089	1.1857	0.9360	3.5178	1.2704
c4	1.2325	3.5952	3.0140	8.9530	8.2050
c5	2.7232	8.1281	6.6926	10.0504	24.0385
c6	4.4946	11.8283	9.4806	10.7023	72.3943

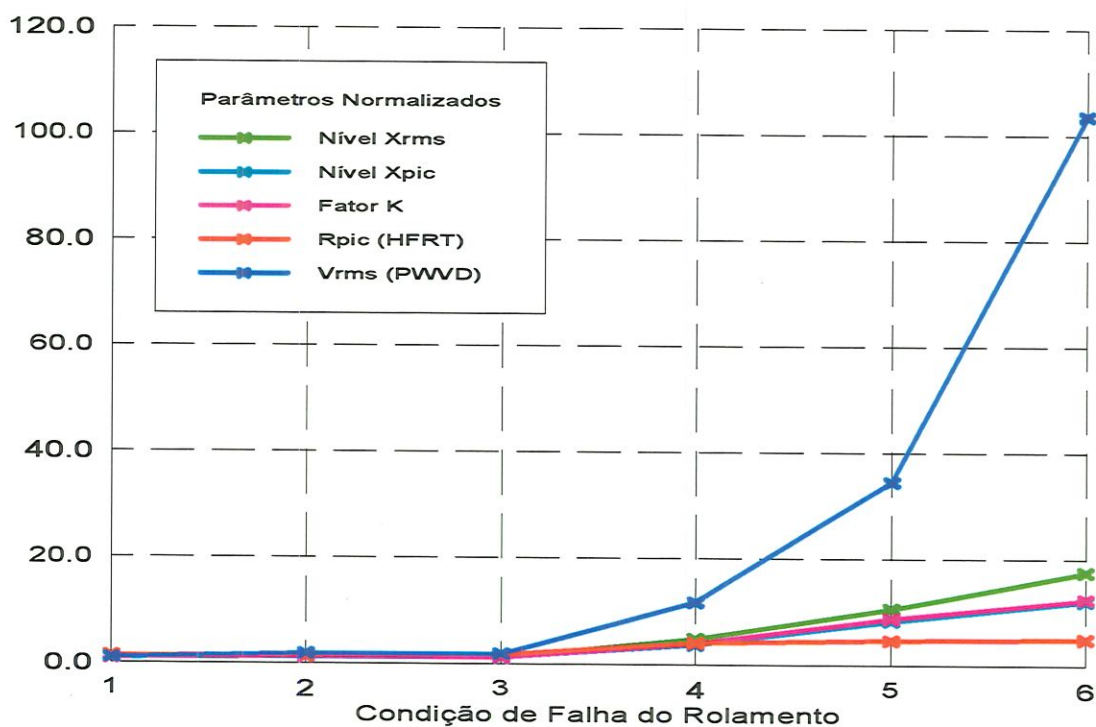


FIGURA 6.44 - Falha na pista externa: comparação de parâmetros.

Analisando os valores da TABELA 6.12 e o gráfico da FIGURA 6.44 verifica-se que os parâmetros gerais só apresentaram variação sensível a partir da condição c4, quando ocorre o surgimento e desenvolvimento da falha, conforme era previsto na análise qualitativa feita anteriormente.

No domínio do tempo os parâmetros apresentaram um crescimento relativo moderado, especialmente o nível x_{pic} e o fator K , que se mostraram menos sensíveis que o nível x_{rms} , embora todos se mantenham sempre crescentes a partir da condição c4. Este fato pode estar ligado à escolha da nova faixa de análise, uma vez que em todos os resultados analisados anteriormente o nível x_{pic} e o fator K sempre se mostraram mais eficientes.

Quanto à razão de picos R_{pic} obtida a partir dos espectros do envelope HFRT, verifica-se que mesmo utilizando uma faixa de análise com o objetivo de melhorar a resolução em frequência, os resultados não se mostraram satisfatórios para detecção do crescimento da falha, apresentando a mesma tendência de estabilização para condições mais severas. Este fato reforça a tese de que a técnica do envelope HFRT é bastante segura na detecção de falhas incipientes, permitindo identificar com precisão a frequência característica do defeito, porém não permite avaliar o crescimento e extensão da falha efetivamente.

Já o método PWVD utilizando o parâmetro V_{rms} apresentou crescimento bastante acentuado das curvas, repetindo o mesmo comportamento das análises anteriores para falhas introduzidas artificialmente, o que comprova a sua eficiência em relação aos demais parâmetros, mesmo com a resolução no tempo prejudicada devido à faixa de análise escolhida (0 a 5 kHz). No entanto, para se fazer uma avaliação qualitativa das estruturas tempo-frequência com mais precisão e visualizar o período de repetição dos impactos de forma adequada, determinante da frequência característica do defeito, foi necessário melhorar a resolução no tempo. Neste caso, quanto maior for a faixa útil de análise e a capacidade de discretização do sistema de aquisição dos sinais no tempo, melhores resultados serão obtidos.

Capítulo 7

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Analisando os vários tópicos relacionados com o problema de detecção e análise dinâmica de falhas em rolamentos, através de uma síntese dos resultados alcançados em relação aos objetivos propostos nesta pesquisa, a seguir são destacados os pontos seguintes.

Como proposta de investigação, inicialmente foram avaliados dois modelos de falhas existentes na literatura que simulam a assinatura de vibração gerada por falhas localizadas nas pistas externa e interna de rolamentos. Em seguida, foram realizados ensaios experimentais de curta duração a partir da introdução de falhas artificiais nas pistas de rolamentos de testes. Estes ensaios foram idealizados para verificar até que ponto as medidas experimentais seguem os modelos adotados, caracterizando-se como uma validação. Finalmente foram realizados ensaios de longa duração que forçam o surgimento de falhas naturalmente, visando reproduzir um sistema em operação normal. Em todas as fases foram analisados a sensibilidade do método de análise conjunta tempo-frequência PWVD em relação a algumas técnicas empregadas nos domínios do tempo e da frequência através de parâmetros indicadores que mostram o desempenho da técnica para diversas condições de falhas.

Discussões sobre os Modelos de Falhas Simulados

A partir dos resultados obtidos nas simulações dos modelos teóricos de falhas em rolamentos sob as diversas condições de falhas adotadas, pôde-se concluir desta etapa do trabalho o seguinte:

Os métodos de análise no domínio do tempo foram caracterizados pela simulação de sinais representando as amplitudes de aceleração de vibração medidas sob diversas condições de falhas em rolamentos e avaliados através de alguns parâmetros indicadores. Dentre estes parâmetros, o nível x_{pic} e o fator K se mostraram mais eficientes indicando o crescimento da falha para todas as condições testadas. O fator K foi o que apresentou maior sensibilidade, especialmente para condições de falhas mais severas. O nível x_{rms} embora tenha apresentado valores sempre crescentes, demonstrou pouca sensibilidade, não detectando mudanças da condição. O fator de curtose K_f , só mostrou boa sensibilidade para condições de falhas incipientes, porém nas condições mais severas apresentou tendência de estabilização não indicando crescimento da falha efetivamente. Também o fator de crista F_c obtido para a maioria das condições não mostrou variação significativa, resultando num indicador com pouca sensibilidade para este tipo de análise.

Os métodos de análise no domínio da frequência utilizando os espectros do envelope HFRT apesar de acrescentar informações adicionais relacionadas com as frequências características dos defeitos, também não alcançaram os resultados esperados como indicadores do crescimento de falhas. Embora os resultados se mostraram bem superiores aos métodos de análise no domínio do tempo, devido à possibilidade de identificação da frequência característica do defeito, observou-se que este método mostrou boa sensibilidade apenas para detecção de falhas incipientes. Em condições de falhas mais severas o método apresentou tendência de estabilização, não indicando o crescimento da falha efetivamente. Quanto aos dois modelos investigados, a técnica do envelope HFRT se mostrou mais eficiente para o modelo de falha na pista externa, apresentando linhas espectrais bem definidas e o pico principal relacionado com a frequência característica do defeito. Já para o modelo de falha na pista interna, devido ao surgimento de linhas espectrais adicionais resultantes da modulação pela carga e pela rotação, a frequência característica do defeito não foi facilmente identificada. Isto ocorreu devido à sua localização ficar concentrada na região do lóbulo secundário do

espectro HFRT, que apresenta linhas espectrais mistas e amplitudes de picos menores que a do pico principal.

O método de análise conjunta tempo-frequência utilizando os mapas de contorno PWVD se mostraram eficientes para a maioria das condições testadas. Além da possibilidade de quantificação do tamanho da falha, apresentaram informações adicionais em relação aos métodos de análise nos domínios do tempo e da frequência. Uma das principais vantagens deste método é permitir uma avaliação qualitativa através da visualização e interpretação gráfica da estrutura obtida pelas concentrações de energia do sinal no plano tempo-frequência. A partir da análise dos mapas PWVD observa-se que para o modelo de falha na pista externa o padrão característico da estrutura é constituído por “spots” regularmente espaçados no eixo de tempo, relacionados com a frequência característica do defeito. No modelo de falha na pista interna a estrutura resultante é mais complexa, constituída por “spots” principais com espaçamento relacionado com a frequência de rotação, junto com “spots” secundários com espaçamento relacionado com a frequência característica do defeito. Para a análise do desempenho do método PWVD foi utilizado o parâmetro da razão de picos T_{pic} calculado no plano tempo-frequência, que se mostrou confiável para a maioria das condições simuladas, apresentando comportamento crescente, embora sua sensibilidade só ocorra efetivamente a partir da condição (c3), quando o efeito do ruído é minimizado no plano tempo-frequência.

Discussões sobre os Ensaios de Curta Duração

A partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais de curta duração através dos sinais medidos nos rolamentos de testes com falhas introduzidas artificialmente nas suas pistas, pôde-se concluir desta etapa do trabalho o seguinte:

Os métodos de análise no domínio do tempo utilizando os níveis x_{pic} e o fator K se mostraram eficientes na detecção e apresentaram boa sensibilidade ao crescimento da falha, especialmente após a condição c3,

seguindo o comportamento dos modelos de falhas adotados. Os níveis x_{rms} também se apresentaram de forma crescente, embora de uma maneira mais suave, o que dificulta o seu uso como indicador do surgimento de falha. Por outro lado os fatores de curtose K_c e de crista F_c , usados de maneira isolada, não permitiram distinguir mudanças sensíveis na condição do rolamento, apresentando pequena variação relativa na maioria das medidas realizadas. Porém o uso do fator K , resultante do produto entre o fator de curtose K_c e o nível x_{rms} , mostrou boa sensibilidade para detecção de falhas incipientes e permaneceu crescente para as demais condições demonstrando que é um bom indicador de falhas em desenvolvimento.

Os métodos de análise no domínio da frequência utilizando os espectros do envelope HFRT aplicados aos rolamentos com falhas introduzidas artificialmente não apresentaram os resultados esperados. Embora os espectros do envelope HFRT medidos se mostrem bastante sensíveis quanto à identificação do pico principal relativo à frequência característica do defeito para falhas introduzidas na pista externa, o mesmo não ocorreu com o padrão espectral obtido para falhas introduzidas na pista interna. Observa-se que para as medidas realizadas no rolamento com falha na pista externa, ocorreu o surgimento de um pico adicional identificado na frequência de rotação que não havia sido previsto pelo modelo. É possível que este pico esteja relacionado com pequenos desbalanceamentos ou desalinhamentos do sistema rotativo. Mesmo assim foi possível identificar claramente a frequência característica do defeito a partir da condição c3. Por outro lado o padrão espectral obtido para falhas introduzidas na pista interna se mostrou mais complexo, devido às baixas amplitudes em que ocorrem os picos relacionados com a frequência característica do defeito, dificultando a sua localização. Este fato foi agravado pela baixa resolução obtida em frequência, conforme previsto pelo modelo de falha na pista interna. Os valores da razão de picos R_{pic} obtidos para as diversas condições de falhas também confirmam o baixo desempenho da técnica do envelope HFRT aplicada como indicador do crescimento de falhas nos rolamentos testados.

O método de análise conjunta tempo-frequência utilizando os mapas PWVD obtidos a partir da introdução de falhas artificiais nas pistas dos rolamentos de testes apresentaram bom desempenho, seguindo a estrutura dos modelos simulados, especialmente para condições de falhas mais severas. Em condições de falhas incipientes, onde a extração das informações relacionadas com os impactos devido à falha se localizam nas altas frequências e apresentam baixas amplitudes, a visualização requer experiência do analista. Porém à medida que a condição de falha se torna mais severa ocorre uma concentração mais visível em torno da frequência central de ressonância, facilitando a identificação destes impactos. Quanto às estruturas dos mapas PWVD obtidos, verificou-se que para falhas introduzidas na pista externa, obteve-se uma estrutura típica que segue praticamente à do modelo adotado. Para falhas introduzidas na pista interna, verifica-se que nem sempre é fácil de distinguir a separação entre dois “spots” consecutivos resultante dos impactos gerados pela falha devido ao efeito do carregamento e localização da falha. Uma maneira de minimizar este problema é fazer uma normalização dos sinais no tempo mantendo os picos principais no mesmo nível dos impactos secundários, antes de aplicar a PWVD, o que facilita a determinação do período de repetição dos impactos no plano tempo-frequência. O uso do parâmetro V_{rms} proposto neste trabalho e adotado nas medidas experimentais para as diversas condições testadas mostrou um comportamento idêntico aos valores da razão de picos T_{pic} obtidos na análise dos modelos, indicando boa sensibilidade com o crescimento da falha, especialmente para condições de falhas mais severas.

Discussões sobre os Ensaios de Longa Duração

Através da realização dos ensaios de longa duração foi possível acompanhar o desenvolvimento de falhas surgidas naturalmente nas pistas dos rolamentos, cujos resultados podem ser extrapolados para as situações físicas reais em sistemas mecânicos rotativos. Na literatura consultada não há relatos sobre a aplicação do método PWVD para detecção de falhas geradas

naturalmente em rolamentos, característica inédita do trabalho. Analisou-se um caso de falha ocorrida na pista externa de um dos rolamentos de apoio (SKF 2207-K), onde foram selecionadas seis condições ou estágios de falhas mais representativos. Foi aplicado o mesmo procedimento de análise adotado anteriormente, porém com uma faixa de análise em frequência adicional de 0 a 5 kHz. Nesta etapa do trabalho, pôde-se concluir o seguinte:

Os parâmetros de análise no domínio do tempo apresentaram um crescimento relativo moderado, especialmente o nível x_{pic} e o fator K , que se mostraram menos sensíveis que o nível x_{rms} . Apesar disso todos se mantiveram crescentes, especialmente a partir da condição c4, que representa o surgimento de uma pequena falha. Talvez este fato esteja ligado ao tamanho da janela de análise adotada, que amostra um sinal no tempo com grande número de picos para cada registro ou medida captada.

Quanto à razão de picos R_{pic} , obtida a partir dos espectros do envelope HFRT, verifica-se que mesmo utilizando a nova faixa de análise (0 a 5 kHz), os resultados não se mostraram satisfatórios para detecção do crescimento da falha, apresentando a mesma tendência de estabilização já observada nos modelos teóricos e nos ensaios de curta duração para condições de falhas mais severas. Este fato reforça a tese de que a técnica do envelope HFRT é bastante segura na detecção de falhas incipientes, permitindo identificar com precisão a frequência característica do defeito, porém não permite avaliar efetivamente o crescimento e a extensão da falha num estágio mais avançado.

Já o método PWVD utilizando o parâmetro proposto V_{rms} apresentou crescimento bastante acentuado das curvas, repetindo o mesmo comportamento das análises anteriores para falhas introduzidas artificialmente, comprovando a sua eficiência em relação aos demais parâmetros. Para melhor visualizar o período de repetição dos impactos devido à falha ou mesmo mostrar detalhes da forma de variação destes impactos, é sugerido melhorar a resolução no tempo, pois quanto maior for a faixa de análise e capacidade de discretização do sinal no tempo, melhores condições de análise serão obtidas.

Conclusões

Face às discussões sobre os resultados das análises feitas neste trabalho, chega-se às seguintes conclusões finais:

- Os modelos de falhas adotados se mostraram bastante representativos em termos do fenômeno físico idealizado, simulando bem o surgimento de impactos devido à passagem das esferas sobre a falha no rolamento e descrevendo bem o comportamento típico dos sinais obtidos nas medidas experimentais. Estes modelos foram validados mesmo considerando apenas o modo principal de ressonância. Por outro lado, os modelos apresentam algumas limitações resultantes das hipóteses simplificadoras, como a ausência de deslizamentos entre os elementos rolantes e as pistas, bem como quanto à natureza dos impactos que são representados por um trem de impulsos com amplitudes constantes decaindo exponencialmente;
- Quanto à sensibilidade dos métodos para detecção e localização das falhas em rolamentos, observa-se que os métodos de análise no domínio do tempo alertam para uma situação anormal que possa ocorrer durante o funcionamento da máquina, porém não permitem que se estabeleça um diagnóstico sobre a localização da falha. Mesmo o fator de curtose, que é considerado em muitos trabalhos como um bom indicador de falhas em rolamentos, não apresentou os resultados esperados. Por outro lado tanto a técnica do envelope HFRT quanto o método de análise conjunta tempo-frequência PWVD foram capazes de mostrar os padrões característicos que identificam e localizam falhas em rolamentos;
- Quanto aos diversos métodos de análise investigados, conclui-se que os métodos de análise no domínio do tempo possibilitam o monitoramento do crescimento da falha e servem como parâmetro indicador do nível de alarme em máquinas num programa de manutenção preditiva. Alguns destes parâmetros permitem uma avaliação de detecção da falha, porém não permitem por si só o diagnóstico da localização de falhas em rolamentos;



- O método de análise em frequência através do espectro do envelope HFRT se mostrou bastante sensível para detecção de falhas incipientes, e apresentou resultados confiáveis na identificação e localização de falhas na pista externa. Porém apresenta espectro confuso e com muitas linhas espectrais adicionais quando a falha está localizada na pista interna. Outra dificuldade na aplicação da técnica do envelope HFRT está relacionada com a escolha da faixa de frequência de filtragem mais adequada, que depende do conhecimento “a priori” da frequência de ressonância estrutural mais excitada pela falha;
- Quanto ao método de análise conjunta tempo-frequência através dos mapas de contornos PWVD os resultados foram bastante satisfatórios, apresentando estruturas típicas que garantem a captura simultânea das características temporais e espectrais dos sinais medidos, o que a torna uma ferramenta bastante útil na análise de sinais mais complexos. Como informações adicionais, os mapas PWVD permitem a visualização clara do deslocamento do conteúdo de frequências para os diversos intervalos de tempo de medidas, o que garante uma maior definição dos padrões característicos para as diversas condições de falhas. Possibilita também a utilização de um índice relativo à condição ou estágio de falha em desenvolvimento através das amplitudes de picos que representam os impactos devido à passagem das esferas sobre a falha. O índice V_{rms} foi proposto neste trabalho e se mostrou eficiente nas análises realizadas.

Sugestões

Como sugestões para trabalhos futuros deve-se considerar as seguintes possibilidades de avanços neste tema de pesquisa:

- Aplicar algum pré-processamento nos sinais adquiridos diretamente do sistema de aquisição. Este pré-processamento tem a finalidade de melhorar a relação sinal-ruído para condições de falhas incipientes. Pode-se aplicar também técnicas de pós-processamento como filtragem ou

normalização dos sinais a fim de evidenciar mais algumas características para melhor identificação dos parâmetros de interesse;

- Investigar a aplicação de outras distribuições desenvolvidas mais recentemente, como a distribuição positiva de Cohen-Posch (CPD), ou mesmo a transformada de “wavelets” (TW) que vêm sendo aplicadas com sucesso em áreas como monitoramento de sistemas de bombeamento e de transmissões por engrenagens. Uma comparação entre as estruturas obtidas em relação ao método PWVD pode ser interessante;
- Quanto ao sistema de monitoramento aplicado em ensaios de longa duração, sugere-se a aquisição de sinais através de um sistema de monitoramento do tipo “on line”, de modo a garantir o registro em tempo integral do funcionamento dos rolamentos, visando captar as mudanças ou transientes momentâneos que normalmente escapam nas medidas realizadas com o sistema tradicional;
- Outra sugestão, considerando o objetivo de detecção antecipada ao surgimento de falha na superfície da pista do rolamento, é a proposta de realização de medidas com sensores de emissão acústica para fornecer informações complementares ao analista de vibração. Estudos neste sentido parecem ser promissores, embora ainda não se tenham resultados conclusivos na literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELO, M. (1987). *Vibration Monitoring of Machines - Technical Review*. Brüel & Kjaer, Naerum, n.1, p.1-36.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 10.082 - *Vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de (600 a 12.000) rpm - bases para especificação e padrões de avaliação*. ABNT.
- BAILLIE, D. C. and MATHEW, J. (1996). A comparison of auto-regressive modelling techniques for fault diagnosis of rolling element bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.10, n.1, p.1-17.
- BARANIUK, R. G. and JONES, D. L. (1993). A signal dependent time-frequency representation: optimal kernel design. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v.41, n.4, p.1589-1602.
- BARRON, R. (1996). *Engineering Condition Monitoring – Practice, Methods and Applications*. England. Addison Wesley Longman.
- BERRY, J. E. (1991). How to track rolling element bearing health with vibration signature analysis. *Sound and Vibration*, v.25, p.24-35.
- BOASHASH, B. (1992). *Time-Frequency Signal Analysis – Methods and Applications*, Longman Cheshire, Wiley.
- BOTÖ, P. A. (1971). Detection of bearing damage by shock pulses measurement. *Ball Bearing Journal*, v.167, p.1-7.
- BRAUN, S. and DATNER, B. (1979). Analysis of roller/ball bearing vibrations. *Trans. ASME - Journal of Mechanical Design*, v.101, n.1, p.118-125.
- BRAUN, S. (1986). *Mechanical signature analysis - theory and practice*. Academic Press, London.
- CEMPEL, C. (1990). Limit value in the practice of machine vibration diagnostics. *Mech. Systems and Signal Processing*, v.4, n.6, p.483-493.
- CHOI, H. I. and WILLIAMS, W. J. (1989). Improved time-frequency representation of multi-component signals using exponential kernels. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal. Process.*, v.37, n.6, p.862-871.

- CHUNG, J. Y. (1978). Cross espectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch. *Journal of Acoustic Society of America*, v.64, n.6, p.1613-1616.
- CLAASEN, T. C. M. and MECKLENBRAUKER, W. F. G. (1980). The Wigner distribution - a tool for time-frequency signal analysis - Part I: Continuous time signals, *Philips J. Research*, v.35, p.217-250, 1980; Part II: Discrete time signals, *Philips J. Research*, v.35, p.276-300, 1980; Part III: Relations with other time-frequency signal transformations, *Philips J. Research*, v.3, p.372-389.
- COELHO JR, M. P. and HANSEN, B. L. (1993). *Manutenção preditiva por análise de vibrações*. Belo Horizonte, VITEK Consultoria - Apostilha.
- COHEN, L. (1989). Time-frequency distributions – a review. *Proceedings of the IEEE*, v.77, n.7, p.941-981.
- COHEN, L. (1995). *Time-Frequency Analysis*. Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, New jersey.
- COHEN, L. and POSCH, T. E. (1985). Positive time-frequency distribution function. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, v.33, n.1, p.31-38.
- COLLACOTT, R. A. (1977). *Mechanical fault diagnosis and condition monitoring*. London, Chapman and Hall.
- DAADBIN, A. & WONG, J. C. H. (1992). Different vibration monitoring techniques and their application to rolling element bearings. *Intl. Journal of Mechanical Engineering Education*, v.19, n.4, p.295-305.
- DYER, D. and STEWART, R. M. (1978). Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis. *Trans. ASME - Journal of Mechanical Design*, v.100, n.2, p.229-235.
- ENGJA, H. and LIPPE, J. (1977). Vibration Analysis used for detection of roller bearing failures. *Norwegian Maritime Research*, n.3, p.23-33.
- FAHY, F.J. (1977). Measurements of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals. *Journal of Acoustic Society of America*, v.62, n.4, p.1057-1059.

- FORRESTER, D. (1992). Time-frequency analysis in machine fault detection. In: Boashash, B. *Time-Frequency Signal Analysis – methods and applications*. (Chapter 18), Longman Cheshire, Wiley, p.406-423.
- GABOR, D. (1946). Theory of communication, *J. IEE (London)*, v.93, p.429-457.
- GERGES, S. N. Y. (1992). Técnicas de diagnóstico dos defeitos em rolamentos por medições de vibrações, *25º Congresso Anual de Celulose e Papel – ABTCP*, São Paulo.
- GONZÁLEZ, P. S. *et al.* (1996). Nuevos metodos para el diagnostico de fallas en maquinas rotatorias mediante analisis de vibraciones, Chile, *Proc. of VII Congreso Nacional de Ingenieria Mecanica*, p.181-184.
- HARRIS, C. M. (1996). *Shock and vibration handbook*. 4th. Ed. New York, McGraw-Hill.
- HARRIS, T. A. (1966). *Rolling Bearing Analysis*. New York, John Wiley.
- IGARASHI, T. and HAMADA, H. (1982). Studies on the vibration and sound of defective rolling bearings (first report: vibration of ball bearings with one defect). *Bulletin of JSME*, v.25, n.204, p.994-1001.
- IGARASHI, T. and YABE, S. (1983). Studies on the vibration and sound of defective rolling bearings (second report: sound of ball bearings with one defect). *Bulletin of JSME*, v.26, n.220, p.1791-1798.
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (1974). ISO 2372 - *Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rps - basis for specifying evaluation standards*.
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (1980). ISO 3945 - *The measurement and evaluation of vibration severity of large rotating machines, in situ, operating at speeds from 10 to 200 rps*.
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (1995). ISO 10816 – *Mechanical vibration - evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts: ISO 10816-1: General guidelines*.
- KIM, P. Y. (1984). A review of rolling element bearing health monitoring II - preliminary test results on current technologies. *Proc. of Machinery*

- Vibration Monitoring Analysis*, Vibration Institute, New Orleans, p.127-137.
- LI, C. J. and LI, S. Y. (1995). Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring. *WEAR*, v.185, p.67-74.
- LOUGHLIN, P. J. and BERNARD, G. D. (1997). Cohen-Posch (positive) time-frequency distributions and their application to machine vibration analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.11, n.4, p.561-576.
- LOUGHLIN, P. J.; PITTON, J. W. and ATLAS, L. E. (1994). Construction of positive time-frequency distributions. *Transactions on Signal Processing*, v.42, n.10, p.2697-2705.
- MARTINS, L. G. e GERGES, S. N. Y. (1985). Manutenção preventiva: um estudo sobre o método da curtose. *Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM*, 8th., São Paulo, p.673-676.
- MATHEW, J. and ALFREDSON, R. J. (1984). The condition monitoring of rolling element bearing using vibration analysis. *Trans. ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability*, v.106, p.447-453.
- MATLAB REFERENCE GUIDE (1992). Massachusetts, Mathworks Inc.
- MCFADDEN, P. D. and SMITH, J. D. (1984a). Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique-a review. *Tribology International*, v.17, n.1, p.3-10.
- MCFADDEN, P. D. and SMITH, J. D. (1984b). Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration*, v.96, n.1, p.69-82.
- MCFADDEN, P. D. and SMITH, J. D. (1985). The vibration produced by multiple point defects in a rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration*, v.98, n.2, p.263-273.
- MCFADDEN, P. D. (1990). Condition monitoring of rolling element bearings by vibration analysis. *I. Mech. E. paper-Solid Mech. Machine Systems Group Seminar*, p.49-53.
- MECHEFSKE, C. K. and MATHEW, J. (1993). Parametric spectral estimation to detect and diagnose faults in low speed rolling element bearings:

- preliminary investigations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.7, n.1, p.1-12.
- MITCHELL, J. S. (1993). *Introduction to machinery analysis and monitoring*, 2. Ed., Oklahoma, Penn well.
- MOBLEY, R. (1990). *An introduction to predictive maintenance*. New York, Van Nostrand Reinhold.
- NAGAMATSU, A. and FUKUDA, M. (1978). Sound noise generated from ball bearing in high Speed rotation. *Bull. of JSME*, v.21, n.158, p.1306-1310.
- NUNES, M. A. C. (1989). *Diagnóstico de defeitos em rolamentos pela técnica do envelope*. Florianópolis, Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- OEHLMANN, H. *et al.* (1997). A method for analysing gearbox faults using time-frequency representations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.11, n.4, p.529-545.
- OSUAGWU, C. C. and THOMAS, D. W. (1982). Effect of inter-modulation and quasi-periodic instability in the diagnosis of rolling element incipient defect. *Trans. ASME - Journal of Mechanical Design*, v.104, p.296-302.
- QIAN, S. and CHEN, D. (1996). *Joint Time-Frequency Analysis – Methods and Applications*, Prentice Hall PTR, New Jersey.
- RANDAL, B. B. (1982). A new method of modeling gear faults. *Trans. ASME - Journal of Mechanical Design*, v.104, n.2, p.259-267.
- RYCKALTS, E. (1992). Effective enhanced techniques for early detection, monitoring, trending and diagnosis of bearing damage. *International Symposium "Recent Advances in Surveillance using Acoustical and Vibratory Methods"*, Senlis (France), p.345-356.
- ROGERS, L. M. (1979). The application of vibration signature analysis and acoustic emission source location to on-line condition monitoring of anti-frictions bearings. *Tribology International*, p.51-59.
- RUSH, A. A. (1979). Kurtosis - a crystal ball for maintenance engineers. *Iron and Steel International*, p.23-27.

- SHIN, Y. S. *et al.* (1992). Determination of vibration alert level in condition monitoring of rotating machinery. *Proc. of Intl. Modal Analysis Conference - IMAC*, v.2, p.1483-1490.
- SHIN, Y. S. and JEON, J. J. (1993). Pseudo Wigner-Ville time-frequency distributions and application to machinery condition monitoring, *Shock and Vibration*, v.1, n.1, p.65-76.
- SHIROISHI, J. *et al.* (1997). Bearing condition diagnostics via vibration and acoustic emission measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.11, n.5, p.693-705.
- SILVA, A. A. e MUCHERONI, M. F. (1997). Técnicas de monitoramento de vibrações aplicadas a máquinas rotativas visando sua manutenção preditiva – revisão. *III CIDIM 97: Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*. Comissão 5-105, Cuba.
- SILVA, A. A. e MUCHERONI, M. F. (1998). Métodos de análise conjunta tempo-frequência aplicados ao monitoramento de condição de máquinas. *Anais do V CEM-NNE 98: Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste*. v.1, p.243-250.
- SMITH, J. D. (1982). Vibration monitoring of bearing at low speeds. *Tribology International*, v.15, p.139-144.
- STASZEWSKI, W. J. *et al.* (1997). Time-frequency analysis in gearbox fault detection using the Wigner-Ville distribution and pattern recognition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.11, n.5, p.673-692.
- SU, Y. T. and LIN, S. J. (1992). On initial fault detection of a tapered roller bearing: frequency domain analysis. *Journal of Sound and Vibration*, v.155, n.1, p.75-84.
- TANDON, N. and NAKRA, B. C. (1990). The application of sound intensity technique to defect detection in rolling element bearings. *Applied Acoustics*, v.29, n.3, p.207-217.
- TANDON, N. and NAKRA, B. C. (1992). Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling element bearings- a review. *The Shock and Vibration Digest*, v.24, n.3, p.3-11.

- TAYLOR, J. I. (1980). Identification of bearing defects by spectral analysis. *Trans. ASME - Journal of Mechanical Design*, v.102, n.2, p.199-204.
- VARGAS, R. T. (1996). *Estudo experimental sobre detecção e diagnóstico de falha em rolamento por medição e análise de sinais acústicos e vibratórios*. São Paulo, Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo.
- VDI 2056 (1964). *Critérios para julgamento de vibrações mecânicas de máquinas*. Trad. de "Beurteilungsmethoden für mechanische Schwingungen von Maschinen" por D. H. S. Mariantschick; revisão do Eng. Flávio Pinheiro Ávila.
- VILLE, J. (1948). Théorie et applications de la notion de signal analytique, *Cables et Transmission*, v.2A, p.61-74.
- WANG, W. J. and MCFADDEN, P. D. (1993a). Early detection of gear failure by vibration analysis I. Calculation of the time-frequency distribution. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.7, n.3, p.193-203.
- WANG, W. J. and MCFADDEN, P. D. (1993b). Early detection of gear failure by vibration analysis II. Interpretation of the time-frequency distribution using image processing techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.7, n.3, p.205-215.
- WIGNER, E. P. (1932). On the quantum correction for thermodynamic equilibrium, *Physical Review*, v.40, p.749-759.
- ZAO, Y.; ATLAS, L. E. and MARKS II, R. J. (1990). The use of cone-shaped kernels for generalized time-frequency representations of non-stationary signals, *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal. Process.*, v.38, n.7, p.1084-1091.

Apêndice 1

FOTOS DA BANCADA DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS

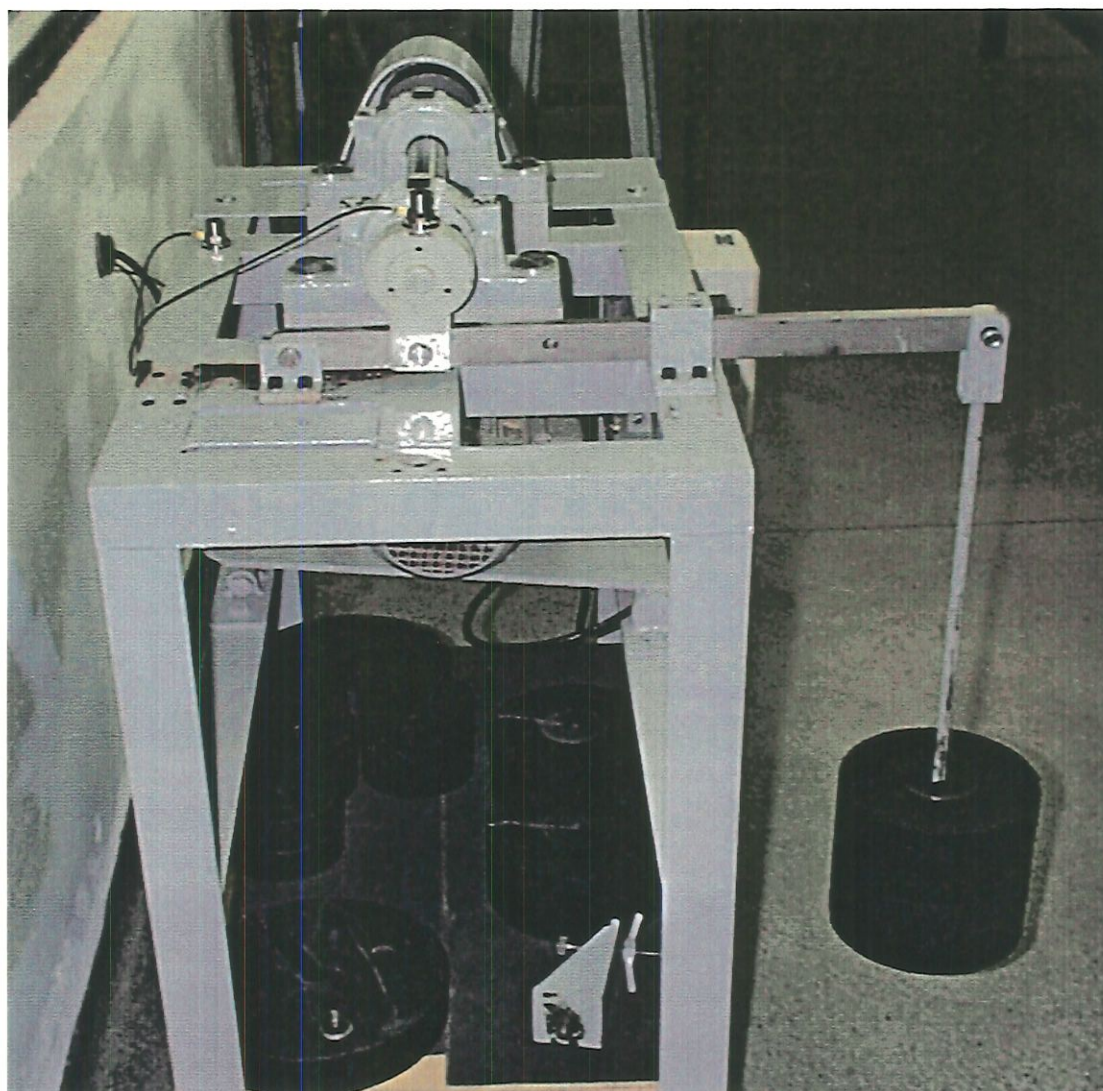


FIGURA A1.1 – Vista lateral esquerda da bancada: detalhes do sistema de carregamento mostrando o suporte do rolamento de teste articulado com a barra e tirante de sustentação dos pesos.

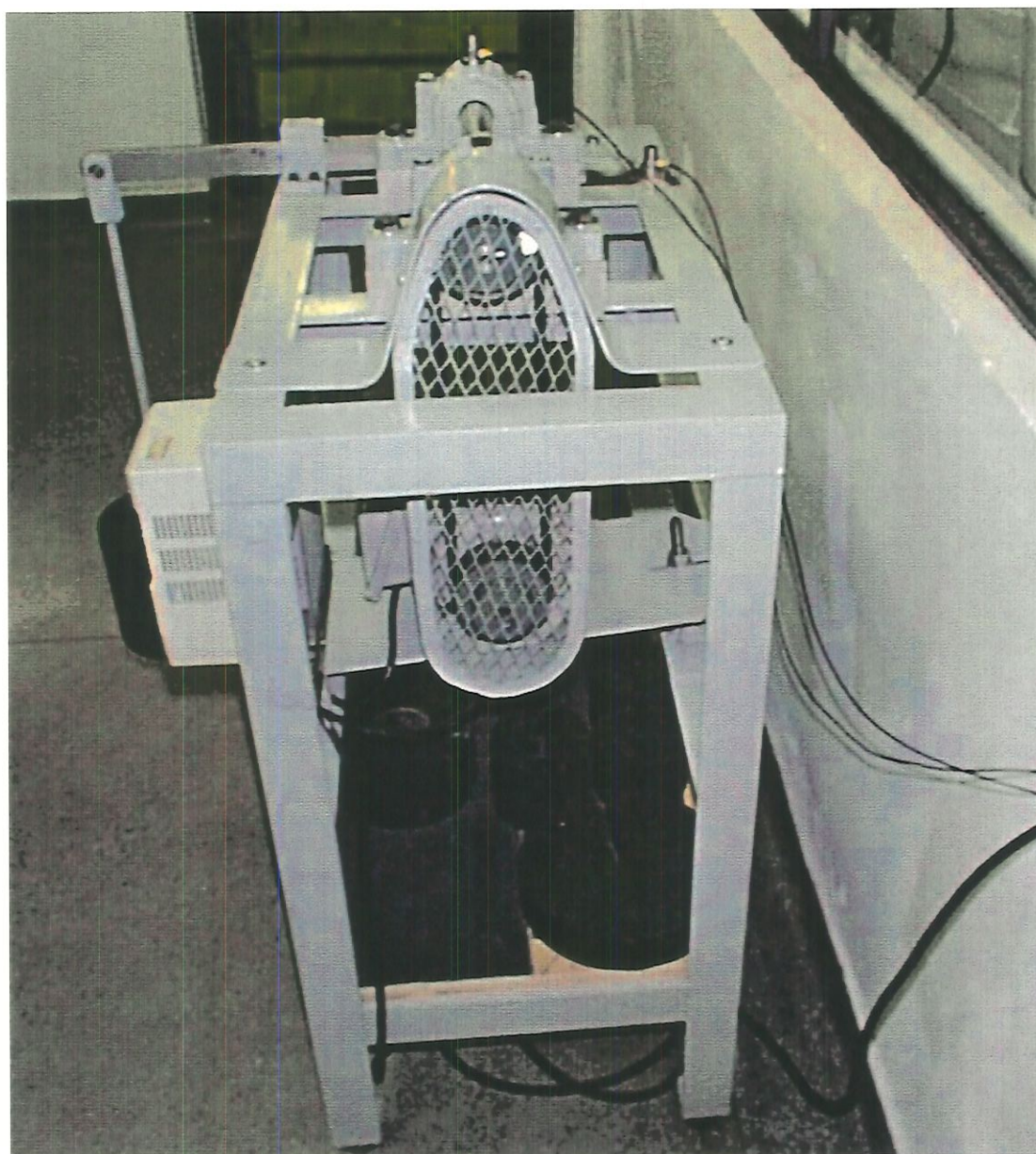


FIGURA A1.2 – Vista lateral direita da bancada: detalhes do sistema de transmissão mostrando a base de fixação do motor elétrico e o conjunto de correias e polias de acionamento com guarda de proteção.



FIGURA A1.3 – Vista principal da bancada: detalhes do suporte do rolamento de teste e da ponta de eixo desmontados.



FIGURA A1.4 – Estojo para guarda dos rolamentos de teste.

Apêndice 2

Fotos de Falhas em Rolamentos de Testes

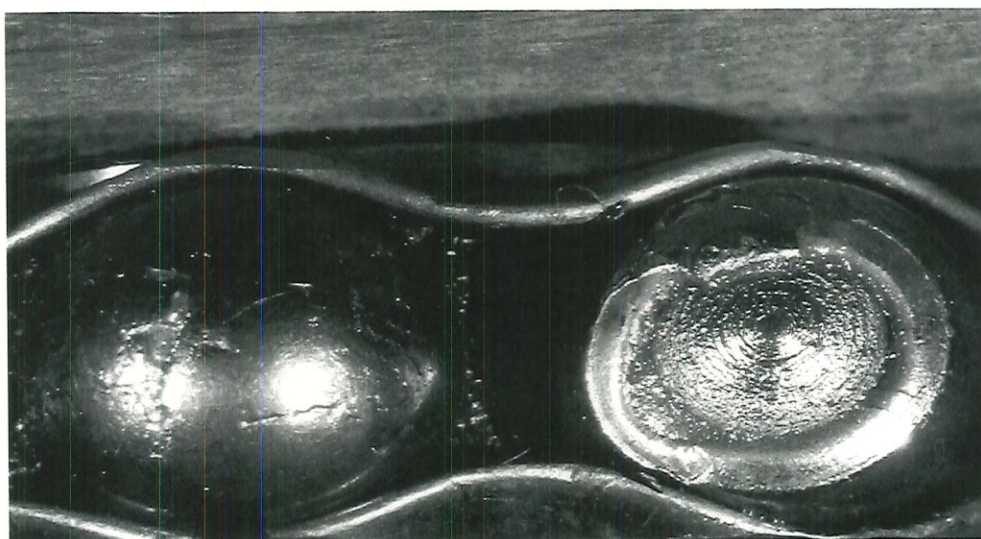


FIGURA A2.1 – Falha por fadiga numa das esferas (FAG E-20; $d \cong 5$ mm).

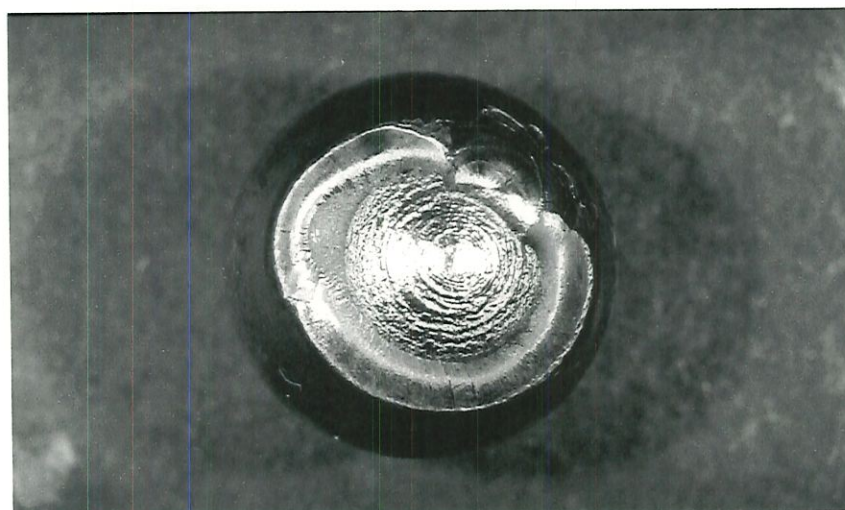


FIGURA A2.2 – Detalhe da falha por fadiga na esfera (FAG E-20; $d \cong 5$ mm).

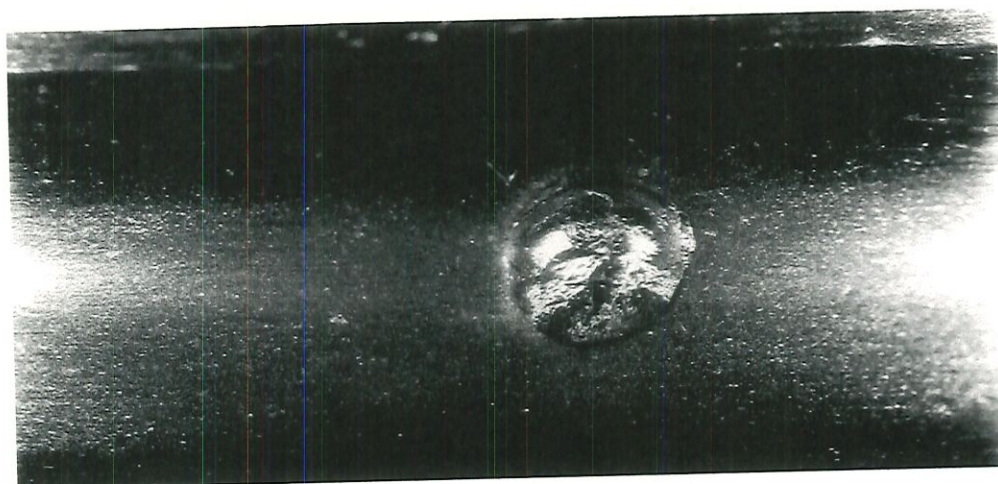


FIGURA A2.3 – Falha usinada na pista interna tipo pontual (FAG E-20; $d \approx 1,5$ mm).



FIGURA A2.4 – Falha usinada na pista interna tipo risco (FAG E-20; $A \approx 3$ mm²).

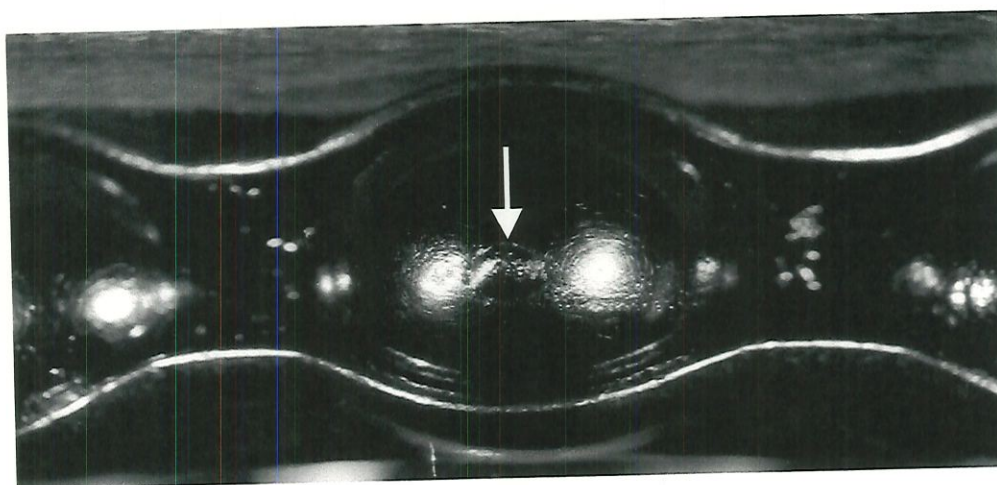


FIGURA A2.5 – Falha usinada na esfera tipo pontual (FAG E-20; $d \approx 1$ mm).

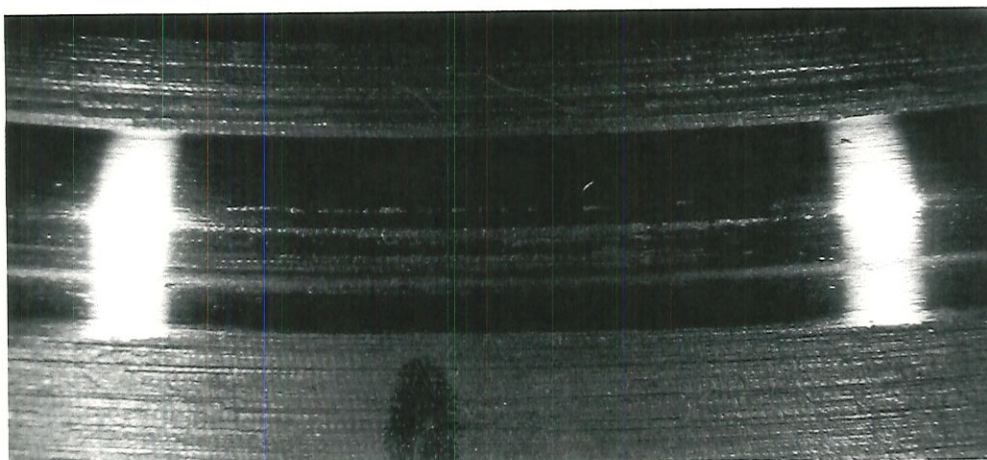


FIGURA A2.6 – Falha na pista externa tipo riscos longitudinais (FAG E-20).

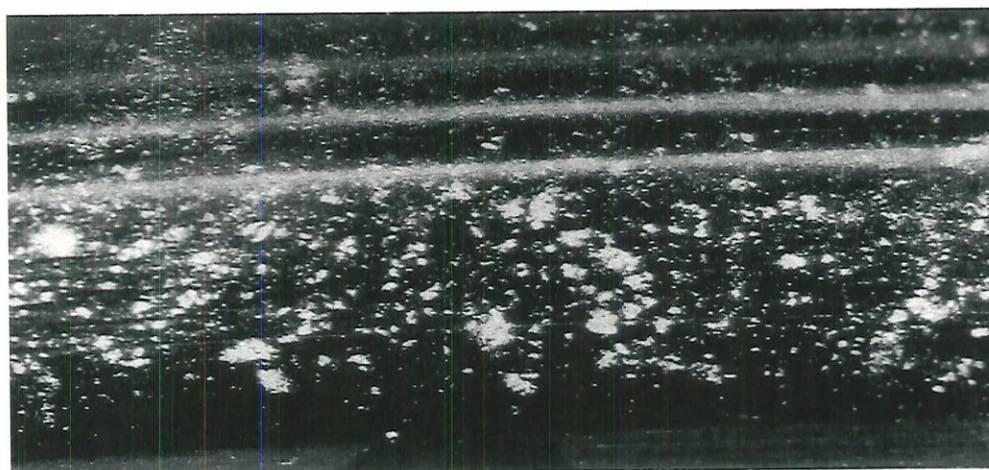


FIGURA A2.7 – Falha na pista externa tipo “cavitações” (IZHPZ 6204).

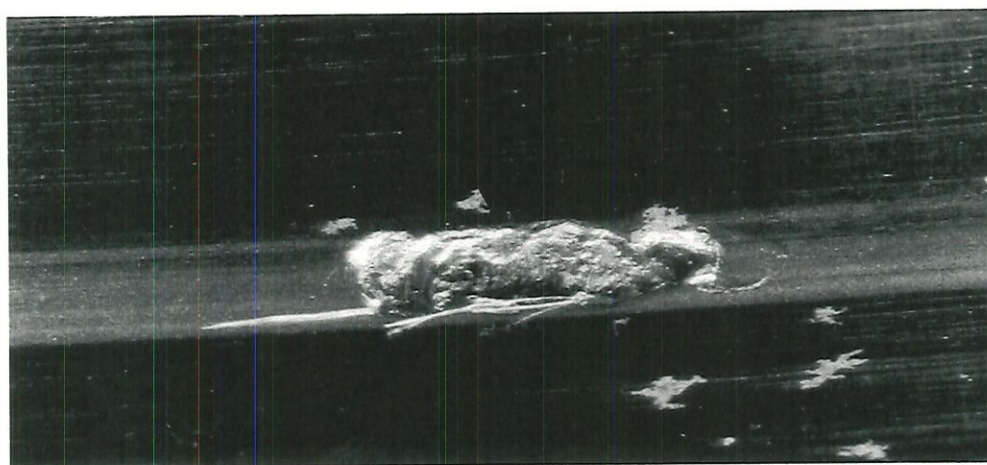


FIGURA A2.8 – Falha inicial na pista externa tipo “pitting” (FAG 2207-K).

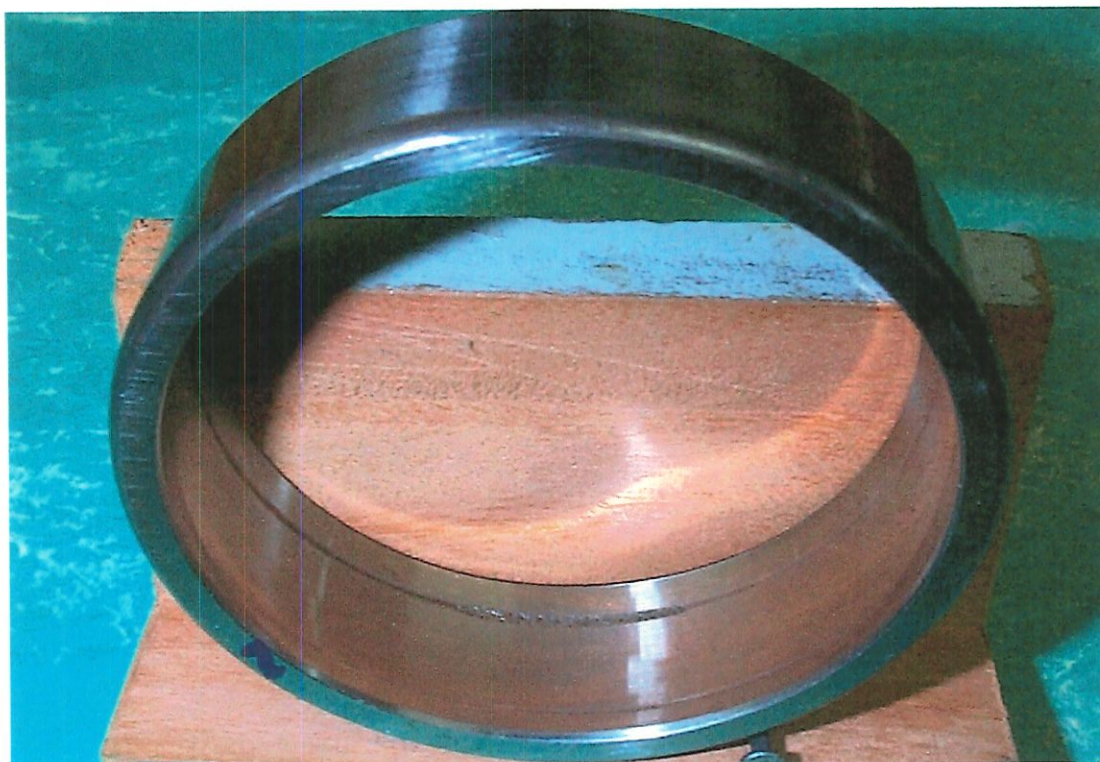


FIGURA A2.9 – Falha severa na pista externa do tipo “pitting” (SKF 2207-K).

Apêndice 3

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DOS PROGRAMAS

Neste apêndice são apresentados os principais programas que foram utilizados para realização do trabalho, especialmente aqueles relacionados com os resultados obtidos das simulações e dos ensaios experimentais. Todos os programas foram desenvolvidos e implementados no ambiente MATLAB ® (Versão 5.0). Uma descrição sucinta dos principais programas é feita em seguida.

A3.1 – PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO NOS MODELOS

Os programas desenvolvidos para simulação dos modelos de falhas em rolamentos seguem o procedimento descrito no capítulo 5, e estão divididos em três programas principais: *simula1*, *simula2* e *simula3*. Estes permitem a análise dos parâmetros nos domínios do tempo e da frequência e através da representação conjunta PWVD no plano tempo-frequência, respectivamente. Um esquema ilustrativo e descrição sucinta dos principais passos destes programas são apresentados em seguida.

Simula1

Este programa tem como objetivo gerar as assinaturas de vibração que simulam os sinais medidos no domínio do tempo em rolamentos sob diversos estágios ou condições de falha. No caso são simuladas oito condições de falhas localizadas nas pistas externa ou interna, utilizando os modelos de BRAUN & DATNER (1979) e MCFADDEN & SMITH (1984b). Um diagrama dos principais passos deste programa é resumido na FIGURA A3.1.

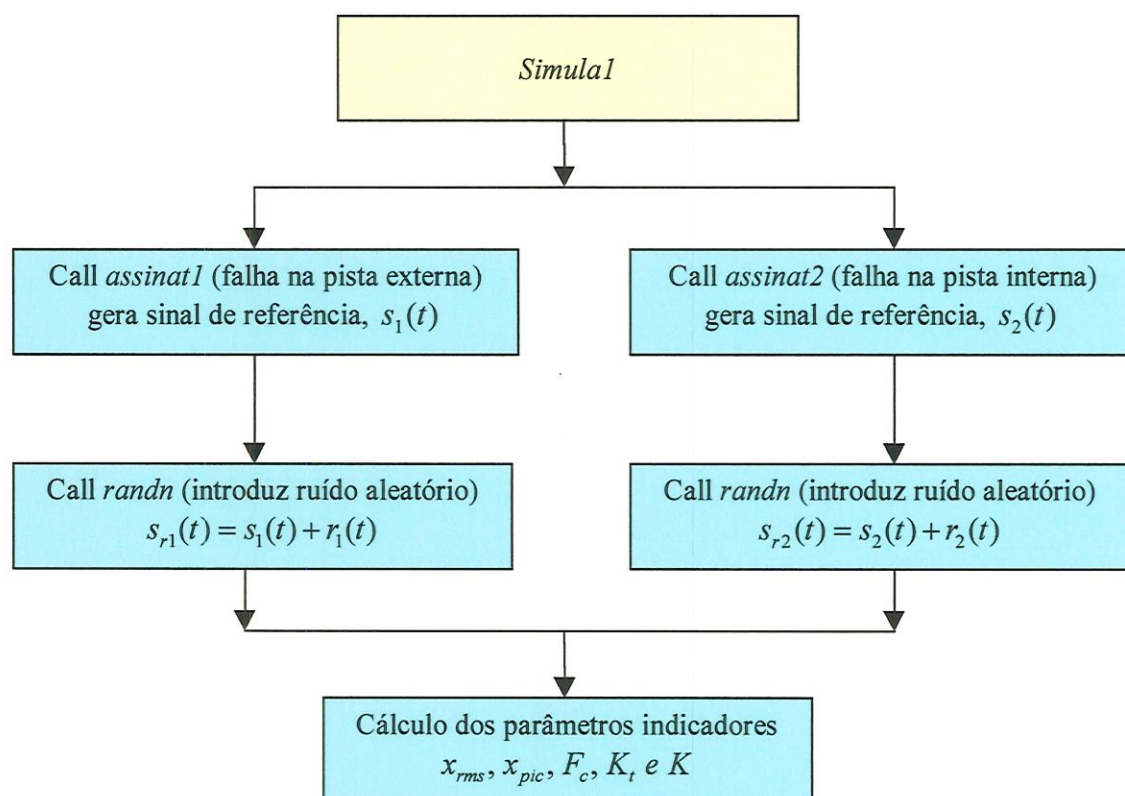


FIGURA A3.1 – Diagrama de blocos do programa *simula1*.

Simula2

Este programa tem como objetivo obter os espectros em frequência via FFT e pela técnica do envelope HFRT a partir das assinaturas de vibração simuladas no tempo para as diversas condições de falha. Para análise no domínio da frequência são utilizados os espectros do envelope HFRT em baixa frequência (0 a 600 Hz) através do parâmetro da razão de picos R_{pic} . Observa-se que a descrição dos principais passos para aplicação da técnica do envelope HFRT já foram descritos no capítulo 5 e ilustrados na FIGURA 5.2. Um diagrama dos principais passos deste programa é resumido na FIGURA A3.2.

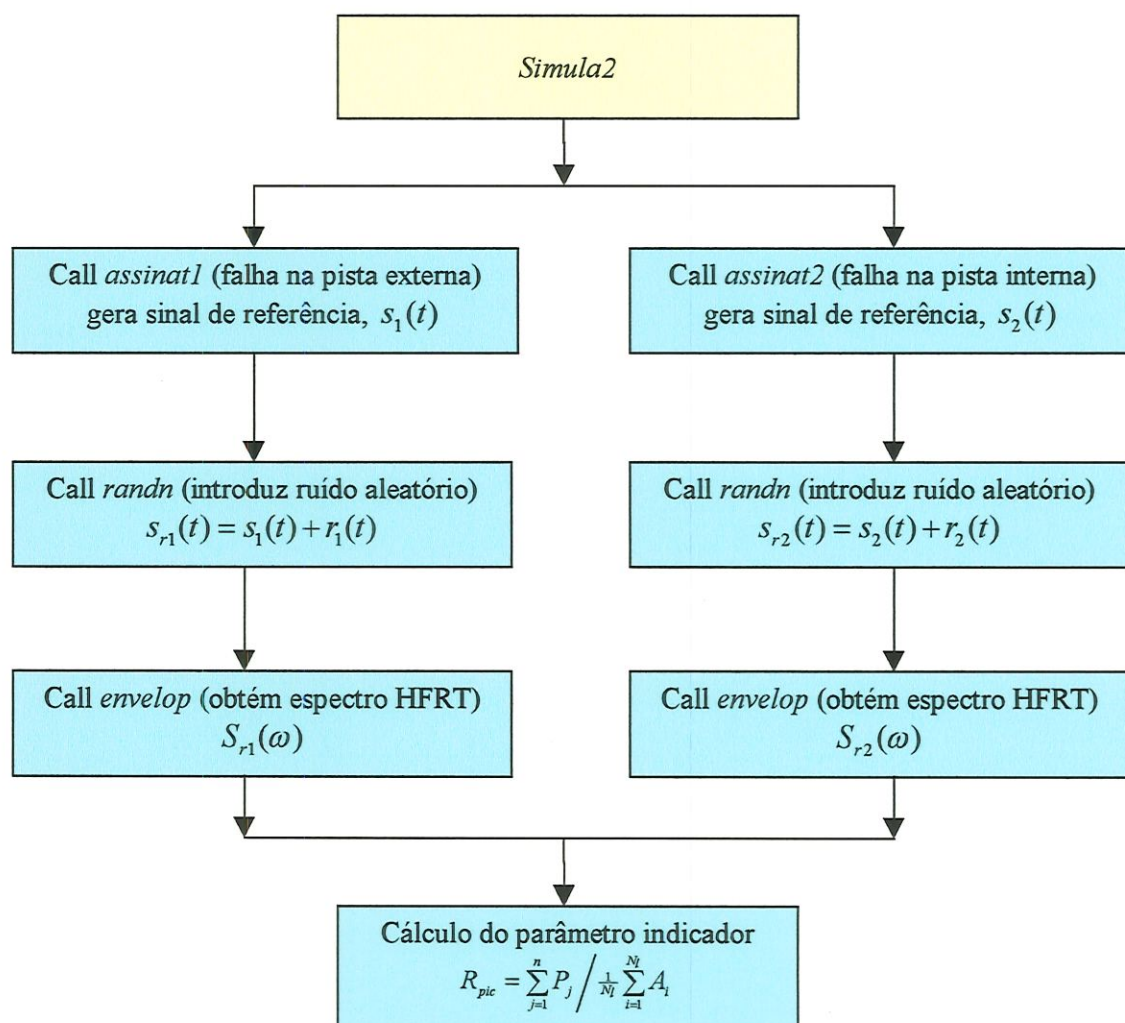


FIGURA A3.2 – Diagrama de blocos do programa *simula2*.

Simula3

Este programa tem como objetivo obter as representações conjuntas tempo-frequência através do método PWVD a partir das assinaturas de vibração simuladas no tempo para as diversas condições de falha. Para a análise dos mapas de contorno PWVD foi utilizado o parâmetro indicador da razão de picos T_{pic} no plano tempo-frequência. Um diagrama dos principais passos deste programa é resumido na FIGURA A3.3.

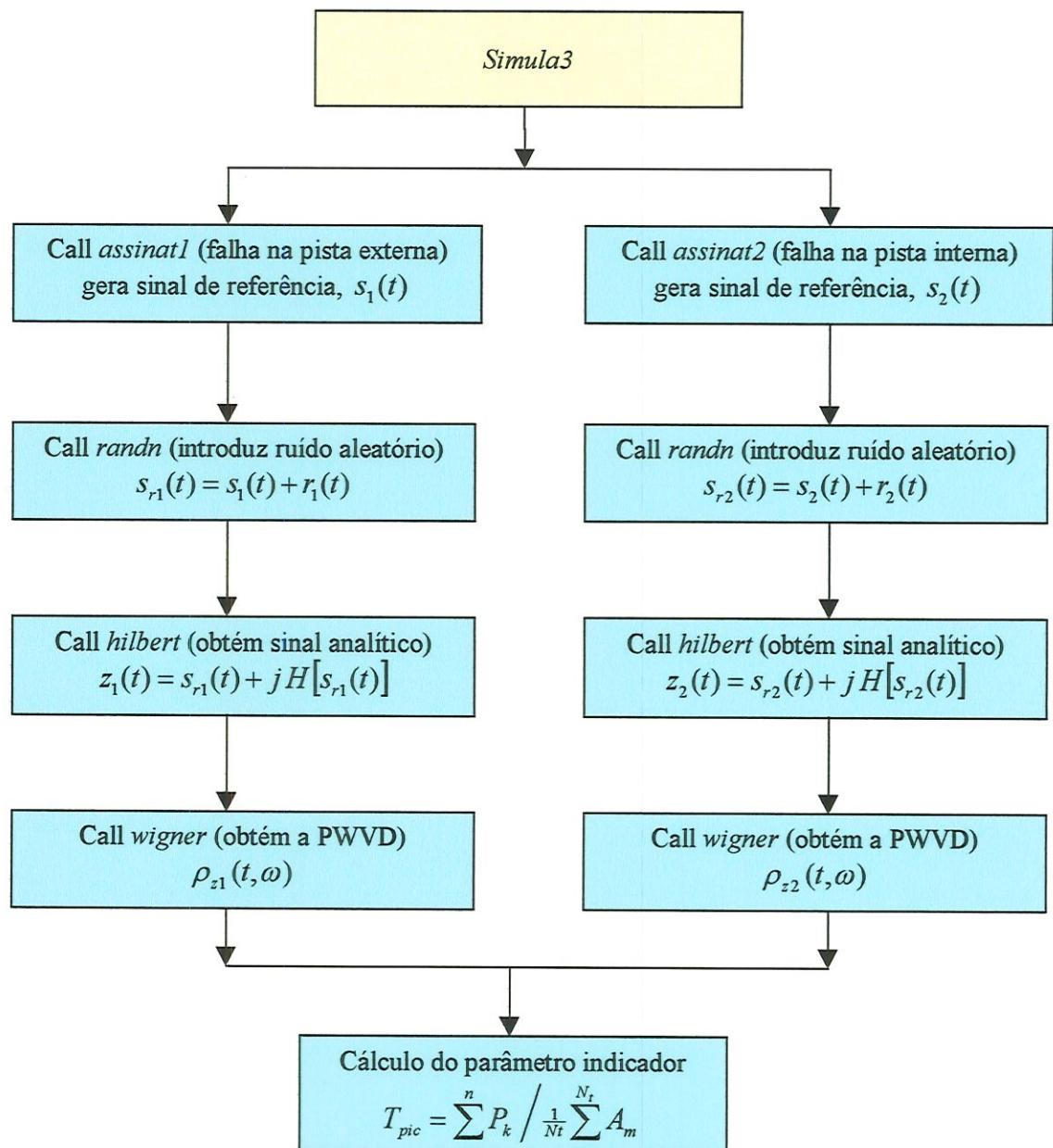


FIGURA A3.3 – Diagrama de blocos do programa *simula3*.

A3.2 – PROGRAMAS DE ANÁLISE EXPERIMENTAL

Os programas desenvolvidos para análise experimental de falhas em rolamentos seguem o procedimento descrito no capítulo 6, e estão divididos em três programas principais: *analise1*, *analise2* e *analise3*. Estes permitem

a análise dos sinais adquiridos no tempo obtidos do sistema de aquisição (Analisador Tektronix) através dos parâmetros nos domínios do tempo e da frequência e através da representação conjunta PWVD no plano tempo-frequência, respectivamente. Observa-se que os sinais medidos já devem ter sido convertidos para a extensão “.mat”. Um esquema ilustrativo e descrição sucinta dos principais passos destes programas são apresentados em seguida.

Analise1

Este programa tem como objetivo analisar os sinais de vibração medidos na bancada de ensaios experimentais a partir do sistema de aquisição no domínio do tempo, para os rolamentos sujeitos a diversos estágios ou condições de falhas. Um diagrama dos principais passos deste programa é resumido na FIGURA A3.4.

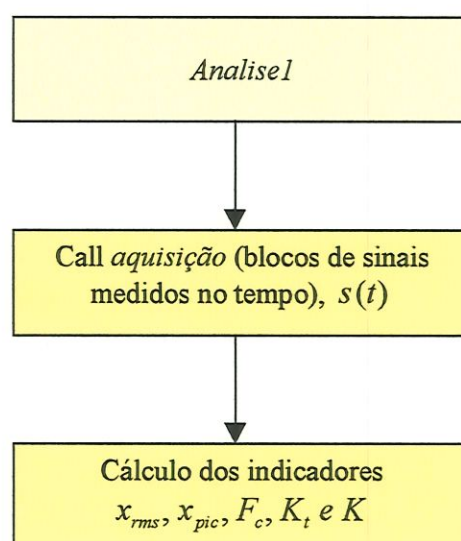


FIGURA A3.4 – Diagrama de blocos do programa *analise1*.

Analise2

Este programa tem como objetivo obter os espectros em frequência via FFT e pela técnica do envelope HFRT a partir dos sinais de vibração no tempo medidos na bancada de ensaios experimentais para as diversas

condições de falha. Para análise no domínio da frequência são utilizados os espectros do envelope HFRT em baixa frequência (0 a 600 Hz) através do parâmetro da razão de picos R_{pic} . Um diagrama dos principais passos deste programa é resumido na FIGURA A3.5.

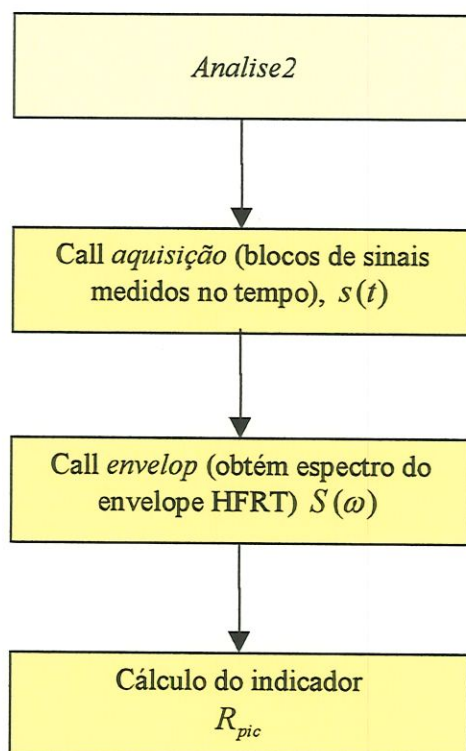
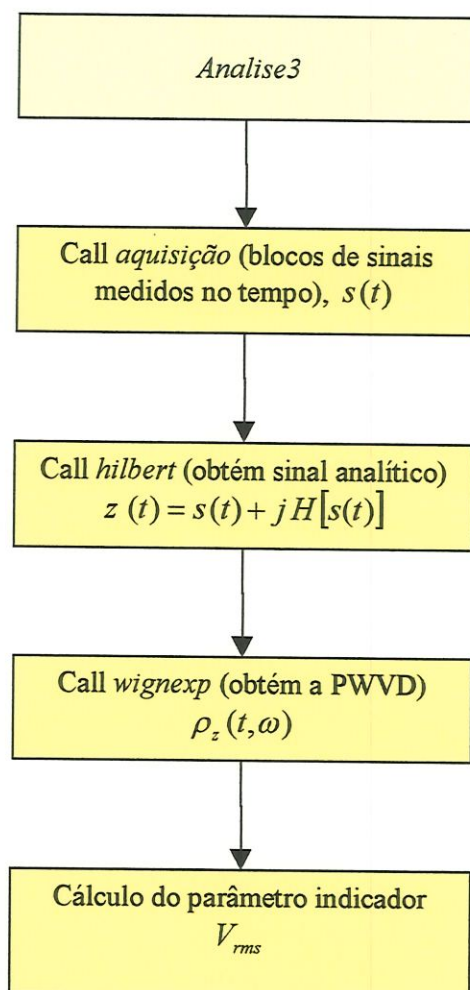


FIGURA A3.5 – Diagrama de blocos do programa *analise2*.

Analise3

Este programa tem como objetivo obter as representações conjuntas tempo-frequência através do método PWVD a partir dos sinais de vibração no tempo medidos na bancada de ensaios experimentais para as diversas condições de falha. Para a análise dos mapas de contorno PWVD foi utilizado o parâmetro indicador da razão de picos V_{rms} no plano tempo-frequência. Um diagrama dos principais passos deste programa é resumido na FIGURA A3.6.

FIGURA A3.6 – Diagrama de blocos do programa *analise3*.