



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**DIAGNÓSTICO DE FALHA EM REDUTORES DE
VELOCIDADE SUBMETIDO À VARIAÇÃO DE
POTÊNCIA**

Demian Gomes da Silva

Ilha Solteira - SP

1210001325





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DIAGNÓSTICO DE FALHA EM REDUTORES DE VELOCIDADE SUBMETIDO À VARIAÇÃO DE POTÊNCIA

Demian Gomes da Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**

Orientador: PROF. DR. ADYLES ARATO JUNIOR

Ilha Solteira, Agosto de 2001

BCpIS - FEIS • UNESP



Silva, Demian Gomes da
S586d Diagnóstico de falha em redutores de velocidade submetido à variação de potência / Demian Gomes da Silva. -- Ilha Solteira, 2001
xxv, 226p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2001

Orientador: Adyles Arato Júnior

Bibliografia: p.222-226

1.Redutores 2.Manutenção preditiva 3.Variação de potência 4.Vibração 5.Análise estatística

“Diagnóstico de Falha em Redutores de Velocidade Submetidos a Variação de Potência”

DEMIAN GOMES DA SILVA

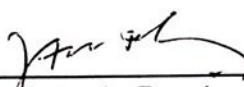
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM MECÂNICA DOS SÓLIDOS E APROVADA
EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

1210001325




Prof. Dr. João Antonio Pereira – Coordenador

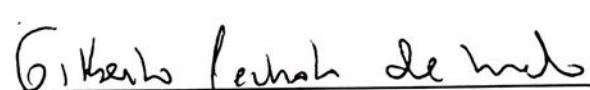
COMISSÃO EXAMINADORA:

Proc. 071/2002 - NAD 148/02

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÊC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMPO
02/12/02	31/12/02
RECEBIDA	TERMINO
<i>Ailza</i>	<i>Tz. 1325</i>
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
<i>Leocádo</i>	<i>5586d</i>
<i>autor</i>	
<i>R\$ 10,00</i>	


Prof. Dr. Adyles Arato Júnior - Orientador


Prof. Dr. José Maria Campos dos Santos


Prof. Dr. Gilberto Pechoto de Melo

0500001
ENG. MECÂNICA

Ilha Solteira – SP, setembro de 2001
Myz - 183538
myz - 54664

BCplS - FEIS - UNESP

Ao meu pai (in memorian) e a minha mãe, pelo essencial.



AGRADECIMENTOS

Ao professor **Adyles Arato Junior**, pela orientação, postura profissional, amizade e ensinamentos transmitidos ao longo do desenvolvimento, não só deste trabalho, mas de toda a minha formação.

Aos professores João Antônio Pereira, Antônio Eduardo Turra, João Antônio Diniz, André Luiz Seixlack, Gilberto Pechoto de Melo, João Batista Aparecido, Aparecido Carlos Gonçalves e Daniel Ivan Martins Delgorge, pelas discussões e formas de colaboração ao longo do trabalho.

A Marina e aos meus familiares pela atenção, compreensão e apoio concedidos ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Aos colegas Alessandro Roger Rodrigues, Adriano Silva Borges, Daniela Demarchi, Paulo Eduardo Barbieri e Otávio Villar Neto, pelo apoio, companheirismo e incentivo.

Aos técnicos do departamento Carlos José Santana (Grilo), Reginaldo Cordeiro da Silva e Edvaldo Silva Araújo (Quati) pelo apoio dado na construção e montagem da bancada experimental.

Às secretárias Vânia Maria Xavier e Sandra Lúcia Maciel Pereira, ao Elias Amaral dos Santos e ao João Josué Barbosa pela atenção e colaboração concedidas em diversos momentos.

À Fapesp – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro e por ter acreditado no êxito deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da FEIS – UNESP pelo apoio e pelas ótimas condições de trabalho oferecidas.

Muito Obrigado.

Demian Gomes da Silva – Agosto de 2001



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

1.1. MONITORAMENTO DE REDUTORES DE VELOCIDADE.....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO	4
1.3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO.....	5

2 VIBRAÇÃO EM REDUTORES DE ENGRENAGENS.....	7
---	---

3 TÉCNICAS USUAIS DE MONITORAMENTO

3.1 MÉDIA TEMPORAL SÍNCRONA (TSA).....	16
3.2 SINAL RESIDUAL	17
3.3 DEMODULAÇÃO TEMPORAL.....	18
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	19
3.5 ANÁLISE ESPECTRAL CLÁSSICA	23
3.6 TRANSFORMADA CURTA DE FOURIER (STFT).....	24
3.7 TRANSFORMADA WAVELET	26
3.8 DISTRIBUIÇÕES ENERGÉTICAS: WIGNER-VILLE E PSEUDO WIGNER-VILLE	28
Distribuição de Wigner-Ville	30
Distribuição Pseudo Wigner-Ville.....	31

4 COMPORTAMENTO DAS TÉCNICAS USUAIS DE MONITORAMENTO SOB CONDIÇÕES CONSTANTES DE POTÊNCIA

4.1 MÉDIA TEMPORAL SÍNCRONA (TSA).....	37
4.2 SINAL RESIDUAL	40
4.3 ANÁLISE POR DEMODULAÇÃO.....	42
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	45
4.4.1 Momento de Segunda Ordem (Variância).....	45
4.4.2 Parâmetro RMS	46
4.4.3 Parâmetro Skewness	48
4.4.4 Parâmetro Kurtosis	49
4.4.5 Parâmetro Fator de Crista.....	50
4.5 ANÁLISE ESPECTRAL CLÁSSICA	52
4.6 TRANSFORMADA CURTA DE FOURIER (STFT).....	54
4.7 TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA	58
4.8 DISTRIBUIÇÃO WIGNER-VILLE.....	61
4.9 DISTRIBUIÇÃO PSEUDO WIGNER-VILLE	64
4.10 CONCLUSÕES GERAIS SOBRE AS TÉCNICAS USUAIS SOB CONDIÇÕES CONSTANTES DE POTÊNCIA.....	67

5 COMPORTAMENTO DAS TÉCNICAS USUAIS DE MONITORAMENTO SOB CONDIÇÕES VARIÁVEIS DE POTÊNCIA

5.1	MÉDIA TEMPORAL SÍNCRONA.....	72
5.2	SINAL RESIDUAL	74
5.3	DEMODULAÇÃO TEMPORAL.....	76
5.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	80
5.4.1	Momento de Segunda Ordem (Variância).....	80
5.4.2	Fator Skewness.....	81
5.4.3	Fator Kurtosis.....	82
5.4.4	Fator de Crista	83
5.5	ANÁLISE ESPECTRAL CLÁSSICA	83
5.6	TRANSFORMADA CURTA DE FOURIER (STFT)	87
5.7	TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA	91
5.8	DISTRIBUIÇÃO DE WIGNER-VILLE.....	93
5.9	DISTRIBUIÇÃO PSEUDO WIGNER-VILLE	99
5.10	CONCLUSÕES GERAIS SOBRE AS TÉCNICAS USUAIS DE MONITORAMENTO QUANDO SUBMETIDAS À CONDIÇÃO DE POTÊNCIA VARIÁVEL	103

6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE SINAIS VIBRATÓRIOS

6.1	CLASSIFICAÇÃO DOS SINAIS	105
6.2	MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DE SINAIS	109
6.3	TEORIA DA PROBABILIDADE: MODELAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS ALEATÓRIOS	111
6.4	FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP): PROPRIEDADES, CARACTERÍSTICAS E MODELOS	115
6.5	FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE BETA	123
6.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DE SINAIS VIBRATÓRIOS, BASEADA NA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE BETA	129
	Análise Histórica Gobal.....	131
	Análise Individual Histórica.....	132
6.7	Análise Individual Independente	136
6.8	ANÁLISE HISTÓRICA GLOBAL, INDIVIDUAL HISTÓRICA E INDIVIDUAL INDEPENDENTE: APLICAÇÃO NA DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS	138
	Pré-Processamento do Sinal de Vibração.....	139
	Normalização do Sinal de Vibração Pré-Processado	141
6.9	DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS NO DENTADO: APLICAÇÃO DA ANÁLISE HISTÓRICA GLOBAL, INDIVIDUAL HISTÓRICA E INDIVIDUAL INDEPENDENTE	146
	Dinâmica do Acoplamento: Formação da Frequência de Engrenamento.....	147
	Análise Histórica Global	152
	Análise Histórica Individual.....	153
	Análise Individual Independente	153

7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

7.1	BANCADA EXPERIMENTAL	155
7.2	INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA	158
7.3	ENSAIOS DE CURTA DURAÇÃO	162
	Critérios e Condições Gerais Adotadas.....	162
	Procedimentos Utilizados na Aquisição dos Parâmetros de Estudo: Rotação, Torque e Vibração	164
7.4	PRÉ-PROCESSAMENTO DO SINAL DE VIBRAÇÃO.....	167
7.5	INFLUÊNCIA DO TORQUE, ROTAÇÃO E POTÊNCIA SOBRE OS SINAIS DE VIBRAÇÃO	172
7.6	PROCESSAMENTO DOS SINAIS VIBRATÓRIOS: GERAÇÃO DO MAPM4.....	178



7.7 RESULTADOS FINAIS: ANÁLISE HISTÓRICA E ANÁLISE DE DIAGNÓSTICO INDEPENDENTE	
.....	185
Sinais Vibratórios Pré-Processados	186
Análise Histórica: Aplicação do Parâmetro M4Global	194
Análise Histórica Descritiva: Aplicação do MapM4 Histórico (HMM4).....	199
Análise Diagnóstico Independente: Aplicação do MapM4 Independente (IMM4).....	208

8 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

DISCUSSÕES SOBRE A METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA A DETECÇÃO DE FALHAS EM REDUTORES SUBMETIDOS À VARIAÇÃO DE POTÊNCIA	219
Discussões sobre o pré-processamento do sinal vibratório	219
Discussões sobre os parâmetros M4GLOBAL, HMM4 E IMM4	220
CONCLUSÕES FINAIS	223

9 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	225
---	------------

APÊNDICE 1.....	A-1
------------------------	------------

APÊNDICE 2.....	A-5
------------------------	------------

APÊNDICE 3.....	A-8
------------------------	------------

APÊNDICE 4.....	A-18
------------------------	-------------

APÊNDICE 5.....	A-22
------------------------	-------------



LISTA DE ABREVIATURAS

CO -	Condição operacional da bancada experimental.
DEMODO -	Rotina computacional responsável pelo calculo da demodulação.
DRM4 -	Diferença relativa entre o quarto momento da FDP Beta tomada em todo o engrenamento e o quarto momento tomado individualmente em cada dente.
FC -	Fator de crista.
FDP -	Função densidade de probabilidade
FFT -	Algoritmo computacional para calculo da transformada de Fourier
HighFilter -	Rotina computacional responsável pela filtragem do sinal de vibração.
HMM4 -	Análise individual histórica utilizando o quarto momento da FDP Beta.
IFFT -	Algoritmo computacional para calculo da transformada inversa de Fourier
IMM4 -	Análise individual independente utilizando o quarto momento da FDP Beta.
M4GLOBAL -	Quarto momento em torno da origem da FDP Beta, tomando todo o engrenamento.
MapM4 -	Mapa gráfico descritivo da condição operacional do engrenamento.
PreTSA -	Rotina computacional responsável pelo cálculo da média temporal síncrona.
STFT -	Transformada curta de Fourier
TSA -	Média temporal síncrona
WVD -	Distribuição de Wigner-Ville



LISTA DE SIMBOLOS

f_r	Frequência de giro do eixo.
$Y_a, Y_b, Y_{bn}, Y_{gn}, Y_{ap}, Y_{\Omega}$	Amplitude do sinal
t	Tempo
N	Número de dentes
f_e	Frequência de engrenamento
n	Número de harmônicos
ϕ_n, ϕ_j	Ângulo de fase
$\delta(t)$	Função impulso unitário
ξ	Constante de tempo do decaimento
Ω	Frequência natural
T_d, T	Período de repetição
q_0	Máxima intensidade de carga
ε	Fator de distribuição de carga
θ	Posição angular na posição de carga
$q(t)$	Distribuição de carga
$y(iT)$	Média temporal síncrona
$x(iT)$	Bloco de dados original
r	Número de blocos
$f(x), p(x)$	Função densidade de probabilidade
M_o^k	k-ésimo momento em torno da origem
M_m^k	k-ésimo momento em torno da média

$E\{ \}$	Operador valor esperado
μ	Média teórica
Ma^k	k-ésimo momento amostral
$\bar{x}$	valor médio amostral
s	Variância amostral
ω	Frequência de rotação
$x(t), x(u)$	Sinal temporal
$X(\omega)$	Sinal no domínio da frequência
$\psi(t),$	Função wavelet mãe
$\Psi(\tau, s)$	Transformada wavelet contínua
τ	Parâmetro de translação ou intervalo de tempo
s	Escala, utilizada na transformada wavelet
$\rho(t, f).$	Densidade energética
ξ	Intervalo de frequência
d	Distância
ν	Frequência

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Espectro característico de um redutor de engrenagens, contendo as fontes de ruídos relacionadas com o seu funcionamento normal.	9
Figura 2.2- Espectro característico de um redutor de engrenagens, contendo as fontes de ruídos relacionadas com funcionamento normal conjuntamente com aquelas provenientes dos defeitos mais comuns.....	12
Figura 3.1- Gráfico demonstrativo do processo para obtenção da média temporal síncrona TSA.	17
Figura 3.2- Sinal não estacionário $x(u)$ e a janela curta de tempo $h^*(u-t)$ centralizada no tempo t	26
Figura 3.3- (a) função transformadora Morlet; (b) função transformadora Meyer	27
Figura 4.1 – Sinal 1: representação temporal nas condições nominais, sem a presença de nenhum defeito	35
Figura 4.2 - Sinal 2: representação temporal nas condições nominais, cuja amplitude do defeito modulador corresponde a 15% da amplitude da frequência de engrenamento.....	35
Figura 4.3 - Sinal 3: representação temporal nas condições nominais, cuja amplitude do defeito modulador corresponde a 30% da amplitude da frequência de engrenamento, indicando assim, um agravamento na excentricidade da coroa.....	36
Figura 4.4 - Sinal 4: representação temporal nas condições nominais, com defeito pontual no dente 24.....	36
Figura 4.5– Média temporal síncrona do sinal 1, condições nominais de operação, sem a presença de qualquer defeito.	38
Figura 4.6 – Média temporal síncrona do sinal 2, condições nominais de operação, com presença de uma excentricidade, na ordem de 15%.....	38
Figura 4.7 – Média temporal síncrona do sinal 3, condições nominais de operação, com presença da excentricidade na ordem de 30%.....	39
Figura 4.8 – Média temporal síncrona do sinal 4, simulado sob condições nominais de operação, com presença de uma trinca no dente número 24.	39
Figura 4.9 – Sinal temporal residual do sinal 1, simulado sob condições nominais de operação, sem a presença de qualquer defeito.....	40
Figura 4.10 – Sinal temporal residual do sinal 2, simulado sob condições nominais de operação, com presença de uma excentricidade, na ordem de 15%.....	41
Figura 4.11 – Sinal residual temporal do sinal 3, simulado sob condições nominais de operação, com a presença de uma excentricidade, na ordem de 30%.....	42
Figura 4.12– Sinal temporal residual do sinal 4, simulado sob condições nominais de operação, com presença de uma trinca no dente número 25.	42
Figura 4.13 – Gráfico do sinal demodulado, nas condições nominais, sem nenhum defeito.	43
Figura 4.14 - Gráfico do sinal demodulado, nas condições nominais, com defeito modulador em 15%.....	43

Figura 4.15 - Gráfico do sinal demodulado, nas condições nominais, com defeito modulador em 30%.....	44
Figura 4.16 - Gráfico do sinal demodulado, nas condições nominais, com defeito pontual.	44
Figura 4.17 – Gráfico comparativo do parâmetro variância, demonstra os valores deste parâmetro para as condições descritas no gráfico.	45
Figura 4.18 - Gráfico comparativo do parâmetro variância, demonstra os valores deste parâmetro para as condições descritas no gráfico.	46
Figura 4.19 - Gráfico comparativo do parâmetro RMS, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas.	47
Figura 4.20 - Gráfico comparativo do parâmetro RMS, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas no gráfico.	47
Figura 4.21 - Gráfico comparativo do parâmetro skewness, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas.	48
Figura 4.22 - Gráfico comparativo do parâmetro skewness, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas.	48
Figura 4.23 - Gráfico comparativo do parâmetro kurtosis, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas.	49
Figura 4.24 - Gráfico comparativo do parâmetro kurtosis, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas.	50
Figura 4.25 - Gráfico comparativo do fator de crista, representativo dos valores deste parâmetro para as condições descritas.	51
Figura 4.26 - Gráfico comparativo do parâmetro fator de crista, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas.	51
Figura 4.27 – Zoom espectral na região de análise, nota-se a pequena amplitude da banda lateral, em razão de uma pequena excentricidade residual não significativa.	52
Figura 4.28 - Zoom espectral na região de análise, nota-se o aumento da banda lateral, em razão de uma pequena evolução da excentricidade, cuja amplitude corresponde a 15% da amplitude da frequência de engrenamento.	53
Figura 4.29 - Zoom espectral na região de análise, nota-se o aumento das bandas laterais, em razão de uma evolução da excentricidade, cuja amplitude corresponde a 30% da amplitude da frequência de engrenamento.	53
Figura 4.30 - Zoom espectral na região de análise, nota-se a presença de diversas linhas espectrais se estendendo sobre uma ampla região e com pequenas amplitudes, em virtude da presença de um defeito pontual.	54
Figura 4.31 – Transformada Curta de Fourier (STFT), para as condições nominais sem a presença de nenhum defeito.	56
Figura 4.32 – Transformada Curta de Fourier (STFT), para as condições nominais, com defeito modulador em 15%.	56
Figura 4.33 - Transformada Curta de Fourier (STFT), para as condições nominais, com defeito modulador em 30%.	57
Figura 4.34 - Transformada Curta de Fourier (STFT), para as condições nominais, com defeito pontual no dente número 24.	57

Figura 4.35 - Transformada Wavelet contínua, para as condições nominais sem a presença de nenhum defeito, em que o eixo das abcissas indica o número de pontos e o das ordenadas as escalas.....	59
Figura 4.36 - Transformada Wavelet contínua, para as condições nominais, com defeito modulador em 15%, em que o eixo das abcissas indica o número de pontos e o das ordenadas as escalas..	59
Figura 4.37 - Transformada Wavelet contínua, para as condições nominais, com defeito modulador em 30%, em que o eixo das abcissas indica o número de pontos e o das ordenadas as escalas.	60
Figura 4.38 - Transformada Wavelet contínua, para as condições nominais, com defeito pontual no dente número 24, em que o eixo das abcissas indica o número de pontos e o das ordenadas as escalas.	60
Figura 4.39 - Distribuição Wigner-Ville, para as condições nominais sem a presença de nenhum defeito.....	62
Figura 4.40 - Distribuição Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito modulador em 15%.....	62
Figura 4.41 - Distribuição Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito modulador em 30%.....	63
Figura 4.42 - Distribuição Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito pontual no dente número 24.....	63
Figura 4.43 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, para as condições nominais sem a presença de nenhum defeito. ..	65
Figura 4.44 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito modulador em 15%.....	65
Figura 4.45 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito modulador em 30%.....	66
Figura 4.46 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito pontual no dente número 24.....	66
Figura 5.1 - Sinal 5: representação temporal, contendo 20 giros da coroa em condições não nominais, representada pelo aumento de torque em 25%, com defeito modulador em 30%.....	70
Figura 5.2 - Sinal 6: representação temporal, contendo 20 giros da coroa em condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito modulador em 30%.	71
Figura 5.3 - Sinal 7: representação temporal, contendo 20 giros da coroa em condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito pontual.	71
Figura 5.4 - Sinal 8: representação temporal, contendo 20 giros da coroa em condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito pontual.....	72
Figura 5.5 - Média temporal síncrona do sinal 1, condições nominais de operação, com defeito pontual no dente 24.	73
Figura 5.6 - Média temporal síncrona do sinal 7, condições não nominais de operação, com aumento de 25% na demanda de torque e defeito pontual no dente 24.....	73
Figura 5.7 - Média temporal síncrona do sinal 8, condições não nominais de operação, com aumento de 25% na rotação e defeito pontual no dente 24.	74
Figura 5.8 - Sinal residual temporal do sinal 1, condições nominais de operação, com defeito pontual no dente 24.	75
Figura 5.9 - Sinal residual temporal do sinal 7, condições não nominais de operação, com aumento de 25% na demanda de torque e defeito pontual no dente 24.....	75
Figura 5.10 - Sinal residual temporal do sinal 8, condições não nominais de operação, com aumento de 25% na rotação e defeito pontual no dente 24.	76
Figura 5.11 - Gráfico do sinal demodulado, condições nominais, com defeito modulador em 30%.....	77

Figura 5.12 - Gráfico do sinal demodulado, condições não nominais, representada pelo aumento na demanda de torque em 25%, com defeito modulador em 30%.....	77
Figura 5.13 - Gráfico do sinal demodulado, condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito modulador em 30%.....	78
Figura 5.14 - Gráfico do sinal demodulado, condições nominais, com defeito pontual.	79
Figura 5.15 - Gráfico do sinal demodulado, condições não nominais, representada pelo aumento na demanda de torque em 25%, com defeito pontual.	79
Figura 5.16 - Gráfico do sinal demodulado, condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito pontual.	80
Figura 5.17 - Gráfico comparativo do fator variância, às condições descritas no gráfico, para defeito pontual.....	81
Figura 5.18 - Gráfico comparativo do fator skewness, às condições descrita, para defeito pontual.....	82
Figura 5.19 - Gráfico comparativo do fator kurtosis as condições descritas, para o defeito pontual.....	82
Figura 5.20 - Gráfico comparativo do fator de crista as condições descrita, para o defeito pontual.....	83
Figura 5.21 - Zoom espectral na região de análise, condições nominais, nota-se a amplitude das banda laterais, devido a excentricidade na ordem de 30% da amplitude da frequência de engrenamento.	84
Figura 5.22 - Zoom espectral na região de análise, condições não nominais, representada pelo aumento na demanda de torque de 25%, nota-se a amplitude das banda laterais, devido a excentricidade na ordem de 30% da amplitude da frequência de engrenamento.	84
Figura 5.23 - Zoom espectral na região de análise, condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, nota-se a amplitude das banda laterais, devido a excentricidade na ordem de 30% da amplitude da frequência de engrenamento.....	85
Figura 5.24 - Zoom espectral na região de análise, condições nominais, com um defeito pontual	86
Figura 5.25 - Zoom espectral na região de análise, condições não nominais, representada pelo aumento da demanda de torque em 25%, com um defeito pontual	86
Figura 5.26 - Zoom espectral na região de análise, condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com um defeito pontual.	87
Figura 5.27 - Transformada Curta de Fourier (STFT), para as condições nominais, com defeito modulador em 30%.	88
Figura 5.28 - Transformada Curta de Fourier (STFT), para condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito modulador em 30%.....	88
Figura 5.29 - Transformada Curta de Fourier (STFT), para condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito modulador em 30%.	89
Figura 5.30 - Transformada Curta de Fourier (STFT), condições nominais, com defeito pontual.	90
Figura 5.31 - Transformada Curta de Fourier (STFT), condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito pontual.....	90
Figura 5.32 - Transformada Curta de Fourier (STFT), condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito pontual.....	91
Figura 5.33 - Transformada Wavelet contínua, para as condições nominais, com defeito modulador em 30%.....	92



Figura 5.34 - Transformada Wavelet contínua, condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito modulador em 30%.....	92
Figura 5.35 - Transformada Wavelet contínua, para condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito modulador em 30%.....	93
Figura 5.36 - Transformada Wavelet contínua, para as condições nominais, com defeito pontual no dente 24.	94
Figura 5.37 - Transformada Wavelet contínua, para condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito pontual no dente 24.	94
Figura 5.38 - Transformada Wavelet contínua, condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito pontual no dente 24.....	95
Figura 5.39 - Distribuição Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito modulador em 30%.....	96
Figura 5.40 - Distribuição Wigner-Ville, para condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito modulador em 30%.....	96
Figura 5.41 - Distribuição Wigner-Ville, para condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito modulador em 30%.....	97
Figura 5.42 - Distribuição Wigner-Ville, condições nominais, com defeito pontual no dente 24.....	98
Figura 5.43 - Distribuição Wigner-Ville, condições não nominais, representado pelo aumento do torque em 25%, com defeito pontual no dente 24.....	98
Figura 5.44 - Distribuição Wigner-Ville, condições não nominais, representado pelo aumento da rotação em 25%, com defeito pontual no dente 24.....	99
Figura 5.45 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, condições nominais, com defeito modulador em 30%.....	100
Figura 5.46 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito modulador em 30%.....	100
Figura 5.47 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito modulador em 30%.....	101
Figura 5.48 - Distribuição Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito pontual no dente 24.	102
Figura 5.49 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, condições não nominais, representado pelo aumento do torque em 25%, com defeito pontual no dente 24.....	102
Figura 5.50 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, condições não nominais, representado pelo aumento da rotação em 25%, com defeito pontual no dente 24.	103
Figura 6.1: Classificação dos Sinais.....	108
Figura 6.2: Representação de um sinal puramente aleatório com 128 pontos.....	109
Figura 6.3: (a) Sinal temporal; (b) Conjunto estatístico equivalente.	110
Figura 6.4: (a) Sinal temporal; apresentando uma faixa definida entre os tempos de 0.2 e 0.25 s (b) Conjunto estatístico equivalente S juntamente com o sub-conjunto Z.....	111
Figura 6.5: Representação de um sinal determinístico exatamente senoidal.....	115
Figura 6.6: Definição da duração temporal durante o intervalo entre x e $(x + dx)$	115



Figura 6.7: Função densidade de probabilidade do sinal senoidal, descrito pela Eq. 6.17.....	118
Figura 6.8: Cálculo da função densidade de probabilidade $p(x)$ para um processo aleatório.....	119
Figura 6.9: Processo de modelamento e caracterização estatístico de um sinal: (a) sinal temporal representativo de uma senoide; (b) espaço amostral contendo todos os valores da amplitude deste sinal; (c) função densidade de probabilidade.....	121
Figura 6.10: Algumas das possíveis formas simétricas obtidas com a variação de α e β para a FDP Beta. Pode-se notar, para α e $\beta = 1$, a FDP Beta representa uma distribuição Uniforme e para α e $\beta = 5$, a representação é de uma distribuição Gaussiana.....	124
Figura 6.11: Algumas das possíveis formas assimétricas obtidas com a variação de α e β para a FDP Beta.....	125
Figura 6.12: Figuras descritivas da obtenção de uma função densidade de probabilidade específica: (a) sinal puramente senoidal com 1024 pontos; (b) fdp Beta específica deste sinal, com $\alpha = \beta = 0.74$	128
Figura 6.13: Etapas do Processo que envolve a descrição de um sinal.....	129
Figura 6.14: Figuras representativas de dois sinais vibratórios relativos ao mesmo equipamento: (a) sinal vibratório obtido sob condições normais; (b) FDP Beta representativa deste sinal; (c) sinal vibratório obtido sob condições com falha; (d) FDP Beta representativa deste sinal com falha.....	131
Figura 6.15: Etapas fundamentais da análise histórica global.....	132
Figura 6.16: Demonstração do comportamento da FDP aplicada a sinais periódicos: (a) sinal senoidal periódico formado por um único período fundamental $T = 0.5$ s; (b) FDP Beta deste sinal; (c) sinal senoidal periódico formado por quatro períodos fundamentais $T = 0.5$ s, as linhas tracejadas separam os períodos; (b) FDP Beta deste sinal.....	134
Figura 6.17: Etapas fundamentais da análise histórica global.....	135
Figura 6.18: Descrição do procedimento utilizado na análise individual histórica.....	136
Figura 6.19: Descrição do procedimento utilizado na análise individual independente.....	137
Figura 6.20: Descrição do procedimento de pré-processamento do sinal vibratório.....	140
Figura 6.21 - Resposta vibratória real de um redutor de velocidade em perfeitas condições, após as fases de pré-processamento: (a) potência operacional de 166 W; (b) potência operacional de 254 W.....	142
Figura 6.22 - Sinal puramente senoidal: (a) sinal senoidal com amplitude unitária; (b) sinal senoidal com amplitude unitária dividido por seu valor RMS (0.704); (c) sinal senoidal com amplitude igual a cem; (b) sinal senoidal com amplitude igual à cem dividido por seu valor RMS (70.4). Pode-se notar que as figuras (b) e (d) são exatamente iguais.....	143
Figura 6.23 - Sinal senoidal composto por três componentes: (a) sinal com fator de ampliação A unitário; (b) sinal senoidal com amplitude unitária dividido por seu valor RMS (4.167); (c) sinal senoidal com fator de amplificação A igual a cem; (d) sinal senoidal com fator de amplificação A igual a cem dividido por seu valor RMS (416.7). Pode-se notar que as figuras (b) e (d) são exatamente iguais.....	145
Figura 6.24: Descrição do procedimento de normalização do sinal vibratório.....	146
Figura 6.25: Modelo dinâmico simplificado de um par engrenado.....	148
Figura 6.26: Rigidez de um par de dentes.....	149
Figura 6.27: Resposta vibratório do par engrenado, em perfeito estado, apresentado pela Figura 6.25. As linhas tracejadas separam o período de engrenamento individual de cada um dos 20 dentes.....	151



Figura 6.28: Resposta vibratório do par engrenado, com uma falha pontual no dente 10. As linhas tracejadas separam o período de engrenamento individual de cada um dos 20 dentes.....	152
Figura 7.1 - Configuração modular adotada na bancada experimental.....	156
Figura 7.2 - Bancada experimental: (a) Vista geral; (b) Zoom dos módulos 1, 2, 3 e 4, pode-se observar os acoplamentos tipo Falk; (c) Zoom do módulo 5, pode-se observar os manômetros e registros de regulação e restrição do fluxo hidráulico.....	157
Figura 7.3 - Equipamentos elétricos utilizados na medição da potência elétrica absorvida da rede.....	159
Figura 7.4 - Esquema da cadeia de medição adotada para a aquisição dos sinais de vibração provenientes do redutor em estudo.....	158
Figura 7.5 - Vista geral do redutor devidamente instrumentado. Pode ser observado os acelerômetros, um posicionado axialmente e o outro radialmente ao eixo de entrada. Também nota-se o <i>encoder</i> posicionado no eixo de entrada com o auxílio de uma base magnética. Pode-se notar os cabos utilizados no aterramento do redutor e motor (coloração vermelha).....	158
Figura 7.6 - Esquema dos ensaio realizados.....	163
Figura 7.7 - Vistas do redutor mecânico em estudo: (a) condição de falha 1, pinhão sem nenhuma falha; (b) condição de falha 2, pinhão com o dente número 17 totalmente quebrado.....	163
Figura 7.8 - Esquema utilizado no pré-processamento dos sinais de vibração.....	167
Figura 7.9 - Sinal temporal original, obtido na condição de operação CO-1. (a) sinal referente ao trigger, (b) sinal de vibração radial.....	168
Figura 7.10 - Média Temporal Síncrona (TSA) do sinal temporal original, obtido radialmente na condição de operação CO-1.....	169
Figura 7.11 - Magnitude da resposta do filtro utilizado.....	170
Figura 7.12 - Magnitude (escala dB) e fase da resposta do filtro utilizado.....	170
Figura 7.13 - Média Temporal Síncrona filtrada até 300 Hz utilizando filtro Chebyshev, apresentando o sinal referente ao canal radial, obtido na condição de operação CO-1.....	171
Figura 7.14 - Média Temporal Síncrona filtrada para um único giro do pinhão, apresentando o sinal referente ao canal radial, obtido na condição de operação CO-1.....	172
Figura 7.15 - Espectro em amplitude da média temporal síncrona (TSA) em escala linear, obtido radialmente para a condição operacional CO-9 e condição de falha 1. Pode-se notar as componentes presentes, giro do eixo de entrada, frequência fundamental de engrenamento, seguido por seu primeiro e quarto harmônicos.....	173
Figura 7.16 - Espectro em amplitude da média temporal síncrona (TSA) filtrada, em escala linear, obtido radialmente para a condição operacional CO-9 e condição de falha 1. Pode-se notar a completa eliminação das componentes de baixa frequência.....	173
Figura 8.17 - Gráfico comparativo da variação do parâmetro RMS em relação à variação de torque.....	175
Figura 7.18 - Gráfico comparativo da variação do parâmetro RMS em relação à variação de rotação.....	175
Figura 7.19 - Gráfico comparativo da variação do parâmetro RMS em relação à variação de potência.....	176
Figura 7.20 - Gráfico comparativo da variação do parâmetro Fator de Crista em relação à variação de torque.....	176
Figura 7.21 - Gráfico comparativo da variação do parâmetro Fator de Crista em relação à variação de rotação.....	177



Figura 7.22 - Gráfico comparativo da variação do parâmetro Fator de Crista em relação à variação de potência. .	177
Figura 7.23 - Fluxograma representativo do processamento para obtenção do MapM4.....	179
Figura 7.24 - Média temporal síncrona (TSA) filtrada, obtido radialmente para a condição operacional CO-1, condição de falha 1.	180
Figura 7.25 - Média Temporal Síncrona filtrada para um único giro do pinhão, apresentando o sinal referente ao canal radial, condição de falha 1 e condição de operação CO-1, dividido pelo seu valor RMS.	181
Figura 7.26 - Média Temporal Síncrona filtrada para um único giro do pinhão, apresentando o sinal referente ao canal radial, obtido na condição de operação CO-1 dividido pelo seu valor RMS e normalizado (/ por $3 \cdot \pi$).	181
Figura 7.27 - Função densidade de probabilidade Beta, representativa de todo o engrenamento, para o caso CO-1.	182
Figura 7.28 - Sinal temporal normalizado, representativo de cada um dos dentes que compõe o pinhão, condição de operação CO-1 e condição de falha 1.....	182
Figura 7.29 - Função densidade de probabilidade Beta, representativa de cada um dos dentes que compõe o pinhão, condição de operação CO-1.....	183
Figura 7.30 - MapM4 representando o nível do defeito no pinhão. Condição de operação CO-1 e condição de falha 1.....	185
Figura 7.31 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-1 e condição de falha 1..	186
Figura 7.32 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-1 e condição de falha 2..	187
Figura 7.33 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-2 e condição de falha 1..	187
Figura 7.34 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-2 e condição de falha 2..	188
Figura 7.35 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-3 e condição de falha 1..	188
Figura 7.36 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-3 e condição de falha 2..	189
Figura 7.37 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-4 e condição de falha 1..	189
Figura 7.38 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-4 e condição de falha 2..	190
Figura 7.39 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-5 e condição de falha 1..	190
Figura 7.40 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-5 e condição de falha 2..	191
Figura 7.41 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-6 e condição de falha 1..	191
Figura 7.42 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-6 e condição de falha 2..	192
Figura 7.43 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-7 e condição de falha 1..	192
Figura 7.44 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-7 e condição de falha 2..	193
Figura 7.45 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-8 e condição de falha 1..	193
Figura 7.46 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-8 e condição de falha 2..	194

Figura 7.47 - Resultado comparativo da influência do torque sobre o parâmetro M4GLOBAL para a condição de falha 1 e condições de operação (CO) classe 1. Variação máxima de 10 %.....	195
Figura 7.48 - Resultado comparativo da influência do torque sobre o parâmetro M4GLOBAL para a condição de falha 2 e condições de operação (CO) classe 1. Variação máxima de 9 %.....	196
Figura 7.49 - Resultado comparativo da influência do torque sobre o parâmetro M4GLOBAL para a condição de falha 1 e 2 e condições de operação (CO) classe 1.	196
Figura 7.50 - Resultado comparativo da influência da rotação sobre o parâmetro M4GLOBAL para a condição de falha 1 e condições de operação (CO) classe 2. Variação máxima de 31 %.....	197
Figura 7.51 - Resultado comparativo da influência da rotação sobre o parâmetro M4GLOBAL para a condição de falha 2 e condições de operação (CO) classe 2. Variação máxima de 61 %.....	197
Figura 7.52 - Resultado comparativo da influência da rotação sobre o parâmetro M4GLOBAL para a condição de falha 1 e 2 e condições de operação (CO) classe 2.	198
Figura 7.53 - Função densidade de probabilidade Beta referente a condição de operação CO-4 e condição de falha 1 utilizada como referência. Parâmetros $\alpha = 1.9398$, $\beta = 20.0703$ e $M4 = 3.6494 \cdot 10^{-4}$	199
Figura 7.54 - Valores do parâmetro HMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 1.....	201
Figura 7.55 - Zoom dos valores do parâmetro HMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 1.....	201
Figura 7.56 - Valores do parâmetro HMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 1.....	203
Figura 7.57 - Zoom dos valores do parâmetro HMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 1.....	203
Figura 7.58 - Valores do parâmetro HMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 2.....	205
Figura 7.59 - Zoom dos valores do parâmetro HMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 2.....	205
Figura 7.60 - Valores do parâmetro HMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 2.....	207
Figura 7.61 - Zoom dos valores do parâmetro HMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 2.....	207
Figura 7.62 - Valores do parâmetro IMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 1.....	209
Figura 7.63 - Zoom dos valores do parâmetro IMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 1.....	209
Figura 7.64 - Valores do parâmetro IMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 1.....	212
Figura 7.65 - Zoom dos valores do parâmetro IMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 1.....	212
Figura 7.66 - Valores do parâmetro IMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 2.....	214

Figura 7.67 - Zoom dos valores do parâmetro IMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 2.	214
Figura 7.68 - Valores do parâmetro IMM4 para as últimas primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 2.	216
Figura 7.69 - Zoom dos valores do parâmetro IMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 2.	216
Figura A1.1 - Vista lateral da bancada experimental.....	A-1
Figura A1.2- Vista lateral da bancada experimental, a partir da qual pode-se observar os módulos que a compõem e ao fundo o amplificador/condicionador de sinais, microcomputador e o sistema A/D.	A-2
Figura A1.3 - Vista frontal da bancada experimental, a partir da qual pode-se observar o posicionamento dos acelerômetros.	A-3
Figura A1.4- Vista traseira da bancada experimental, a partir da qual pode-se observar os itens que a compõem ..	A-4
Figura A2.1 - Vista interna do redutor em estudo, a partir da qual pode-se observar os dentes intáctos.	A-5
Figura A2.2- Vista interna do redutor em estudo, a partir da qual pode-se observar o dente com falha.....	A-6
Figura A2.3 - Vista interna do redutor em estudo, a partir da qual pode-se observar o dente com falha.....	A-7
Figura A3.1- Esquema utilizado no pré-processamento dos sinais.....	A-8
Figura A4.1- Fluxograma representativo do processamento para a obtenção do MapM4	A-18



LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados na geração dos sinais estudados.....	34
Tabela 4.2: Sinais e suas condições representativas utilizada nas simulações.	34
Tabela 4.3: Conclusões gerais obtidas sobre as análise realizadas.	67
Tabela 5.1: Sinais e suas condições representativas utilizada nas simulações.	70
Tabela 7.1: Apresentação e especificações técnicas dos equipamentos que compõem a cadeia de medição dos sinais de vibração.	161
Tabela 7.2: Condições de aquisição utilizada nos ensaios.	165
Tabela 7.3: Condições operacionais utilizadas nos ensaios. As frequências ajustadas no inversor para as CO da classe I já estão devidamente corrigidas devido à variação do escorregamento do motor, resultante da variação de carga aplicada.	165
Tabela 7.4: Condições operacionais utilizadas nos ensaios relativas ao eixo de entrada do redutor.	166
Tabela 7.5: Fatores obtidos na caracterização dinâmica seguido pelas condições operacionais utilizadas nos ensaios.	174
Tabela 7.6: Valores de Beta M4 para cada um dos dentes, seguido pela diferença relativa em relação ao Beta M4 Global.	184
Tabela 7.7: Valores do parâmetro M4GLOBAL para cada uma das condições de operação submetida à condição de falha 1 e 2.....	194
Tabela 7.8: Parâmetro HMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 Global ($3.6494 \cdot 10^{-4}$) e condições de operação indicadas para condição de falha 1.....	200
Tabela 7.9: Parâmetro HMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 Global ($3.6494 \cdot 10^{-4}$) e condições de operação indicadas para condição de falha 1.....	202
Tabela 7.10: Parâmetro HMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 Global ($3.6494 \cdot 10^{-4}$) e condições de operação indicadas para condição de falha 2.....	204
Tabela 7.11: Parâmetro HMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 Global ($3.6494 \cdot 10^{-4}$) e condições de operação indicadas para condição de falha 2.....	206
Tabela 7.12: Parâmetro IMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 individual relativo a cada uma das condições de operação indicadas, condição de falha 1.	209
Tabela 7.13: Parâmetro IMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 individual relativo a cada uma das condições de operação indicadas, condição de falha 1.	211
Tabela 7.14: Parâmetro IMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 individual relativo a cada uma das condições de operação indicadas, condição de falha 2.	213
Tabela 7.15: Parâmetro IMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 individual relativo a cada uma das condições de operação indicadas, condição de falha 2.	215



RESUMO

SILVA, D. G. Diagnóstico de falha em redutores de velocidade submetido à variação de potência. 2001. 226 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

Aborda o problema de avaliação da severidade do defeito no diagnóstico e monitoramento de redutores de velocidade submetidos à variação de potência. Investiga as potencialidades, aplicadas a este problema, de treze técnicas usuais de monitoramento. Três no domínio do tempo: *time synchronous average*, sinal residual e demodulação. Cinco no domínio da amplitude: variância, RMS, *skewness*, *kurtosis* e fator de crista. Uma no domínio da frequência: espectro em amplitude. Quatro no domínio tempo-frequência: *short time Fourier transform*, wavelet, distribuição de Wigner-Ville e distribuição pseudo Wigner-Ville. Apresenta, com o uso de sinais simulados, que todas as treze técnicas são susceptíveis à variação de potência e, portanto são impróprias para a resolução do problema. Propõe três procedimentos de análise baseados no quarto momento estatístico em relação à origem da função densidade de probabilidade Beta: (i) Análise Histórica Global; (ii) Análise Individual Histórica e (iii) Análise Individual Independente. Submete os três procedimentos a ensaios experimentais com variações unívocas de torque ou velocidade e para duas condições de defeito: (a) sem falha; (b) com um dente quebrado. Verifica experimentalmente que os três procedimentos sinalizam fortemente a presença do dente quebrado e, além disso, tanto a Análise Individual Histórica quanto a Análise Individual Independente são capazes de indicar precisamente qual é o dente quebrado. Apresenta ainda que existem variações em torno de 10% no valor proveniente dos três procedimentos propostos, mas esta percentagem pode aumentar caso a variação de rotação seja superior a 45% da nominal.

Palavras-Chave: Redutores de velocidade; Detecção de falhas; Variação de potência; Manutenção preditiva; Vibrações.



ABSTRACT

SILVA, D. G. Diagnostic of faults in gearboxes submit to power variation. 2001. 226 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

It treats on the matter of the severity evaluation faults in the diagnostic and monitoring of the gearboxes submitted to power variation. It investigates the potentiality, applied to this problem, of thirteen usual monitoring techniques. Three of them in the time domain: time synchronous average, residual sign and demodulation. Five of them in the amplitude domain: variance, RMS, skewness, kurtosis and crest factor. One in the frequency domain: amplitude spectrum. The last four in the time-frequency domain: short time Fourier transform, wavelet, Wigner-Ville distribution and pseudo Wigner-Ville distribution. It is shown, applying simulated signals, that all the thirteen techniques are susceptible to power variation, and therefore, unsuitable for solving the problem. Three procedures based on the fourth moment about the origin of the Beta density probability function are proposed: (i) global history analysis; (ii) individual history analysis and (iii) individual independent analysis. The three procedures are submitted to experimental tests with variation of torque or rotation and for two faults conditions: (a) without fault; (b) with a broken tooth. Experimentally verify that the three procedures strongly indicate the presence of the broken tooth and, besides that, the individual history analysis as well as the individual independent analysis are able to precisely indicate which one is the broken tooth. Also, it is shown that there are variations about ten percent of the value in the three procedures proposed, however this low percentage can increase in the case of rotation variation higher than forty five percent of the nominal rotation.

Keywords: Gearboxes; Diagnostic of faults; Power variation; Predictive maintenance; Vibrations.



INTRODUÇÃO

1.1. MONITORAMENTO DE REDUTORES DE VELOCIDADE

Dentre as diversas máquinas que possuem a capacidade de transformar algum tipo energia em energia mecânica, encontram-se, em uma posição de destaque, os motores elétricos, os motores de combustão interna e as turbinas a vapor ou gás. Estes motores são projetados para um regime de operação que varia de mil a várias mil rotações por minuto. As principais razões para operarem em elevadas faixas de rotação são que, altas velocidades de produzem uma notável razão peso/potência e uma ótima relação potência/custo inicial. Porém, em muitos casos, as máquinas motrizes que serão acopladas a estes motores requerem baixas velocidades de rotação e altos torques. Para tornar compatível as características operacionais entre as máquinas, motora e motriz, no que se refere ao regime de rotação e torque, torna-se necessário o emprego de algum sistema de redução.

Entre os vários sistemas de redução existentes, destacam-se os redutores mecânicos de engrenagens, em virtude da sua capacidade de transmitir altas potências.

Redutores mecânicos de engrenagens são largamente empregados para o acionamento mecânico de máquinas em diversos tipos de seguimentos industriais. Usinas de açúcar e álcool,



indústrias de papel e alimentícias em geral, são exemplos bastante comuns, nas quais os redutores de engrenagens realizam um papel vital na produção.

A manutenção deste tipo de equipamento é crítica, pois problemas na transmissão de movimento, acarretaria um prejuízo irreversível na produção. Por outro lado, com a necessidade de baratear custos e obter qualificação dentro das normas ISO série 9000 para exportação, essas empresas têm abandonado seus procedimentos de manutenção preventiva sistemática, em que se realizava a desmontagem, inspeção e reparo anualmente de todos os seus equipamentos importantes, procurando incorporar técnicas de manutenção preditiva, dentre elas, técnicas baseadas na análise de vibrações.

A idéia básica da técnica de monitoramento de máquinas por análise de vibrações é que as estruturas das máquinas, excitadas pelos esforços dinâmicos decorrentes de seu funcionamento, respondem com sinais vibratórios cuja frequência é idêntica àquela dos esforços que as provocam, e que o sinal de vibração, tomado em algum ponto, será a soma das respostas vibratórias da estrutura às diferentes frequências dessas excitações.

Quando a máquina está em boas condições, estes esforços excitadores são decorrentes da movimentação normal de seus diversos componentes. Quando o equipamento vai sofrendo desgaste, é esperado que os níveis dos sinais tendam a aumentar. Quando surge alguma avaria, novos componentes são adicionados a esses sinais.

O procedimento geralmente recomendado para a implementação de uma metodologia para o seguimento e diagnóstico de defeitos em equipamentos por análise de vibrações, é que se inicie o processo por uma análise pormenorizada do equipamento, procurando identificar cada esforço excitador (também chamado de fonte de ruído), e qual a sua importância. A seguir se monitora o equipamento periodicamente, aplicando alguma técnica que permita se identificar e diagnosticar os defeitos mais importantes.

A forma clássica de análise, aplicável a maiorias das máquinas rotativas, é realizada por intermédio da análise espectral, na qual é possível identificar as principais fontes de ruído, assim como, observar a presença ou o surgimento de defeitos, e também diagnosticar o nível de gravidade do defeito.

Uma vez identificada a presença das frequências fundamentais no espectro de vibração, o diagnóstico de defeitos é feita com base na presença de harmônicos (também chamados de oitavas) dessas frequências, bandas laterais em torno delas, surgimento de outras frequências



diferentes e aparecimento de frequências que sugiram ressonâncias. O diagnóstico do grau de defeito, é realizado com base no nível de amplitude das fontes de ruído fundamentais e distribuição relativa entre as suas amplitudes e de suas harmônicas ou bandas laterais.

Especificamente no caso de redutores de engrenagens, infelizmente, a forma clássica de análise baseada no espectro do sinal de vibração exige muito trabalho e experiência para ser realizada, especialmente na identificação do surgimento de novas componentes e na detecção de variações de amplitude. Cada um dos vários elementos mecânicos que compõem um redutor tais como, engrenagens e rolamentos, são fontes de esforços excitadores, que multiplicados pelo número de eixos de um redutor de engrenagens, no mínimo dois, produzem diversas componentes espectrais. Além disso, o fato do redutor ser utilizado conjuntamente com outras máquinas e em ambientes onde existe diversas fontes externas de ruído, promove um enriquecimento ainda maior do número de componentes presentes no espectro. Outro fator agravante é a presença de ruído aleatório, com nível consideravelmente elevado, o que dificulta muito a identificação das componentes de interesse, assim como a percepção do surgimento de novas componentes, e de variações na amplitude.

Por essa razão, para a detecção e o acompanhamento da evolução de falhas em sistemas de engrenamento, na maioria das vezes, torna-se necessário à aplicação de técnicas de análise mais dedicadas. Dentre essas, são amplamente utilizadas a média temporal síncrona (TSA), demodulação temporal, análise estatística e mais recentemente as técnicas baseadas na distribuição tempo frequência ou tempo-escala. Todas essas técnicas são específicas, e fornecem melhores ou piores resultados dependendo do tipo de defeito que se deseja analisar.

Entretanto, as dificuldades para a detecção e o acompanhamento de falhas em sistemas de engrenamento podem ainda se tornar maiores no caso em que ocorram constantes oscilações de rotação e demanda de torque no sistema de redução durante seu funcionamento. Isto porque todas as fontes de ruídos fundamentais, além daquelas decorrentes do surgimento de algum defeito, possuem frequências dependentes da velocidade de rotação do redutor, e amplitudes dependentes do torque que está sendo transmitido.

Esta situação é tipicamente encontrada em destilarias de açúcar e álcool e em indústrias de papel, nas quais o objetivo principal é a produção e a qualidade do produto final. Um exemplo são os redutores de acionamento dos ternos das moendas das usinas de açúcar e álcool, que acionados por turbinas a vapor movimentam um equipamento cuja solicitação de potência é



fortemente variável com o tempo, pois depende da continuidade da vazão requerida de cana a ser moída, proveniente do picador.

Para o monitoramento destinado à manutenção preditiva, nos casos em que as condições de transmissão de potência são constantes ao longo do tempo, qualquer alteração que ocorra tanto em amplitude quanto em número de componentes da frequência de engrenamento, suas harmônicas e/ou das bandas laterais são indicativas do aparecimento ou da evolução de algum defeito. Porém, quando as condições de potência transmitida variam ao longo do tempo, na forma de rotação e em especial na forma de torque, uma alteração que ocorra tanto em amplitude quanto em número de componentes, não pode ser relacionada de forma unívoca com a presença ou evolução de um defeito.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Com o objetivo de transpor o obstáculo causado pela variação de potência encontrada entre uma medição e outra, este trabalho visa propor uma metodologia para a análise de redutores de velocidade com a qualidade de não ser quantitativa e qualitativamente afetada por variações de potência devida à variação de torque ou rotação, em torno da sua condição nominal de operação, possibilitando assim um acompanhamento histórico da máquina, onde se possa observar sua degradação natural além do aparecimento e evolução de eventuais defeitos.

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

- i. desenvolver um simulador de sinais vibratórios – com características de redutores mecânicos de engrenagens - flexível e robusto, para a simulação de diversas condições de operação e falha. Tais sinais irão servir como fonte de análise;
- ii. investigar o potencial das técnicas usuais de monitoramento, das quais, destacamos no domínio do tempo a média síncrona (TSA - *Time Synchronous Average*), sinal residual e demodulação; no domínio da amplitude, os fatores variância, RMS, Skewness, Kurtosis e Crest Factor; a transformada Fourier no domínio da frequência; a transformada curta de Fourier (STFT), Wavelet, distribuição de Wigner-Ville e pseudo Wigner-Ville como ferramentas de análise conjunta tempo-frequência, quando aplicadas à condição de potência constante;



- iii. investigar o potencial das técnicas usuais de monitoramento, descritas no item ii, quando submetidas a condições de potência variável;
- iv. analisar os resultados obtidos no item iii, e propor um procedimento baseado em algumas das técnicas estudadas;
- v. investigar o desempenho deste procedimento, utilizando sinais vibratórios reais provenientes de uma bancada experimental.

1.3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO

O desenvolvimento desta dissertação está dividido em nove capítulos, que serão apresentados claramente, e cujo resumo segue:

O presente capítulo descreve uma visão geral sobre a importância do monitoramento e análise de vibrações em redutores de velocidade, apresentando as linhas gerais envolvidas e as dificuldades envolvidas no seu monitoramento, ainda mais quando submetido a condições variáveis de potência.

O capítulo 2 apresenta detalhadamente as principais fontes de ruído que podem estar presentes em um redutor de engrenagens, suas características, elementos causadores e modelos matemáticos específicos.

O capítulo 3 apresenta sucintamente as técnicas usuais de monitoramento, suas características individuais e formulação matemática básica.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nas simulações, para a análise do comportamento das técnicas usuais de monitoramento quando submetidas à condição de potência constante, e na presença de uma excentricidade da coroa do pinhão, agravamento desta excentricidade e, independentemente, aparecimento de um dano pontual.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos das simulações das simulações, empregando sinais simulados, para a análise do comportamento das técnicas usuais de monitoramento quando submetida à condição de potência variável, e na presença de uma excentricidade da coroa do pinhão, agravamento desta excentricidade e, independentemente, aparecimento de um dano pontual.



O capítulo 6 apresenta de forma abrangente a análise estatística de sinais vibratórios, no qual inicialmente os sinais são classificados e caracterizados, seguido de uma breve introdução sobre a teoria dos conjuntos e teoria da probabilidade, definição formal da função densidade de probabilidade, modelagem estatística de sinais vibratórios, descrição das principais funções densidade de probabilidade, evidenciando a FDP Beta.

O capítulo 7 apresenta e descreve a bancada experimental utilizada para a obtenção dos sinais de vibração reais, as etapas e os resultados obtidos utilizando o procedimento de análise escolhido para o diagnóstico de falha em redutores de velocidade submetidos a condições variáveis de potência.

O capítulo 8 apresenta as discussões finais e resume as principais conclusões e contribuições obtidas a partir dos resultados alcançados pela investigação.

O capítulo 9 apresenta as referências bibliográficas consultadas e que serviram de base para a elaboração e realização deste trabalho.



Capítulo 2

VIBRAÇÕES EM REDUTORES DE ENGRENAGENS

Redutores mecânicos são máquinas compostas por um grande conjunto de elementos, tais como, caixas, eixos, mancais e engrenagens. Entre todos os elementos que o compõem, o mais importante são as engrenagens, por serem as responsáveis pela transmissão de movimento e consequentemente de potência.

O perfil dos dentes que compõem uma engrenagem é baseado normalmente sobre uma curva envólucra. A força é transmitida do pinhão para a coroa ao longo da linha de ação, que permanece fixa no espaço (exceção aos sistemas que utilizam engrenagens planetárias). Em condições ideais, nas quais os dentes são considerados como corpos rígidos, uma engrenagem perfeita transmitiria potência constantemente sem nenhum tipo de vibração ou ruído. Porém, durante o processo de fabricação são introduzidos erros tanto na forma no perfil do dente, quanto no espaçamento entre eles.

Além desses erros de forma, os dentes são elásticos e deformam-se levemente quando um carregamento é aplicado, como consequência disso, os dentes do pinhão que não estão em contato se deslocam levemente à frente da sua posição teórica de corpo rígido. O mesmo ocorre com os dentes da coroa que não estão em contato, estes se deslocam levemente para trás da sua



posição teórica. Como consequência destes deslocamentos angulares, existe uma transferência abrupta de força quando cada par de dentes entram em contato, momentaneamente acelerando a coroa e desacelerando o pinhão. Esse fenômeno é o responsável por uma das mais importantes fontes de ruído de um redutor de velocidade, conhecida como frequência de engrenamento.

Na análise espectral clássica, a frequência de engrenamento e suas harmônicas, conjuntamente com as bandas laterais provenientes do processo de modulação formam o principal conjunto de componentes presentes no espectro de um redutor de velocidades.

Para um par engrenado sem defeitos, as diversas fontes de ruído decorrentes do seu funcionamento normal, que podem ser identificadas por intermédio de uma análise do espectro de frequência do sinal são:

- **Giro dos Eixos:** Trata-se de um sinal sempre presente que provoca, para cada eixo, uma resposta periódica senoidal com frequência idêntica a sua rotação em ciclos por segundo. Se f_r é a frequência de giro do eixo, Y_a a amplitude do sinal e t o tempo, seu sinal vibratório pode ser descrito como uma função do tipo:

$$Y_g(t) = Y_a \sin(2\pi f_r \cdot t) \quad (2.1)$$

- **Engrenamento:** Gera, para cada par engrenado, uma resposta periódica senoidal cuja frequência é igual ao produto da frequência de giro do eixo no qual a engrenagem esta fixada pelo número de seus dentes. Se N é o número de dentes da engrenagem e f_r é a frequência de giro do eixo ao qual esta acoplada, então a frequência de engrenamento f_e é dada em Hertz por $f_e = N \cdot f_r$. O sinal vibratório, pode ser modelado mediante a Eq. 2.2, na qual Y_b é a amplitude do sinal.

$$Y_e(t) = Y_b \sin(2\pi f_e \cdot t) \quad (2.2)$$

- **Harmônicos do Engrenamento:** Gera componentes sempre presentes cuja frequência é igual a duas, três ou quatro vezes a frequência de engrenamento f_e , com baixas amplitudes. Estes harmônicos decorrem dos desvios relativos ao perfil perfeito dos dentes, causados tanto pela deformação do dente sob carregamento quanto por um desgaste desigual. O sinal vibratório será descrito pela Eq. 2.3, na qual Y_{bn} é a amplitude do n -ésimo harmônico, n representa o número de harmônicos e ϕ_n é o ângulo de fase entre os harmônicos.

$$Y_h(t) = \sum_{n=0}^N Y_{bn} \sin(2\pi n f_e \cdot t + \phi_n) \quad (2.3)$$

A figura 2.1 apresenta as frequências relacionadas ao funcionamento normal de um redutor mecânico de engrenagens.

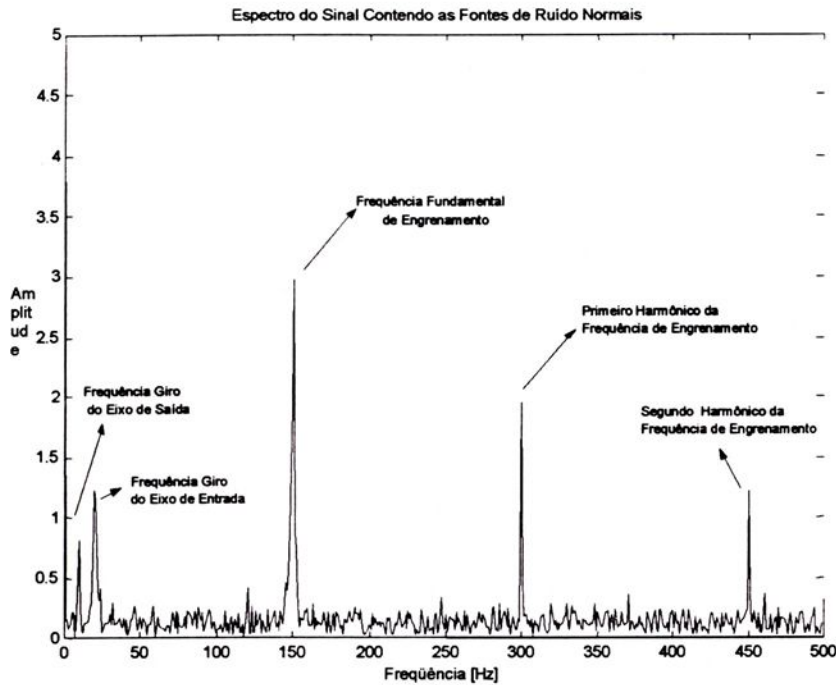


Figura 2.1 - Espectro característico de um redutor de engrenagens, contendo as fontes de ruídos relacionadas com o seu funcionamento normal.

Segundo Penter & Lewis (1990) as falhas em redutores mecânicos ocorrem, sobretudo nas engrenagens com 60% das incidências, seguido pelas falhas nos rolamentos com 19%, nos eixos com 10%, caixas com 7%, fixações com 3% e nos retentores com 1%.

Os sintomas clássicos associados com os defeitos mais comuns, ou seja, defeitos localizados nas engrenagens, eixos e rolamentos, que totalizam um montante de 89% das incidências de falhas de um redutor mecânico são (Randall, 1982):

- **Eixo desalinhado:** Presença significativa de harmônicas da frequência de giro do eixo desalinhado e, em especial da frequência de engrenamento das engrenagens fixadas nele. Os segundos ou terceiros harmônicos aparecem com amplitudes iguais ou maiores que a fundamental, sendo que quando algum destes, supera 150% do valor da amplitude da fundamental, o desalinhamento não pode ser mais tolerado. Matematicamente, pode ser descrito pela Eq. 2.4, na qual para a porção relativa à frequência de giro, Y_{gn} é a amplitude do n -ésimo harmônico, n representa o número de harmônicos e ϕ_n é o ângulo de fase entre os harmônicos; para a frequência de engrenamento, Y_{b2j} é a amplitude do j -ésimo harmônico, j representa o número de harmônicos e ϕ_j é o ângulo de fase entre os harmônicos.

$$Y_d(t) = \sum_{n=0}^N Y_{gn} \sin(2\pi n f_r \cdot t + \phi_n) + \sum_{j=0}^J Y_{b2j} \sin(2\pi j f_e \cdot t + \phi_j) \quad (2.4)$$

- **Excentricidade:** Se existir alguma engrenagem excêntrica, em virtude de uma montagem inadequada, erros de usinagem ou eixo fletido, é esperada que sua frequência de engrenamento se apresente com grande amplitude, e em particular com "bandas laterais" decorrentes do processo de modulação. Estas bandas laterais são frequências igualmente espaçadas a direita e a esquerda da frequência de engrenamento e suas harmônicas, cuja diferença é a frequência de giro do eixo ao qual a engrenagem esta fixada. Se a amplitude da frequência de engrenamento é maior que três vezes a amplitude normal de funcionamento, ou alguma banda lateral superar 70% do valor da fundamental, a excentricidade não deve ser tolerada. A Eq. 2.5 descreve esta condição, na qual p representa o número de bandas laterais e Y_{ap} a amplitude da p -ésima banda lateral.

$$Y_f(t) = \sum_{n=0}^N Y_{bn} \left[1 + \sum_{p=0}^P Y_{ap} \sin(2\pi p f_r t) \right] \sin(2\pi n f_e t + \phi_n) \quad (2.5)$$

- **Danos no dentado:** Os danos pontuais que podem estar presentes no dentado são: *pitting*, trincas e quebra de dentes. Todos estes são caracterizados mediante uma perda localizada da rigidez do dente defeituoso, que reflete em uma mudança tanto na amplitude como em fase do sinal de vibração, durante o período de engrenamento do dente problemático. Estas mudanças ocorrem em virtude de uma modulação localizada, que reflete em um aumento das bandas laterais presentes no espectro. Quando alguns desses defeitos são extensos, ocorre uma rápida e abrupta mudança na força aplicada no dente, este fato pode excitar frequências ressonantes do sistema eixo-mancal (Macfadden, 1992). Essas ressonâncias estão, por questões de projeto, localizadas entre a frequência de giro do eixo e a de engrenamento, e vem acompanhada de bandas laterais espaçadas da frequência de giro do eixo ao qual a engrenagem com problema esta fixada. O sinal vibratório produzido por essa falha pode ser modelado como uma série infinita de impulsos de mesma amplitude, com período de repetição $T_r = 1/f_r$. A função trem de impulso correspondente é representada matematicamente pela Eq. 2.6, na qual d_o é uma constante arbitrária e $\delta(t)$ representa a função impulso unitário.

$$d(t) = d_o \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_r) \quad (2.6)$$

Definindo o decaimento exponencial de um impulso unitário $e(t) = e^{-t/\xi}$ para $t > 0$, em que ξ é a constante de tempo do decaimento, podemos definir a resposta ao trem de impulsos com sendo:

$$\text{Im } p(t) = d(t)e(t) \quad (2.7)$$

O sinal temporal discreto da ressonância de uma frequência própria Ω do sistema eixo mancal, fica modulada por um sinal impactante de frequência igual ao giro do eixo que contém a engrenagem com falha, sendo possível representar o sinal vibratório discreto segundo a Eq. 2.8, na qual Y_Ω é a amplitude do sinal.

$$Y_p(t) = \text{Im } p(t) \cdot [Y_\Omega \sin(2\pi\Omega \cdot t)] \quad (2.8)$$

- **Danos em Rolamentos:** Por serem elementos submetidos à cargas cíclicas, o principal tipo de falha sob condições normais de uso é o lascamento por fadiga de contato nas pistas ou nos elementos girantes (Mcfadden, 1990). Esses defeitos são constituídos por irregularidade nos elementos girantes do rolamento provocando esforços dinâmicos e consequentemente dando origem a vibração de baixa energia. Inicialmente quando o rolamento se encontra em bom estado, o sinal se apresenta como um ruído aleatório de banda larga e baixa amplitude de vibração. Em seguida com o surgimento e desenvolvimento de uma pequena falha na pista estacionária, o sinal obtido mostra alguns transientes periódicos (impactos) com amplitudes praticamente invariantes no tempo. Como consequência direta, essa fonte de excitação impactante pode excitar frequências ressonantes do sistema eixo-mancal, estando estas geralmente localizadas nas altas faixas de frequência do espectro. Quando a falha se desenvolve na pista rotativa ou no elemento rolante, o efeito do carregamento e do meio de transmissão irão causar uma modulação na amplitude de vibração gerando um espectro, que apresenta uma frequência ressonante conjuntamente com bandas laterais mistas que dependem da posição angular da falha. Num estágio mais avançado da falha em rolamentos, o sinal volta a apresentar características típicas de ruído aleatório somado a pequenos transientes.

Matematicamente, a excitação produzida pelo impacto de um ponto defeituoso numa superfície é modelada pela função de impulso unitário $\delta(t)$. Supondo que a pista externa do rolamento é estacionária e que a pista interna gira com rotação constante, os impulsos gerados serão de natureza periódica com frequências características dependentes da localização da falha e da geometria do rolamento. Assim a vibração produzida pela falha pode ter como modelo uma série infinita de impulsos de mesma amplitude e período de repetição igual a $T_d = 1/f_d$, portanto:

$$d(t) = d_o \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_d) \quad (2.9)$$

A distribuição da carga ao longo da circunferência de um rolamento sob carregamento radial é determinada pela equação de Stribeck:

$$q(\theta) = q_o [1 - (1/2\varepsilon)(1 - \cos\theta)]^n \quad (2.10)$$

na qual q_o é a máxima intensidade de carga, ε é o fator de distribuição de carga, θ é a posição angular na posição de carga e $n=3/2$ para rolamentos de esferas.

A função temporal que representa a carga instantânea num ponto da pista interna do rolamento é obtida substituindo θ por $2\pi \cdot f_r \cdot t$, conforme mostra a equação

$$q(t) = \begin{cases} q_o [1 - (1/2\varepsilon)(1 - \cos(2\pi f_r t))]^n & \text{para } |\theta| < \theta_{\max} \\ 0 & \text{para } |\theta| \geq \theta_{\max} \end{cases} \quad (2.11)$$

na qual, f_r é a frequência de rotação do eixo.

A modulação dos impulsos pela carga é obtida multiplicando-se a série de impulsos $d(t)$ pela distribuição de carga $q(t)$. A fim de representar a amplitude do meio de transmissão da vibração $a(t)$ pode ser obtido com base em uma curva contínua e periódica do tipo senoidal, cujo período é igual ao período de rotação do eixo.

Para uma aproximação mais realística, devemos considerar o efeito causado pelo amortecimento estrutural, dessa forma definimos o decaimento de um impulso unitário da seguinte maneira:

$$e(t) = \begin{cases} e^{-t/\xi} & \text{para } t > 0 \\ 0 & \text{para } t \leq 0 \end{cases} \tag{2.12}$$

na qual, ξ é a constante de tempo do decaimento exponencial.

Assim uma expressão geral que representa a resposta medida no rolamento sujeito aos pulsos produzidos pela falha localizada na pista interna é:

$$Y_r(t) = [d(t).q(t).a(t)] * e(t) \tag{2.13}$$

A Figura 2.2 apresenta as frequências relacionadas às fontes de ruído decorrentes do funcionamento normal, conjuntamente com aquelas provenientes dos defeitos mais comuns em um redutor mecânico de engrenagens.

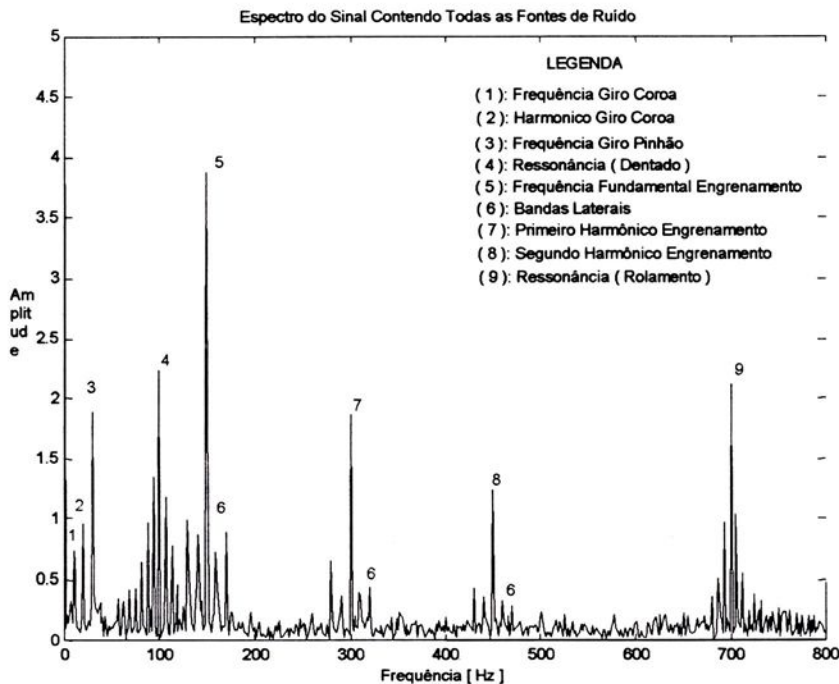


Figura 2.2- Espectro característico de um redutor de engrenagens, contendo as fontes de ruídos relacionadas com funcionamento normal conjuntamente com aquelas provenientes dos defeitos mais comuns.

Uma vez conhecidas as principais fontes de ruído que podem estar presentes de um redutor, no capítulo 3, serão apresentadas brevemente as técnicas usuais de análise empregadas na caracterização dinâmica, diagnóstico e acompanhamento da evolução destas falhas.





TÉCNICAS USUAIS DE MONITORAMENTO

Felizmente, ao longo dos anos, foram desenvolvidas várias técnicas de processamento e análise de sinais. Essas técnicas tiveram suas origens em diversos campos da ciência, Jean Baptiste Joseph, o Barão de Fourier, foi o responsável pelos princípios básicos, os quais resultaram, após a contribuição de dois grandes cientistas, Bunsen e Kirchhoff, na principal ferramenta de análise utilizada atualmente, a análise espectral. No entanto, o objetivo inicial de Fourier era resolver problemas de transmissão de calor, em 1807, (Lynn & Fuerst, 1994).

A teoria da probabilidade, na qual está baseada a maioria das técnicas estatísticas, foi desenvolvida na metade do século dezessete por dois matemáticos franceses, Pascal e Fermant (Barnes, 1994).

O desenvolvimento prático da análise tempo-frequência, iniciou-se com a necessidade de análise da voz humana, na década de 1940, com a transformada curta de Fourier (Cohen, 1995).

Assim com o decorrer dos tempos, foram desenvolvidas e aplicadas diferentes técnicas de análises de sinais, baseadas em diferentes técnicas de processamento, das quais, destacamos no domínio do tempo a análise por intermédio da média síncrona conhecida também por TSA (*Time Synchronous Average*), a técnica do sinal residual e a de demodulação. No domínio da amplitude, as mais importantes são os fatores variância, RMS, Skewness, Kurtosis e Crest

Factor. A transformada Fourier no domínio da frequência. A transformada curta de Fourier (STFT), Wavelet, distribuição de Wigner-Ville e pseudo Wigner-Ville destacam-se como ferramentas de análise conjunta tempo-frequência.

Nos itens seguintes, são apresentados o conceito e uma breve descrição de cada umas das técnicas citadas. Nos capítulos 4 e 5, estas técnicas serão independentemente aplicadas a sinais característicos de um redutor de velocidade, com a finalidade de avaliar seus resultados.

3.1 MÉDIA TEMPORAL SÍNCRONA (TSA)

A média temporal síncrona (Forrester, 1992; Mcfadden, 1987a; Mcfadden, 1987b; SKF, 1996) é um método particularmente comum para a detecção de falhas em engrenagens. Para a obtenção de uma amostragem síncrona do sinal de vibração de uma engrenagem em particular, é realizada uma média sobre várias revoluções dessa engrenagem, na qual cada bloco de amostragem tem o ponto inicial sempre na mesma posição angular referente a engrenagem em estudo. O sinal resultante deste processo possui, praticamente, somente as componentes que são síncronas com a rotação da engrenagem em questão. De fato se a média for realizada sobre um número suficiente de amostras, a TSA se aproxima de um sinal periódico verdadeiro, cuja periodicidade corresponde a um giro da engrenagem em estudo.

Outro ponto positivo deste método é a eliminação quase que total do ruído aleatório que pode estar presente, porque o valor da média de um grande número de amostra contendo apenas elementos aleatórios tende a zero. Uma dificuldade inerente a aplicação deste método, é a necessidade da utilização de um *trigger*, para a obtenção de um sinal de referência, cuja finalidade é a determinação da posição angular da engrenagem em estudo. Outro problema é que, para se obter um diagnostico completo sobre o redutor, é necessário que a análise utilizando a TSA seja repetida em cada engrenagem que o compõe.

Desde que muitos fenômenos de modulação podem afetar o sinal de vibração proveniente de um redutor mecânico em razão de falhas localizadas, excentricidades, entre outros defeitos, esta técnica é particularmente útil, pois possibilita que o estudo seja realizado sobre um sinal bem mais simples.

Para falhas localizadas em um estágio de desenvolvimento bastante avançado, a simples inspeção visual da TSA pode permitir a detecção e a localização da falha. Isto se deve ao fato de



que a falha de um dente é caracterizada por alterações no padrão de vibração durante o seu período de atuação no processo de engrenamento (Choy, 1996). Já no caso da detecção de falhas em um estágio inicial, um processamento mais sofisticado é necessário, com o objetivo de detectar pequenas modificações no padrão de vibração. Sobre este contexto, a TSA pode ser processada para possibilitar a identificação prematura de falhas localizadas, desta maneira ela desempenha o papel de uma ferramenta de pré-processamento.

A forma mais eficiente de realização da TSA é denominada recursiva ou estável, na qual para cada novo bloco de dados é calculado um resíduo ponderado, sendo este acrescentado à TSA. Matematicamente, a TSA estável é obtida por intermédio da Eq. 3.1, na qual $y(iT)$ é a média temporal síncrona, $x(iT)$ é o bloco original e r é o número do bloco. Observando esta equação pode-se notar que a TSA representada por $y(iT)$ é modificada até que r seja igual ao número total de blocos, n (Braun, 1986).

$$y_r(iT) = y_{r-1}(iT) + \frac{x_r(iT) - y_{r-1}(iT)}{r} \quad (3.1)$$

A Figura 3.1 apresenta esquematicamente o processo para obtenção da média temporal síncrona.

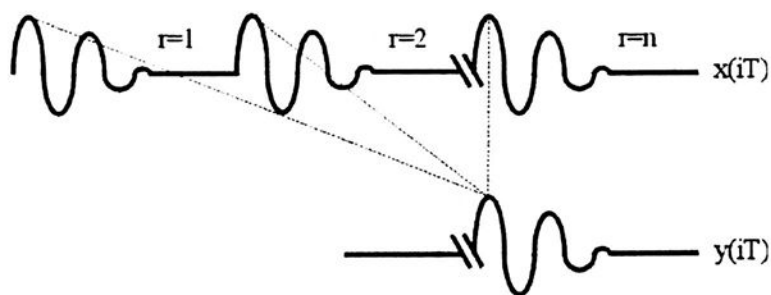


Figura 3.1- Gráfico demonstrativo do processo para obtenção da média temporal síncrona TSA.

3.2 SINAL RESIDUAL

A obtenção do sinal residual consiste no processamento da média síncrona temporal, e baseia-se na característica desta ser na prática um sinal exatamente periódico e, portanto, a transformada de Fourier pode ser aplicada sem a necessidade de nenhum tipo de janela, obtendo-se assim, uma linha espectral pura. Este fato possibilita que sejam realizadas várias operações, tal

como um filtro ideal, que consiste na eliminação das componentes indesejáveis presentes no sinal, simplesmente tornando nulas, no domínio da frequência, suas amplitudes e posteriormente retorna-se ao domínio temporal por intermédio da transformada inversa de Fourier (McFadden, 1987b).

A técnica do sinal residual, originalmente proposta por Stewart (1977), consiste na eliminação da frequência fundamental de engrenamento e de suas harmônicas tomando-se por base o espectro da TSA, subseqüentemente é aplicada a transformada inversa de Fourier com o objetivo de reconstituir o sinal no domínio do tempo. O sinal remanescente é chamado de sinal residual e o sinal composto pelas componentes eliminadas, é chamado de sinal regular.

McFadden (1987b), examinando a técnica de Stewart mostrou que o sinal regular realmente define a média temporal do sinal de engrenamento de uma única engrenagem. Já o sinal residual representa as variações da média temporal síncrona em relação ao sinal médio de engrenamento, e freqüentemente evidencia mais claramente as falhas prematuras do que simplesmente a média temporal síncrona.

3.3 DEMODULAÇÃO TEMPORAL

Por generalização, a modulação em amplitude de um sinal é definida como a multiplicação de um sinal por outro, constituindo-se em um processo inerentemente não linear que gera novas freqüências que não estão presentes em nenhum dos sinais envolvidos diferindo, assim, da adição ou da mixagem de dois ou mais sinais, pois estes processos apresentam apenas as freqüências que estão contidas no sinal.

O processo de modulação em amplitude ocorre quando um sinal de baixa freqüência, chamado de modulador, causa uma variação na amplitude do sinal de alta freqüência, chamado de portador, na razão da freqüência do sinal modulador. Este processo gera duas novas freqüências, chamadas de bandas laterais, o espaçamento em freqüência do sinal portador a uma das bandas laterais, é igual a freqüência original de modulação (White, 1991).

Defeitos tais como, excentricidades, falhas localizadas nos dentes e danos impactantes, irão causar o fenômeno de modulação. Este pode se apresentar durante todo o período de rotação, no caso de excentricidades ou por alguma flutuação de carga no dentado, apenas durante o período de engrenamento, no caso de um dente defeituoso e ainda excitar freqüências próprias do sistema



como é o caso de defeitos em rolamentos. Em todos estes casos, os defeitos se evidenciaram no espectro pela presença de bandas laterais em torno da frequência de engrenamento e suas harmônicas ou em torno de uma frequência natural do sistema. O espaçamento entre as frequências principais, como a frequência de engrenamento ou as frequências naturais e suas respectivas bandas laterais trazem informações sobre a fonte causadora do defeito (Lee, 1997; White, 1991).

Mcfadden (1985), mostrou que se a média síncrona temporal for filtrada em torno da frequência de engrenamento ou em torno do harmônico dominante dessa, uma estimação da modulação em amplitude e fase pode ser realizada, utilizando-se a transformada de Hilbert (Cohen, 1995; Thrane, s.d.). O resultado obtido é uma representação na forma complexa, do sinal, contendo informações sobre a amplitude e a fase da modulação.

Uma representação gráfica da demodulação pode ser realizada mediante um gráfico de coordenadas cartesianas, no qual o eixo das abscissas representa as componentes reais do sinal resultante da transformada de Hilbert e no eixo das ordenadas estão as componentes imaginárias. O resultado deste tipo de representação é semelhante ao movimento realizado pelos planetas em torno do sol, denominado de órbita (Forrester, 1992a).

A modulação em fase causa alterações anormais no movimento orbital em torno da origem, ao passo que, a modulação em amplitude causa variação da distância entre o centro da órbita e sua porção mais externa.

Em resumo, o processo de demodulação envolve os seguintes passos:

- 1) Filtragem do sinal em torno da frequência de engrenamento ou da ressonância por intermédio de um filtro passa banda ajustado para englobar o maior número de bandas laterais.
- 2) Detecção do sinal modulador, utilizando a transformada de Hilbert.
- 3) Análise gráfica cartesiana mostrando a relação entre a amplitude e a fase da modulação.

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Neste grupo destacam-se, especificamente, momentos estatísticos puros e suas normalizações. Os momentos estatísticos (Martin, 1992; Andrade et al, 1999; Heng & Nor;



1998; Tandon, s.d), são utilizados para descrever a forma da função densidade de probabilidade, por essa razão, possuem a capacidade de detectar variações na sua forma.

Tomando como exemplo o caso de um redutor de velocidades de engrenagens, se as iterações entre as superfícies dos dentes estão em boas condições, esse fato resultará numa função densidade de probabilidade que se aproxima da forma clássica de sino. No caso de uma deterioração e ou variação não uniformes das condições de carregamento sobre a superfície dos dentes, a forma dessa distribuição irá mudar, e esta alteração, pode ser detectada pelos momentos estatísticos (Martin, 1992).

Existem duas situações importantes relacionadas com a análise estatística utilizando-se momentos estatísticos. Na primeira tem-se o prévio conhecimento da função densidade de probabilidade $f(x)$ que rege o fenômeno físico em estudo. Nestas condições, pode-se calcular exatamente os valores teóricos dos momentos estatísticos de qualquer ordem segundo as equações 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, nas quais M_o^k representa o k-ésimo momento em torno da origem, M_m^k representa o k-ésimo momento em torno da média, $p(x)$ e $f(x)$ são respectivamente as funções densidade de probabilidade discreta e contínua, $E\{ \}$ é o operador valor esperado, x representa os valores da variável aleatória e μ é a média teórica (Barnes, 1994).

Para momentos em torno da origem:

$$M_o^k = E\{X^k\} = \sum x^k p(x), \text{ para distribuições discretas} \quad (3.2)$$

$$M_o^k = E\{X^k\} = \int x^k f(x) dx, \text{ para distribuições contínuas} \quad (3.3)$$

Para momentos em torno da média:

$$M_m^k = E\{(X - \mu)^k\} = \sum (x - \mu)^k p(x), \text{ para distribuições discretas} \quad (3.4)$$

$$M_m^k = E\{(X - \mu)^k\} = \int (x - \mu)^k f(x) dx, \text{ para distribuições contínuas} \quad (3.5)$$

A segunda situação, que engloba a maioria dos casos práticos, refere-se a condição em que não se conhece a função densidade de probabilidade $f(x)$ do fenômeno em estudo. Nestes casos, os momentos estatísticos não podem ser calculados exatamente e sim estimados. Estas estimações, mesmo que contendo pequenos erros, refletem as características estatísticas do fenômeno. Segundo a Eq. 3.6, é possível estimar-se, com base em uma amostra, os momentos estatísticos referentes a média (também chamados centrais) de qualquer ordem, na qual

Ma^k representa o k -ésimo momento amostral, n é o número de pontos contidos na amostra e $\bar{x}$ representa o valor médio amostral (Barnes, 1994).

$$Ma^k = \frac{\sum_j^n (x_j - \bar{x})^k}{n-1} \quad (3.6)$$

Em geral, momentos estatísticos pares relatam informações sobre a densidade do cume da função densidade de probabilidade, ao passo que os momentos ímpares indicam a extensão, ou seja, o quanto a curva está dispersa, esparramada.

O valor médio de uma amostra é o momento estatístico de primeira ordem, a variância é o momento estatístico de segunda ordem. O valor RMS é a raiz quadrada do momento de segunda ordem. Assim, a média indica o valor médio da amostra, o valor RMS indica a sua intensidade e a variância indica a variação em torno da média (Heng & Nor, 1998).

Além desses três valores descritos acima, destacam-se outros indicadores, o coeficiente de skewness que é o terceiro momento normalizado em relação ao cubo do desvio padrão, kurtosis que é o quarto momento normalizado em relação a quarta potência do desvio padrão, o fator de crista, que é a razão entre o valor de pico máximo da amostra e o valor RMS.

Existem duas considerações importantes relacionadas com o momento estatístico de primeira ordem. A primeira do ponto de vista estatístico, o sinal é tratado como uma amostra, em que o valor médio amostral é representado pela Eq. 3.7. A segunda, do ponto de vista de análise de sinais, o valor médio de um sinal é representado por uma variação da Eq. 3.7, na qual os pontos x_i são considerados sempre positivos (em módulo), assim o valor médio de um sinal é sempre maior que zero.

- **Momento de primeira ordem (média):** também, chamado de medida da tendência central, pois representam as amostras mediante seus valores médios, em torno dos quais tendem a concentrar os dados, onde n representa o número de elementos contidos na amostra. (Barnes, 1994).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.7)$$

- **Momento de segunda ordem (variância):** tem como finalidade verificar a representatividade das medidas de posição, pois duas amostras podem ter o mesmo valor médio, mas serem compostas de maneiras distintas, ou seja, para uma dada amostra seus valores se concentram totalmente na média e para uma outra amostra seus valores estão dispersos em torno da média, (Barnes, 1994).

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (3.8)$$

- **Valor RMS:** indicativo da intensidade da amostra, pode ser obtido por intermédio da seguinte expressão (Heng & Nor 1998):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k^2} \quad (3.9)$$

- **Skewness :** é o terceiro momento normalizado para analisar a ausência de simetria da distribuição, assim esse fator analisa a inclinação da distribuição e pode ser obtido por intermédio da seguinte expressão (Barnes, 1994).

$$Sk = \frac{(Ma^3)^2}{s^6} \quad (3.10)$$

- **Kurtosis:** é definido como o quarto momento normalizado, cuja característica é a de analisar o achatamento da distribuição, sendo obtido por:

$$Ks = \frac{Ma^4}{s^4} \quad (3.11)$$

- **Fator de Crista:** analisa a relação entre o maior pico de amplitude, existente na amostra, e a intensidade (RMS) total dessa mesma amostra. Pode ser obtido pela seguinte equação (Heng & Nor 1998).

$$FC = \frac{\text{Pico Máximo}}{RMS} \quad (3.12)$$



3.5 ANÁLISE ESPECTRAL CLÁSSICA

Muitas vezes é necessário se conhecer as componentes que estão presentes no sinal em análise, que são originários das diversas fontes de ruído presentes na máquina. Esta é a grande aplicação da análise espectral.

Barão de Fourier demonstrou que sinais qualquer tipo de sinais, com características periódicas podem ser representados como a somatória de sinais senoidais. O espectro proveniente possui linhas espectrais, cujos coeficientes indicam a intensidade das varias componentes senoidais contidas no sinal. Também demonstrou que sinais não repetitivos ou não periódicos podem ser representados como uma integral ou somatória infinita de funções trigonométricas as quais não estão harmonicamente relacionadas, o decorrente espectro se apresenta como sendo contínuo (Lynn & Fuerst, 1996), essas idéias compõem as teorias da série de Fourier e transformada de Fourier respectivamente.

Para uma compreensão do mecanismo utilizado pela transformada de Fourier, sejam as equações 3.13 e 3.14, nas quais, t é o tempo, ω é a frequência, $x(t)$ é o sinal no tempo e $X(\omega)$ é o sinal no domínio da frequência (Lynn & Fuerst, 1996).

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.13)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3.14)$$

Pode-se notar na Eq. 3.13, que o sinal $x(t)$ é multiplicado por um termo exponencial, numa dada frequência ω e depois integrado ao longo de todo o tempo. O termo exponencial da primeira equação também pode ser escrito na forma de senos e co-senos, assim o que a transformada de Fourier faz é multiplicar um sinal $x(t)$ por uma expressão complexa de senos e co-senos de frequência ω e depois integrar esse produto, ou seja, somam-se todos os pontos desse produto. Se o resultado desta integração é um número alto, dizemos que $x(t)$ tem um componente espectral importante na frequência ω , se for muito pequeno dizemos que o sinal não possui a componente. Assim, por intermédio da análise utilizando-se a transformada de Fourier é possível tanto observar as componentes presentes no sinal quanto avaliar a sua significância, segundo o valor da sua amplitude.

É importante notar que a integração é realizada sobre todo o tempo, de menos infinito a mais infinito, o que corresponde a dizer que não é importante onde o componente em frequência ω esteja localizado no tempo, ele afetará o resultado da integração igualmente. Esta é a principal razão pela qual não se utiliza a transformada de Fourier para a análise de sinais não estacionários.

Os sinais provenientes de processos não estacionários, ou seja, quando as distribuições de probabilidade obtidas dependem do tempo absoluto (o termo estacionário refere-se às distribuições de probabilidade e não aos sinais amostrados, Newland, 1993), possuem propriedades que podem ser calculadas apenas instantaneamente. Isto faz com que a análise, utilizando-se a transformada de Fourier, torne-se ineficaz, em razão de ser uma transformação realizada ao longo de toda a amostra.

Portando, para solucionar tais problemas de maneira que seja possível calcular as propriedades de um sinal não estacionário ou ainda fracamente estacionário, em pequenas parcelas de tempo, preservando assim os efeitos de não estacionaridade do sinal, foram propostas várias técnicas de análise conjunta tempo-frequência ou tempo-escala, que serão descritas a seguir.

3.6 TRANSFORMADA CURTA DE FOURIER (STFT)

Como visto no item anterior, a transformada clássica de Fourier não se mostra adequada à análise de sinais não estacionários, pois essa transformada decompõe o sinal em infinitas ondas senoidais as que não são localizadas no tempo (Oppenheim, 1999). A razão para tal afirmativa é o tipo de informação que pode ser obtida com base no espectro, que informam essencialmente quais são as frequências contidas no sinal, bem como quais as amplitudes correspondentes a essas frequências, mas não nos informa em que tempo ou quando estas ocorrem. Assim, quando estamos lidando com sinais do tipo não estacionários, que podem conter frequências instantâneas, torna-se necessário o emprego de ferramentas de análise bidimensional (funções de variáveis tempo e frequência) para que possamos observar em que instante de tempo uma dada frequência ocorre ou desaparece do sinal (Cohen, 1995, Boualem, 1992).



A primeira classe de representação tempo frequência, é a decomposição atômica (também conhecida como representação linear tempo-frequência), que decompõem o sinal em componentes elementares, os átomos, bem localizados no tempo e na frequência.

Para a introdução da dependência do tempo na transformada de Fourier, um caminho simples e intuitivo consiste num pré-enjanelamento do sinal $x(u)$ em torno de um tempo particular t , calculando sua transformada de Fourier e fazendo isso para cada instante de tempo t . A transformada resultante desse processo é chamada de Transformada Curta de Fourier (*Short Time Fourier Transform*) (Cohen, 1995; Boualem, 1992; Andrade, 1999; Lee, s.d; Rioul, 1995; Safizadeh, 1999, Shan, 1999), matematicamente descrita pela Eq. 3.15, na qual $h(t)$ é uma janela curta de tempo, conforme mostra a Figura 3.2, localizada em torno de $t = 0$ e $v = 0$

$$F_x(t, v; h) = \int_{-\infty}^{\infty} x(u) h^*(u - t) e^{-j2\pi v u} du \quad (3.15)$$

Em virtude da multiplicação pela janela curta $h^*(u-t)$ o sinal fora do ponto de análise $u = t$ é efetivamente anulado, assim a STFT é um espectro local do sinal $x(u)$ ao redor de t , providenciando assim que no interior da janela curta de tempo o sinal possua energia finita. A transformada curta de Fourier é inversível, e de acordo com (Cohen, 1995; Boualem, 1992) pode ser descrita matematicamente como:

$$x(t) = \frac{1}{E_h} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_x(u, \xi; h) h(t - u) e^{j2\pi \xi u} du d\xi \quad (3.16)$$

na qual $E_h = \int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt$. Essa relação expressa que o sinal total pode ser decomposto como um somatório de formas de onda elementares,

$$h_{t,v}(u) = h(u - t) \exp[j2\pi v u] \quad (3.17)$$

que podem ser interpretadas por "átomos". Cada átomo é obtido com base na janela $h(t)$ mediante uma translação no tempo e uma translação em frequência (modulação).

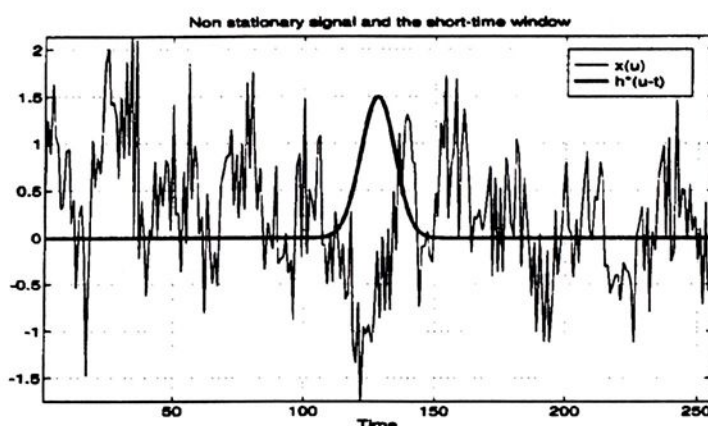


Figura 3.2- Sinal não estacionário $x(u)$ e a janela curta de tempo $h^*(u-t)$ centralizada no tempo t

3.7 TRANSFORMADA WAVELET

A STFT introduz uma escala e analisa o sinal do ponto de vista dela (a escala é dada pela largura da janela). Se o sinal possui detalhes importantes fora dessa escala, haverá problemas na análise. Portanto, para a STFT visualizar melhor esses detalhes, o tamanho da janela terá que ser alterado, e uma vez fixado o tamanho será o mesmo para todo o período T do sinal em análise (Boualem, 1992). As consequências dessa escolha serão uma melhor visualização no tempo e um empobrecimento na frequência ou vice-versa. Isso acontece porque o domínio tempo-frequência é governado pelo princípio da incerteza (Cohen, 1995; Boualem, 1992)

Para resolver este problema da STFT, será definida uma nova transformada que não utiliza uma escala fixa na análise. Como a escala é definida pela largura da função de modulação, deve ser utilizada uma função que não tenha escala fixa e que seja localizada no tempo. A mais conhecida é a denominada transformada wavelet (Kim, s.d; Mamed, 1997; Najar, s.d; Newland, 1997; Newland, 1999; Segawa, 1999; Staszewski, s.d; Wang, 1996).

Para a compreensão do funcionamento da transformada wavelet, é realizada uma analogia à transformada de Fourier. Conforme descrito no item 3.5, a transformada de Fourier decompõe o sinal em componentes harmônicas senoidais, que são funções globais infinitas. No caso das wavelets, cujo nome é por causa do caráter ondulatório da função, o sinal é decomposto em séries de funções bases. Cada wavelet é situada em uma posição diferente no eixo do tempo e é localizada com objetivo de decair a zero quando suficientemente distante do seu centro.

É possível decompor qualquer sinal arbitrário $x(t)$ em seus componentes wavelet. A aproximação é a mesma do que para a análise harmônica, exceto que, ao invés de decompor o

sinal em funções harmônicas senoidais de diferentes frequências, o sinal é decomposto em wavelets de diferentes escalas (diferentes níveis) e diferentes posições ao longo do eixo das abscissas (Newland,1994).

Especificamente, a transformada wavelet consiste numa decomposição do sinal em uma família de funções que são a translação e a dilatação de uma função transformadora $\psi(t)$, no domínio do tempo. A função $\psi(t)$, também conhecida como wavelet mãe pode assumir várias formas, entre estas, podemos citar, a Morlet, Gaussian-Enveloped, Daubechies e Meyer. A Figura 3.3 apresenta duas destas funções, a Morler e a Meyer.

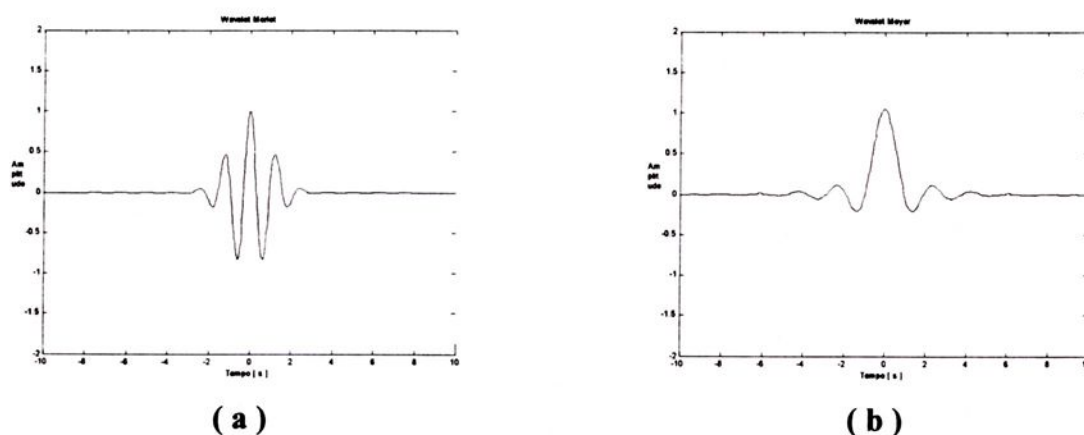


Figura 3.3- (a) função transformadora Morlet; (b) função transformadora Meyer

Assim, a definição matemática da transformada Wavelet contínua é fornecida pela Eq. 3.18, na qual, $\Psi(\tau,s)$ é a transformada contínua de wavelet, τ é o parâmetro translação, s é a escala e $\psi(t)$ é a função transformadora.

$$CWT_x^\psi(\tau,s) = \Psi_x^\psi(\tau,s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (3.18)$$

A Eq. 3.18 representa o sinal $x(t)$ multiplicado por uma janela no tempo, que percorrerá todo o sinal e, pode-se notar, esta é dependente tanto da escala quanto da translação. O termo translação refere-se à localização da janela, que é deslocada ao longo de todo o sinal. A escala pode ser dividida em altas escalas, que correspondem a uma visão mais global do sinal e baixas escalas, que correspondem a uma visão mais detalhada. Em termos de frequência, baixas frequências do sinal estão posicionadas nas altas escalas, ao passo que as altas frequências do sinal estão posicionadas nas baixas escalas.

Em razão de a transformada wavelet contínua requerer a resolução de uma integral, o que conduz a um alto esforço computacional, torna-se importante a discretização da transformada wavelet, que é uma forma mais adequada para operações computacionais.

Na transformada wavelet discreta, trabalha-se apenas com wavelets ortogonais (Newland, 1994; Cohen, 1995), pois esta propriedade conduz à algoritmos mais eficientes para a decomposição do sinal em seus componentes wavelet. Existem duas classes de wavelets ortogonais: wavelets de dilatação e as wavelets harmônicas. Dentro da classe das wavelet de dilatação encontra-se a wavelet Haar.

No próximo item, será apresentada uma outra classe dentre as ferramentas de análise conjunta tempo-frequência, denominada de distribuições energéticas.

3.8 DISTRIBUIÇÕES ENERGÉTICAS: WIGNER-VILLE E PSEUDO WIGNER-VILLE

Em contraste com a representação linear tempo-frequência, que decompõem o sinal sobre componentes elementares, os átomos, o propósito da distribuição de energia é distribuir a energia contida no sinal sobre duas variáveis: tempo e frequência.

Para um melhor entendimento sobre esta distribuição energética, considere o exemplo de estatura e pesos das pessoas. Supondo que para uma dada população nós conhecemos a distribuição de pesos, que é o número de pessoas de qualquer peso. Conjuntamente suponha que é conhecida a distribuição de alturas. Estas duas densidades fornecem tudo o que se gostaria de saber em relação às questões somente de peso ou somente de altura. Considere uma pessoa de 1,80 m de altura e 75 Kg, esta pessoa estaria acima do peso ou não? Se nós compararmos esta pessoa com o peso médio da população, nos a estaríamos comparando com as pessoas de todas as alturas, o que não responderia a questão. Para uma comparação apropriada, nós necessitaríamos do peso médio dos indivíduos da população que possuem 1,80m de altura. Para isso é necessária uma distribuição conjunta peso-altura.

O principal objetivo da análise tempo-frequência é desenvolver um procedimento para construir uma distribuição conjunta tempo-frequência, que forneça a fração da energia total do sinal para o tempo t e frequência f , assim desenvolvendo candidatos apropriados para a distribuição $\rho(t,f)$.



Para o caso da estatura-peso, se forem adicionadas todas as pessoas de diferentes pesos e alturas nós teremos o número total de pessoas. Similarmente, se nós adicionarmos bits de energia com base em diferentes células tempo-frequência, nós iremos obter a energia total E (Boualem, 1992).

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(t, f) dt df \quad (3.19)$$

Se para uma dada altura nós acrescentarmos todas as pessoas de vários pesos, então nós teremos o número de pessoas que possuem aquela altura. Analogamente para um dado tempo se nós acrescentarmos bits de energia de diferentes frequências nos obteremos a energia para aquele dado tempo. Mas a energia para um dado tempo é dada por $|s(t)|^2$. Assim a distribuição necessita satisfazer a seguinte condição:

$$|s(t)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(t, f) df \quad (3.20)$$

Também, para uma dada frequência nos adicionarmos todos as partes de tempo, nós esperamos que:

$$|S(f)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(t, f) dt \quad (3.21)$$

Estas duas equações são as condições marginais esperadas para uma distribuição (Cohen, 1995), as quais significam que, se nós integramos a densidade de energia tempo-frequência ao longo de uma variável, nós obteremos a densidade de energia correspondente à outra variável.

Dentre as diversas distribuições existentes, pode-se citar a Wigner-Ville, Margenau-Hill, Sinc, Page, Choi-Williams, Zhao-Atlas-Marks, além das pseudo distribuições as quais não são propriamente densidades de energia tempo-frequência, particularmente estas podem até tornar-se negativas, tal como a distribuição Pseudo-Wigner-Ville (Cohen, 1995, Boualem, 1992).

Nos tópicos a seguir serão apresentadas duas destas distribuições, uma representando a classe das distribuições verdadeiras, a Wigner-Ville e outra representando as pseudo distribuições, a Pseudo Wigner-Ville.

Distribuição de Wigner-Ville

Uma distribuição de energia tempo-freqüência particularmente interessante é a distribuição de Wigner-Ville (WVD) (Mcfadden, 1992; Mcfadden, 1995; Cohen, 1995; Boualem, 1992; Andrade, 1999; Choy, 1996; Shan, 1999), pois foi a primeira a ser introduzida e tem sido estudada intensivamente, sendo definida pela Eq.3.22, na qual, a variável τ é chamada de intervalo de tempo, ν é a freqüência, t o tempo, $x(t)$ é o sinal analítico de características complexas sendo obtido por intermédio da transformada de Hilbert e $x^*(t)$ é seu complexo conjugado (Mcfadden, 1992).

$$W_x(t, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi\nu\tau} d\tau \quad (3.22)$$

ou equivalente, em termos espectrais, em que ξ é o intervalo de freqüência.

$$W_x(t, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\nu + \xi/2) X^*(\nu - \xi/2) e^{j2\pi\xi t} d\xi \quad (3.23)$$

Esta distribuição satisfaz um número grande de propriedades matemáticas desejáveis, em particular a WVD é sempre valor real, isto preserva a troca tempo e freqüência e satisfaz as propriedades marginais.

Uma característica importante da WVD é nunca ser unicamente positiva para toda a faixa tempo-freqüência. Isso de certa forma satisfaz a exigência de uma distribuição desse tipo, que deveria ser positiva para todos os valores de tempo e freqüência, o que nos informaria quanto da energia total estaria em uma célula tempo-freqüência. A parte negativa da distribuição não possui informações importantes, a estrutura tempo-freqüência consistente é descrita pela parte positiva da distribuição, (Cohen, 1995).

Outra característica da distribuição Wigner-Ville é a presença de termos cruzados, chamados também de termos fantasmas ou interferência, na distribuição. Se o sinal a ser analisado for composto por um somatório de vários sinais, a distribuição deste somatório não é o somatório da distribuição Wigner-Ville de cada componente deste sinal, assim para um sinal formado por duas componentes chamadas de $S_1(t) + S_2(t)$, a distribuição deste sinal resultaria nos termos $W_{11}(t, f) + W_{22}(t, f) + W_{12}(t, f) + W_{21}(t, f)$, nos quais os índices 12 e 21, são os termos cruzados ou fantasmas. Esta é a razão para o aparecimento destes termos de interferência, que

não possuem nenhum significado, apenas é o produto matemático e que muitas vezes atrapalha na análise de um sinal (Boualem, 1992; Cohen, 1995).

Distribuição Pseudo Wigner-Ville

Para um dado tempo, a distribuição Wigner-Ville é influenciada igualmente por todos os tempos no futuro e no passado. Similarmente, para uma certa frequência, esta é influenciada por todas as frequências acima e abaixo dela. Existem duas razões para se desejar modificar esta propriedade básica da distribuição Wigner-Ville. Primeiro, na prática nós não somos capazes de integrar de menos infinito a mais infinito, alguém poderia estudar os efeitos somente dentro de uma faixa limitada. Segundo, no cálculo da distribuição para um certo tempo t , nós poderíamos desejar enfatizar as propriedades perto deste tempo de interesse. Para realizar isto, foi desenvolvida a distribuição de Wigner-Ville enjanelada, conhecida por Pseudo-Wigner-Ville. Para um dado tempo, a distribuição Wigner-Ville é a transformada de Fourier em relação a τ da quantidade $x\left(t + \frac{\tau}{2}\right)x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)$, em que a variável τ é chamada de intervalo de tempo, se nós queremos enfatizar o sinal em torno de um dado tempo t , basta multiplicarmos o produto por uma função $h(\tau)$ delimitada no entorno de τ e em seguida realizarmos a transformada de Fourier desta nova função, com isso, nos obteremos o que é chamado de distribuição Pseudo Wigner-Ville, (Cohen, 1995; Lee, s.d; Boualem, 1992).

$$PW_x(t, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi\nu\tau} d\tau \quad (3.24)$$

A razão básica para o enjanelamento da distribuição Wigner-Ville é que a versão enjanelada algumas vezes apresenta melhores resultados que a distribuição original. Isso se deve ao fato que, se a largura efetiva da janela é menor que a separação das componentes que formam o sinal, para o intervalo de pontos temporais entre uma componente e outra, o enjanelamento reduzirá a intensidade desses componentes adjacentes, e consequentemente os termos cruzados serão minimizados.

Ao passo que o enjanelamento se for ajustado adequadamente, supre o problema dos termos cruzados, esta também elimina muitas propriedades matemáticas desejáveis da distribuição Wigner-Ville, por exemplo, as propriedades marginais, (Cohen, 1995).

No capítulo 4, será analisado o comportamento das técnicas usuais de análise descritas, no que se refere a sua capacidade de detecção e acompanhamento de defeitos em redutores de engrenagem. No capítulo 5 será analisado qual é a influência da variação de torque ou rotação no resultado destas técnicas.



Capítulo 4

COMPORTAMENTO DAS TÉCNICAS USUAIS DE MONITORAMENTO SOB CONDIÇÕES CONSTANTES DE POTÊNCIA

Com o objetivo de verificar o comportamento das técnicas usuais de monitoramento, descritas no capítulo 3, na identificação e no acompanhamento evolutivo de dois tipos específicos de falha, foram simulados numericamente em computador alguns sinais característicos de um redutor de engrenagens. Estes sinais totalizam ao todo quatro condições de falha. Estas condições estão relacionadas com o surgimento de um defeito pontual, uma grande trinca em um dente, e também de defeito não pontual, uma excentricidade no eixo que contém a coroa.

Os sinais foram gerados com o auxílio de um software de arquitetura modular, desenvolvido sobre a plataforma Matlab[®], que incorpora as equações fundamentais que modelam a resposta vibratória fornecida pelo redutor às fontes de ruído, tanto normal ao seu funcionamento, quanto àquelas decorrentes de algum defeito, como descritas no capítulo 2.



Neste capítulo, é apresentado o estudo realizado sob condições constantes de potência, posteriormente no capítulo 5 será apresentado o estudo realizado sob condições de potência variável.

Os parâmetros utilizados na simulação dos sinais, foram baseados no redutor que compõe a bancada experimental projetada especificamente para atender as especificações deste trabalho de pesquisa, que será apresentada no capítulo 7. O redutor, é fabricado pela Cestari, contém um único par de redução, pode operar sob potência máxima de 5 cv, e as demais características de interesse estão descritas na Tabela 4.1, que também apresenta os parâmetros referentes à discretização (virtual) do sinal, tais como, frequência de amostragem (*sample*), número de pontos por bloco, entre outros, necessárias no software SimGear.

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados na geração dos sinais estudados.

Características do Redutor Simulado	Parâmetros de Discretização
▪ Rotação Eixo de Entrada: 1160 rpm (19 Hz) ▪ Rotação Eixo de Saída: 540 rpm (9 Hz) ▪ Frequência de Engrenamento: 855 Hz ▪ Número de Dentes da Coroa: 95	▪ Número de pontos: 512 ▪ Frequência. Amostragem: 4.60e3 Hz ▪ Tempo Total Único Giro: 0.111 s ▪ Número de Blocos: 20

Com os parâmetros fornecidos pela Tabela 4.1, procedeu-se as simulações, cujas condições representativas de cada um dos sinais simulados estão descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Sinais e suas condições representativas utilizada nas simulações.

Sinais Característicos	Condições Representativas
Sinal 1	Condição nominal de operação, sem a presença de qualquer defeito.
Sinal 2	Condição nominal de operação, com a presença de um defeito decorrente da excentricidade da coroa. Este tipo de defeito é caracterizado pela modulação da frequência de engrenamento pela frequência de giro do eixo que contem a coroa.
Sinal 3	Condição nominal de operação, com o agravamento do defeito da excentricidade da coroa.
Sinal 4	Condição nominal de operação, com a presença de um defeito pontual, decorrente de uma grande trinca no dente número 25.

A análise realizada sobre estes quatro sinais, cujas representações temporais são apresentadas na Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4, tem como objetivo verificar a capacidade de cada uma das técnicas na detecção de defeitos não pontuais, neste caso uma

excentricidade; analisar a capacidade do acompanhamento evolutivo deste defeito; e verificar a capacidade de detecção de uma falha pontual.

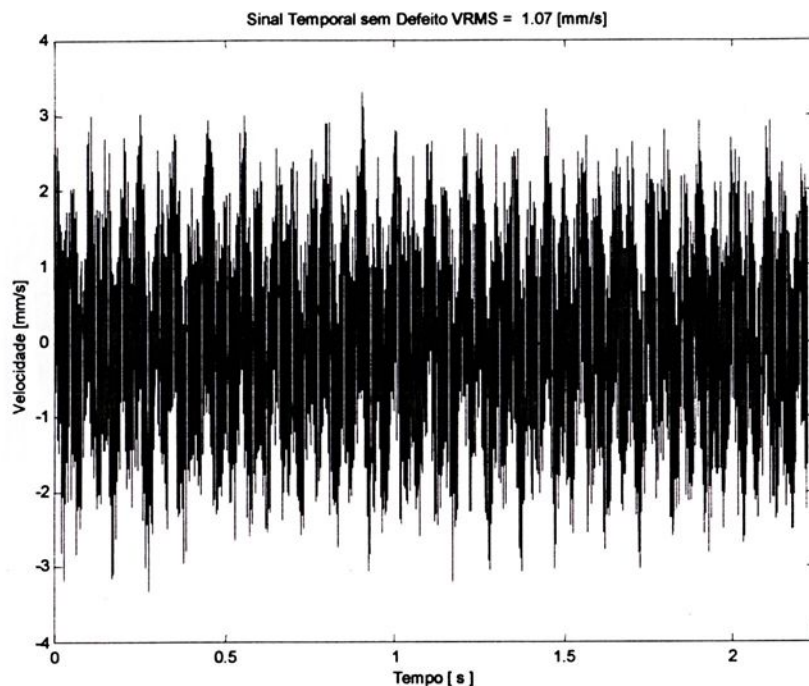


Figura 4.1 – Sinal 1: representação temporal nas condições nominais, sem a presença de nenhum defeito

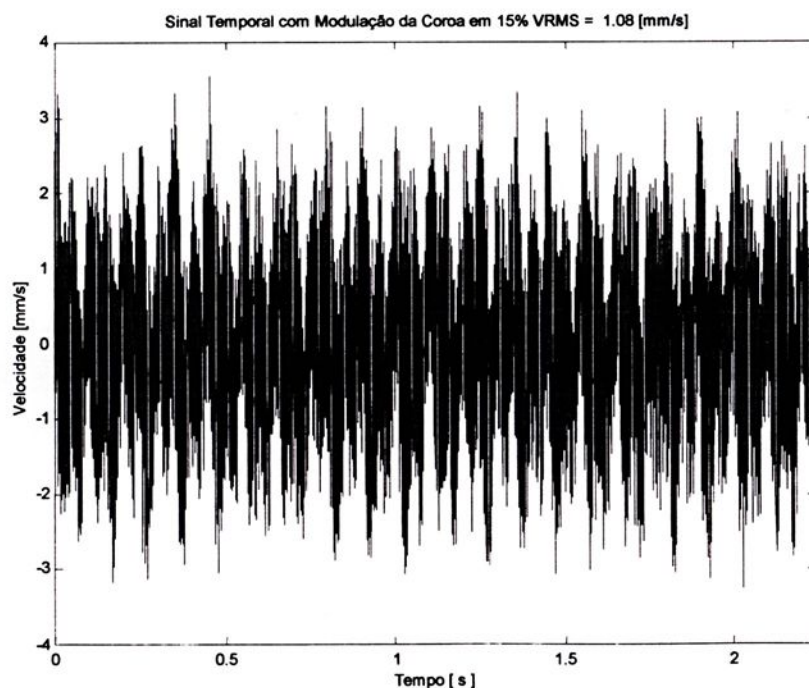


Figura 4.2 - Sinal 2: representação temporal nas condições nominais, cuja amplitude do defeito modulador corresponde a 15% da amplitude da frequência de engrenamento.

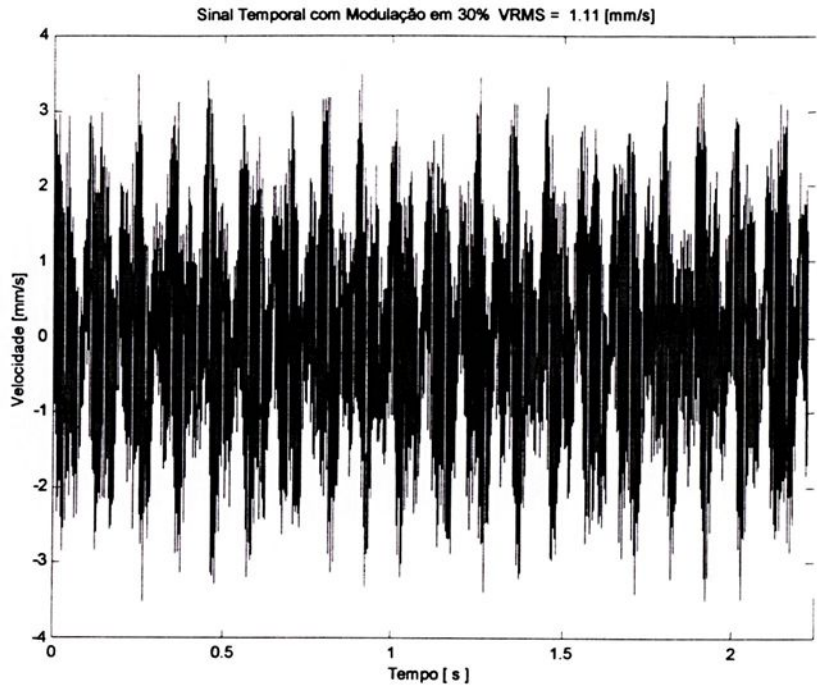


Figura 4.3 - Sinal 3: representação temporal nas condições nominais, cuja amplitude do defeito modulador corresponde a 30% da amplitude da frequência de engrenamento, indicando assim, um agravamento na excentricidade da coroa.

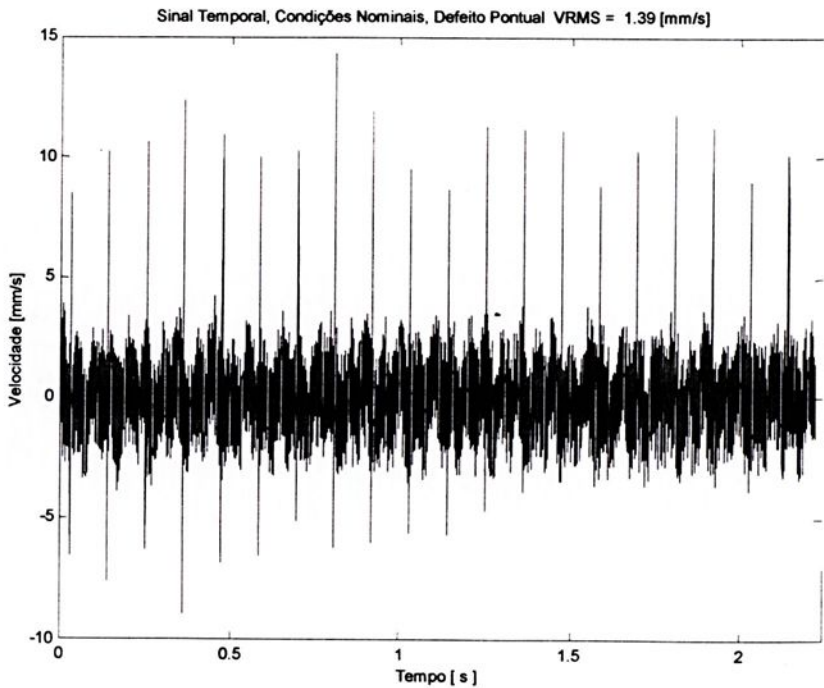


Figura 4.4 - Sinal 4: representação temporal nas condições nominais, com defeito pontual no dente 25.

Nos itens a seguir, serão apresentados os resultados obtidos com base em cada uma das técnicas usuais de análise descritas anteriormente. Os itens 4.1, 4.2 e 4.5, referentes a média temporal síncrona, sinal residual e análise espectral clássica, respectivamente, apresentam os resultados obtidos com base na aplicação dessas três técnicas aos sinais representados pelas Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4. Já os itens, 4.3, 4.4, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, referentes a demodulação temporal, análise estatística, STFT, transformada wavelet, distribuição Wigner-Ville e da distribuição Pseudo Wigner-Ville, respectivamente, apresentam os resultados obtidos com base na aplicação dessas técnicas aos sinais previamente processados pela média temporal síncrona (TSA), apresentados nas figuras Figura 4.5, Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8.

4.1 MÉDIA TEMPORAL SÍNCRONA (TSA)

Para a execução desta análise, foi construída uma rotina computacional sobre a plataforma Matlab®, denominada PreTSA, responsável pela leitura dos sinais simulados provenientes do SimGear, processamento e cálculo da TSA utilizando a Eq. 3.1, e apresentação gráfica dos resultados.

Com base na análise visual realizada sobre a Figura 4.5, conjuntamente com a Figura 4.6, não foi observado nenhuma modificação que sugira a presença de alguma anomalia, mesmo com a presença da excentricidade.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.7, verificou-se o mesmo comportamento anterior, desta maneira, pode-se concluir que a média temporal síncrona não foi capaz de detectar o surgimento e nem a evolução do defeito modulador.

Prosseguindo a análise, a Figura 4.8 apresenta claramente uma grande amplitude próxima de 100 graus de rotação, o que indica claramente uma alteração no padrão de vibração do sinal, especificamente durante um curto período, que são características de um dano pontual.



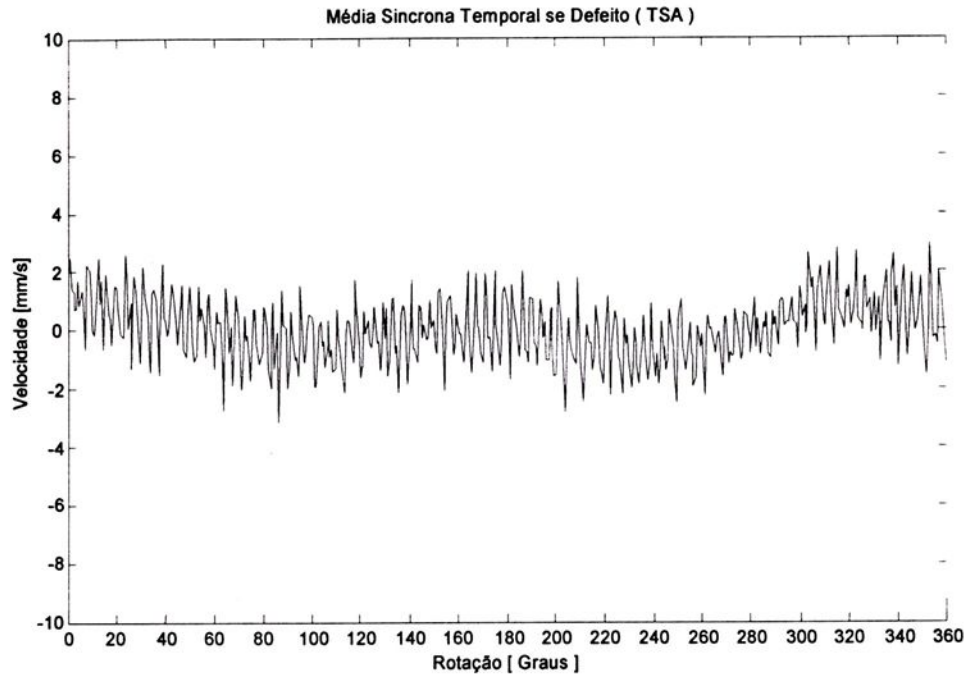


Figura 4.5– Média temporal síncrona do sinal 1, condições nominais de operação, sem a presença de qualquer defeito.

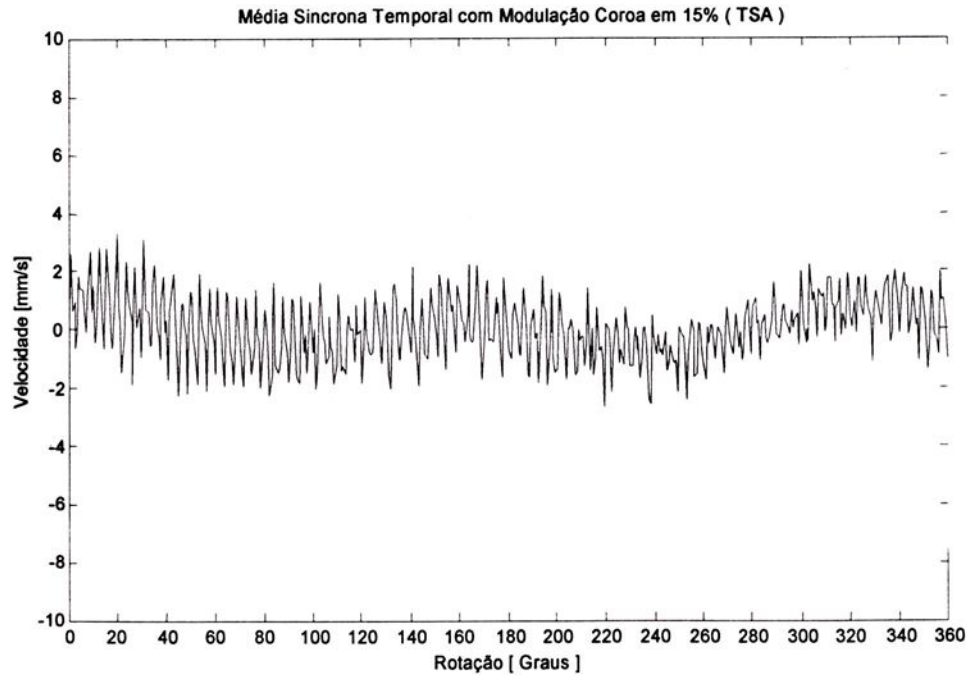


Figura 4.6 – Média temporal síncrona do sinal 2, condições nominais de operação, com presença de uma excentricidade, na ordem de 15%.

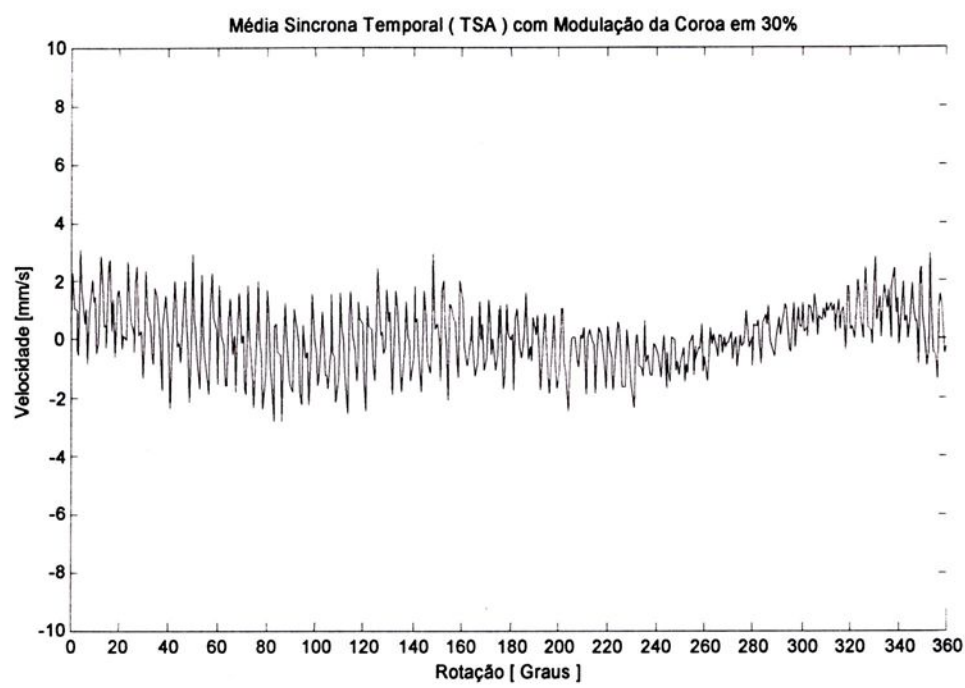


Figura 4.7 – Média temporal síncrona do sinal 3, condições nominais de operação, com presença da excentricidade na ordem de 30%.

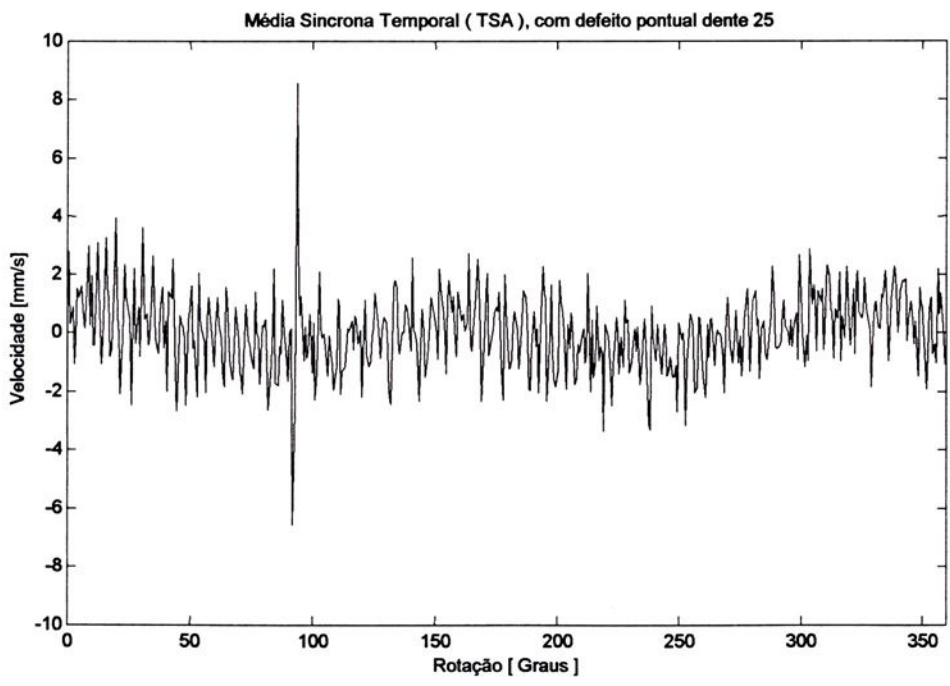


Figura 4.8 – Média temporal síncrona do sinal 4, simulado sob condições nominais de operação, com presença de uma trinca no dente número 25.

4.2 SINAL RESIDUAL

Para que está análise fosse desenvolvida, foi necessária a construção de uma rotina computacional sobre a plataforma Matlab®, denominada Residual, responsável pela leitura da TSA, cálculo da transformada de Fourier por intermédio do algoritmo FFT, anulação das frequências requeridas, cálculo da transformada inversa de Fourier segundo o algoritmo IFFT e apresentação gráfica dos resultados.

Com base na análise visual realizada sobre a Figura 4.9, conjuntamente com a Figura 4.10, não foi possível observar nenhuma modificação que sugira a presença de alguma anomalia, mesmo com a presença da excentricidade.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.11, verificou-se o mesmo comportamento anterior, desta maneira, pode-se concluir que o sinal residual não foi capaz de detectar, o surgimento e nem a evolução do defeito modulador.

Prosseguindo a análise, a Figura 4.12 apresenta ainda mais claramente, em relação a TSA, uma grande amplitude próxima a 100 graus de rotação, o que indica claramente uma alteração no padrão de vibração do sinal, especificamente durante um curto período, que são características de um dano pontual.

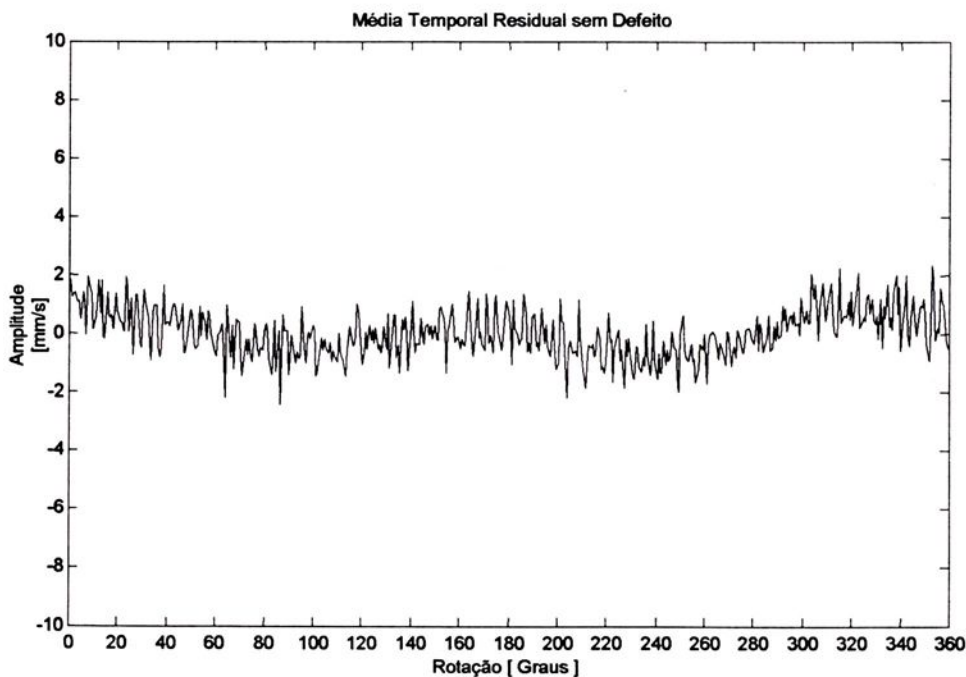


Figura 4.9 – Sinal temporal residual do sinal 1, simulado sob condições nominais de operação, sem a presença de qualquer defeito.

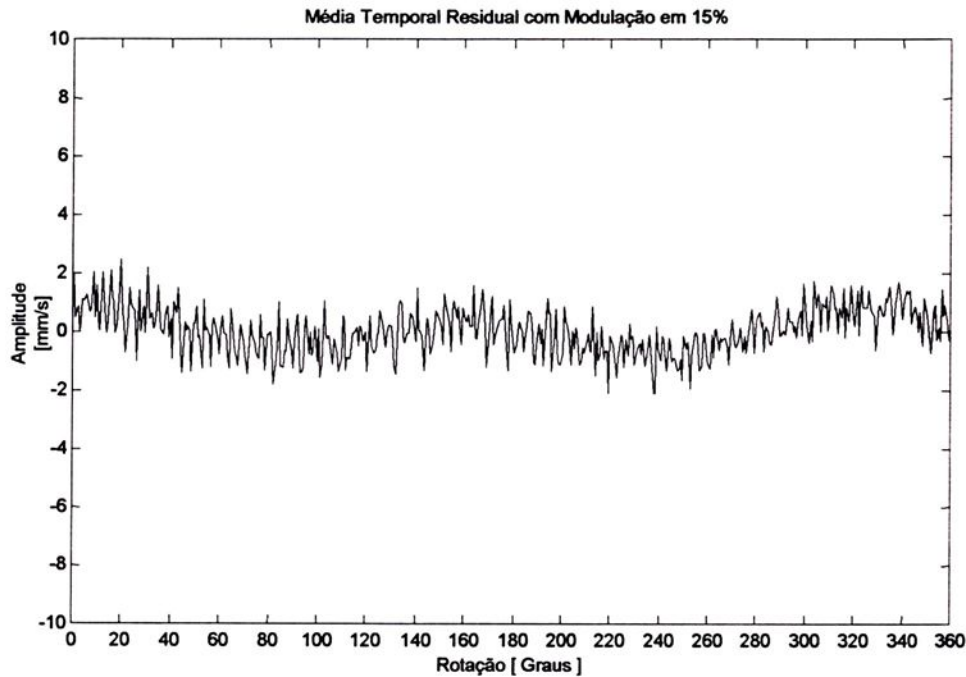


Figura 4.10 – Sinal temporal residual do sinal 2, simulado sob condições nominais de operação, com presença de uma excentricidade, na ordem de 15%.

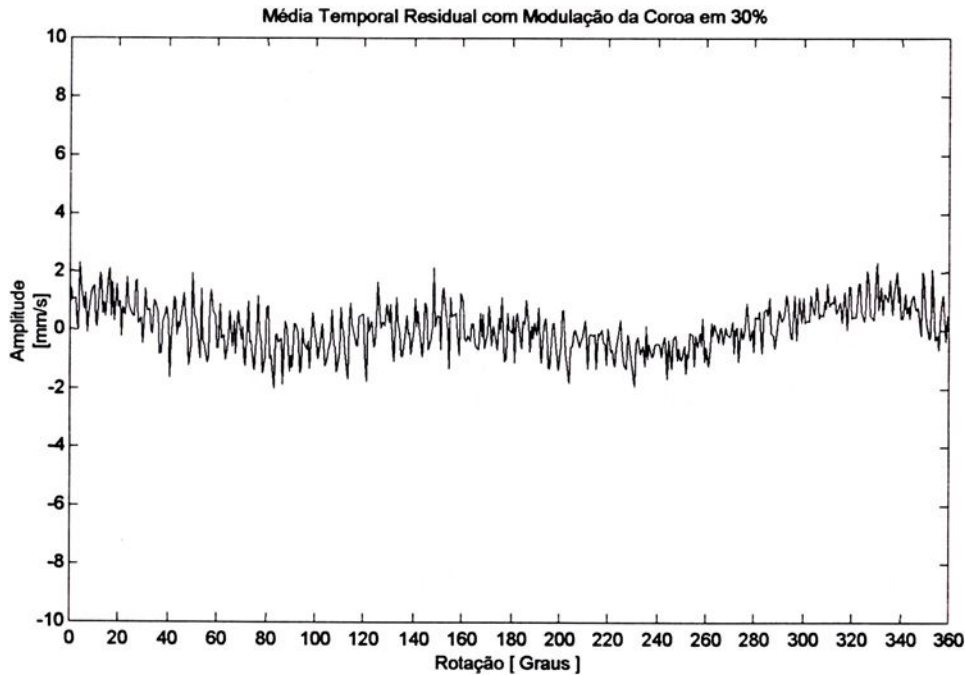


Figura 4.11 – Sinal residual temporal do sinal 3, simulado sob condições nominais de operação, com a presença de uma excentricidade, na ordem de 30%.

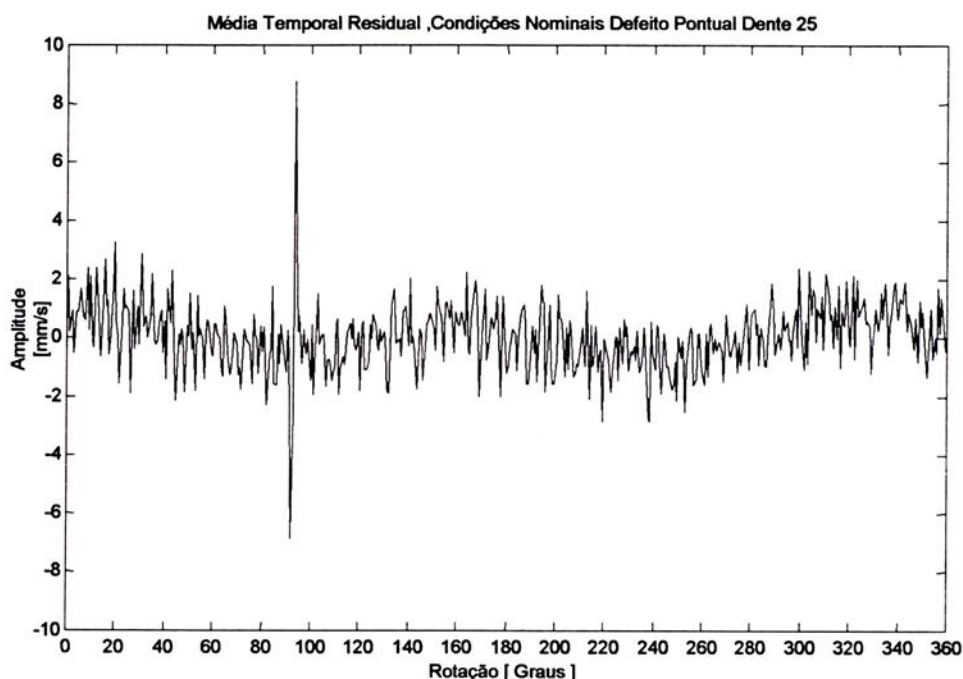


Figura 4.12– Sinal temporal residual do sinal 4, simulado sob condições nominais de operação, com presença de uma trinca no dente número 25.

4.3 ANÁLISE POR DEMODULAÇÃO

Também, para a execução desta análise, foi necessária a construção de uma rotina computacional sobre a plataforma Matlab®, denominada DEMOD, responsável pela leitura da TSA, filtragem ideal do sinal, cálculo da transformada de Hilbert e apresentação gráfica dos resultados.

Com base na análise visual realizada sobre a Figura 4.13, conjuntamente com a Figura 4.14, pode-se notar claramente uma indicação do surgimento de um defeito modulador, esse fato se deve ao aumento da distância entre o centro e face exterior da órbita, que passou de $d=1.2$ para $d=1.5$.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.15, verificou-se o mesmo comportamento anterior, em que a distância entre o centro e face exterior da órbita, passou de $d=1.5$ para $d=1.65$. Assim, pode-se concluir que esta análise pode ser utilizada tanto para indicar o surgimento, quanto a evolução de um defeito modulador.

Prosseguindo a análise, a Figura 4.16 apresenta claramente *loops* em torno da órbita, caracterizando dessa forma a presença de um defeito pontual.

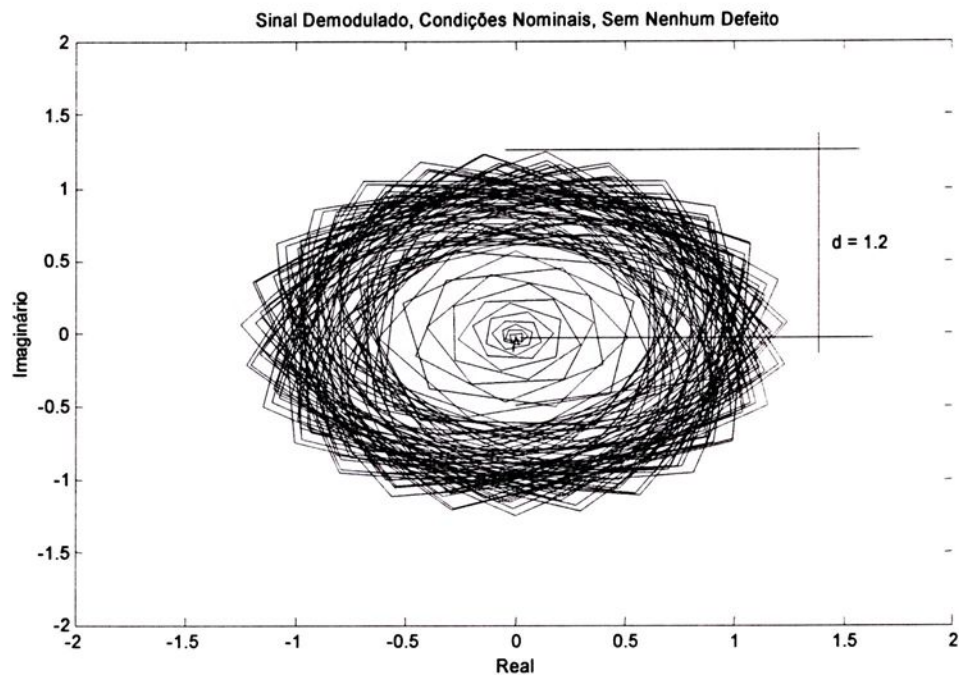


Figura 4.13 – Gráfico do sinal demodulado, nas condições nominais, sem nenhum defeito.

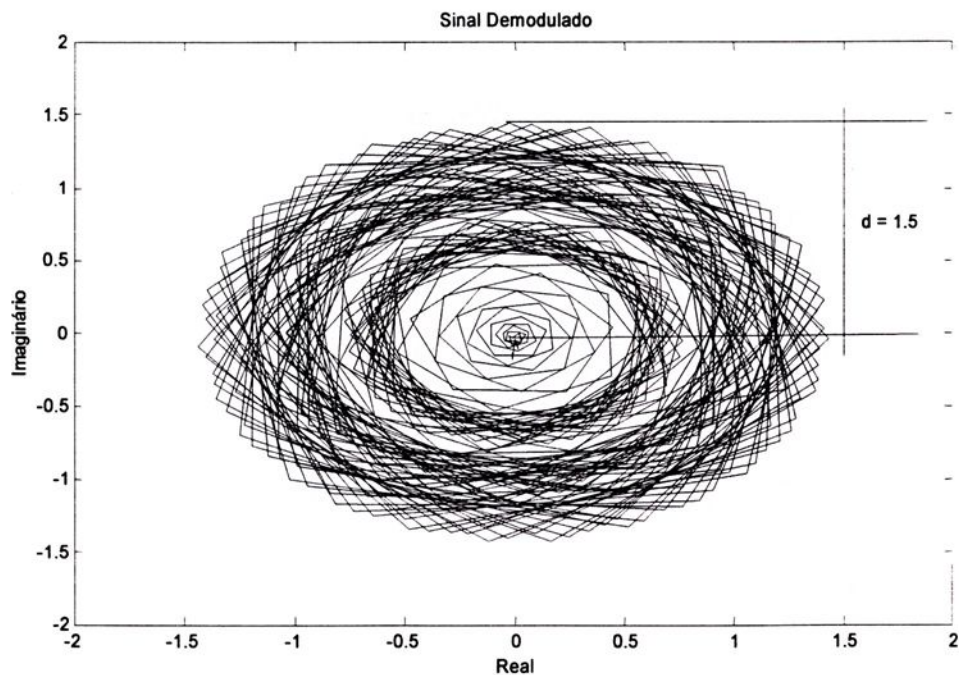


Figura 4.14 - Gráfico do sinal demodulado, nas condições nominais, com defeito modulador em 15%.

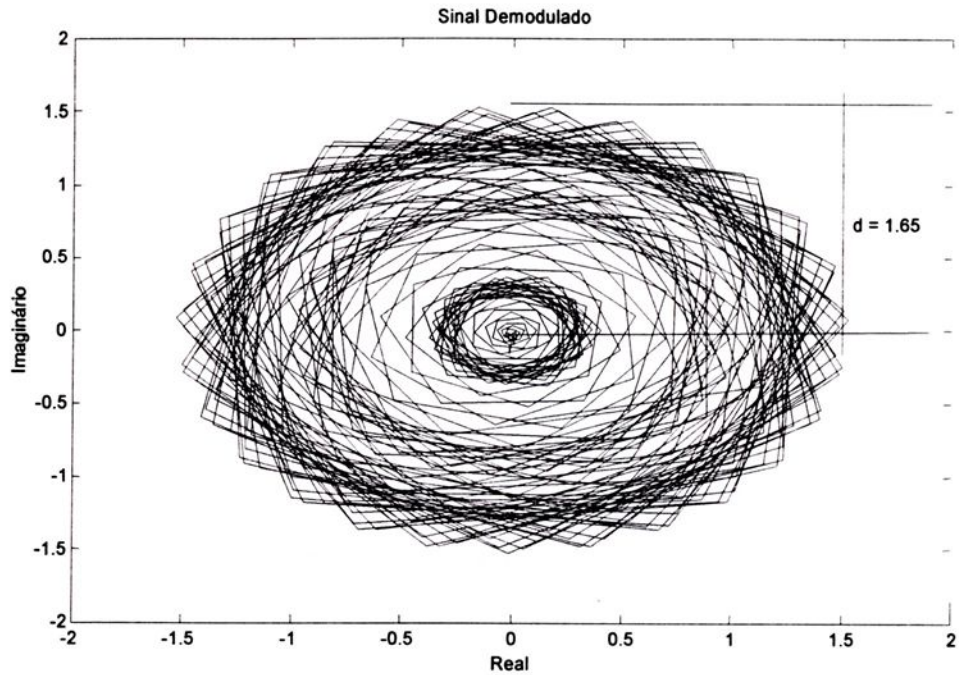


Figura 4.15 - Gráfico do sinal demodulado, nas condições nominais, com defeito modulador em 30%.

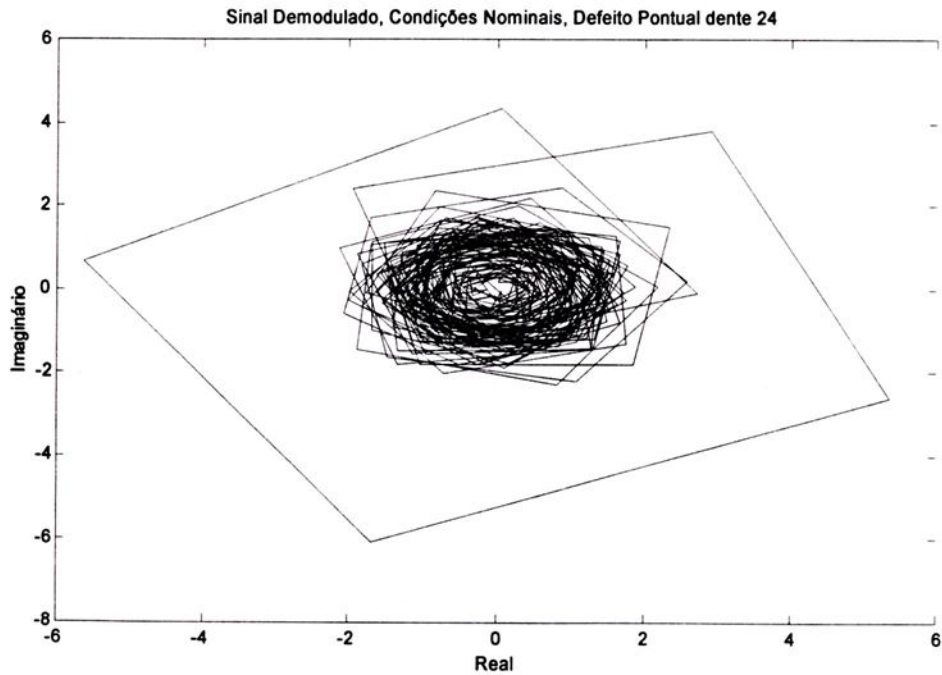


Figura 4.16 - Gráfico do sinal demodulado, nas condições nominais, com defeito pontual.

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na análise estatística realizada com a aplicação dos parâmetros variância, RMS, skewness, kurtosis e fator de crista, não foi necessário à construção de nenhuma rotina computacional específica, pois todos estes fatores são usuais e já estão implementados no software Matlab®.

4.4.1 Momento de Segunda Ordem (Variância)

Com base na análise visual realizada sobre a Figura 4.17, notou-se que esse parâmetro não foi capaz de fornecer uma indicação clara, tanto para o surgimento quanto para a evolução do defeito de excentricidade.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.18, observou-se um grande aumento, quase o dobro, no valor deste parâmetro, o que indica a presença do defeito pontual.

Do exposto acima, conclui-se que este fator, para a condição de potência constante, foi capaz de identificar a presença de uma falha pontual, mas não foi capaz de identificar a presença da excentricidade.

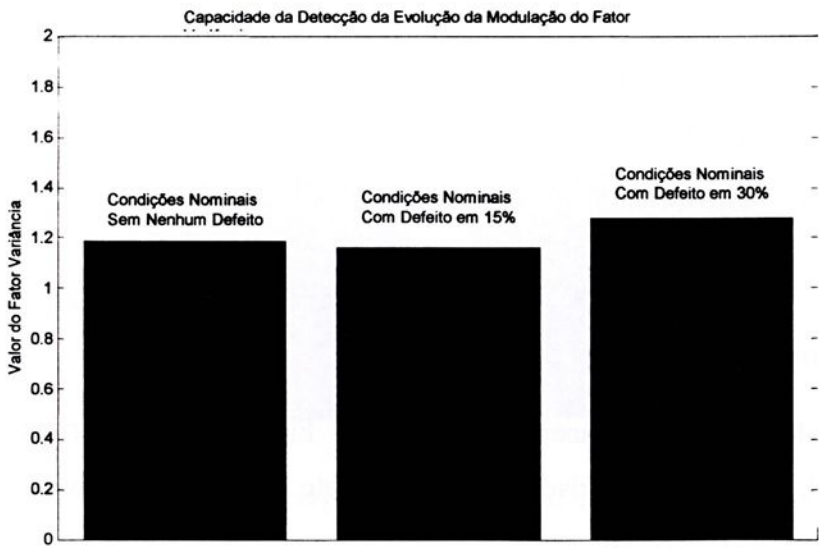


Figura 4.17 – Gráfico comparativo do parâmetro variância, demonstra os valores deste parâmetro para as condições descritas no gráfico.

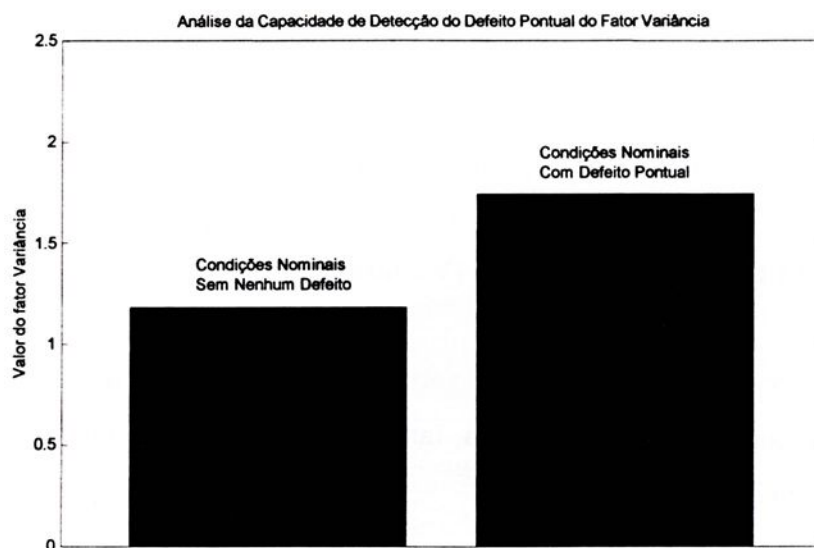


Figura 4.18 - Gráfico comparativo do parâmetro variância, demonstra os valores deste parâmetro para as condições descritas no gráfico.

4.4.2 Parâmetro RMS

Com base na análise visual realizada sobre a Figura 4.19, verificou-se que este parâmetro não indicou nenhuma variação significativa que pudesse indicar o defeito presente. Mas este fato não condiz com a realidade, pois este parâmetro, que representa a intensidade do sinal é utilizado internacionalmente, e deveria sim, indicar claramente o surgimento e a evolução da excentricidade, pois a excentricidade promove um aumento da energia vibratória do sinal, o que deveria ser retratado pelo fator RMS. Essa inconsistência entre os resultados esperados e os obtidos se deve a uma incapacidade do simulador de sinais utilizado neste trabalho de representar fielmente a intensidade do sinal.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.20, observou-se que no caso do defeito pontual, houve uma variação no valor deste parâmetro, a qual foi significativa para diagnosticar este tipo de defeito.

Assim, neste estudo, não se pode demonstrar a capacidade deste fator na detecção de uma falha que cause modulações no sinal, mas pode-se demonstrar sua capacidade na detecção de danos pontuais.

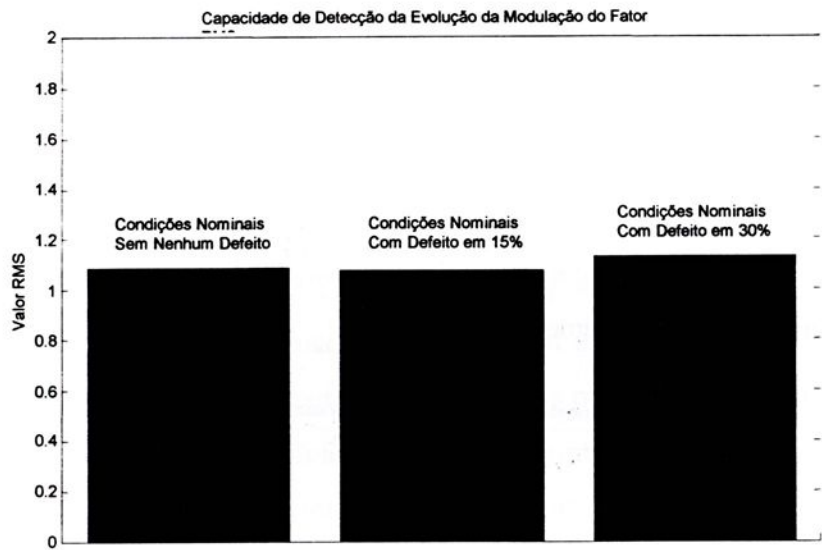


Figura 4.19 - Gráfico comparativo do parâmetro RMS, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas.

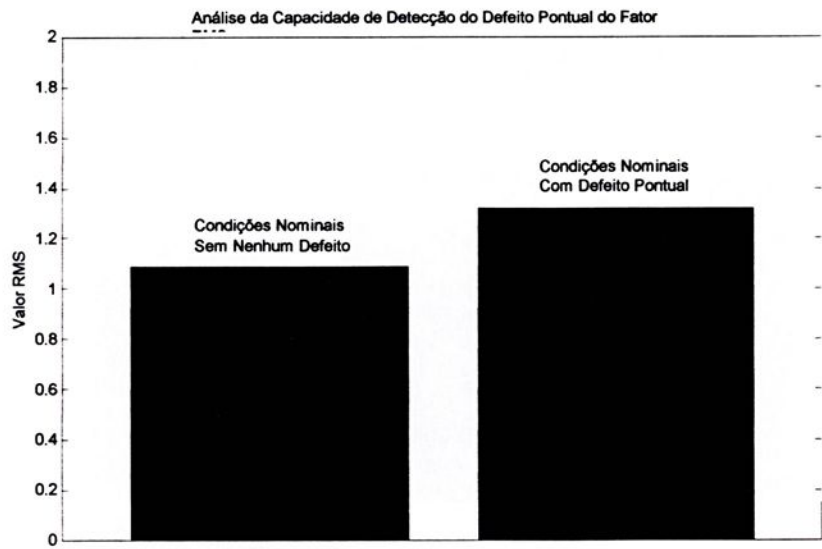


Figura 4.20 - Gráfico comparativo do parâmetro RMS, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas no gráfico.

4.4.3 Parâmetro Skewness

Com base na análise visual realizada sobre a Figura 4.21, notou-se que o parâmetro skewness foi incapaz de diagnosticar e acompanhar a evolução da excentricidade.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.22, observou-se claramente a indicação da ocorrência de alguma anomalia, no caso, uma trinca pontual. Assim, conclui-se que este parâmetro se mostrou bastante sensível na indicação do defeito pontual, pois o seu valor praticamente triplicou com o surgimento do defeito.

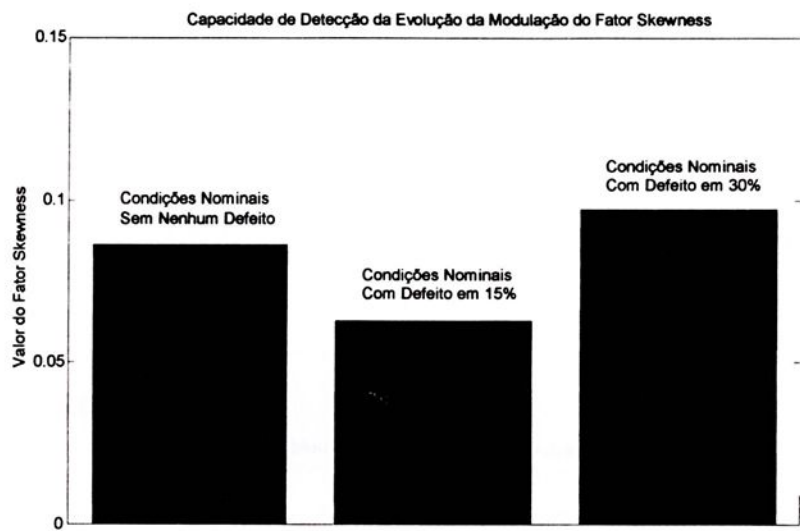


Figura 4.21 - Gráfico comparativo do parâmetro skewness, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas.

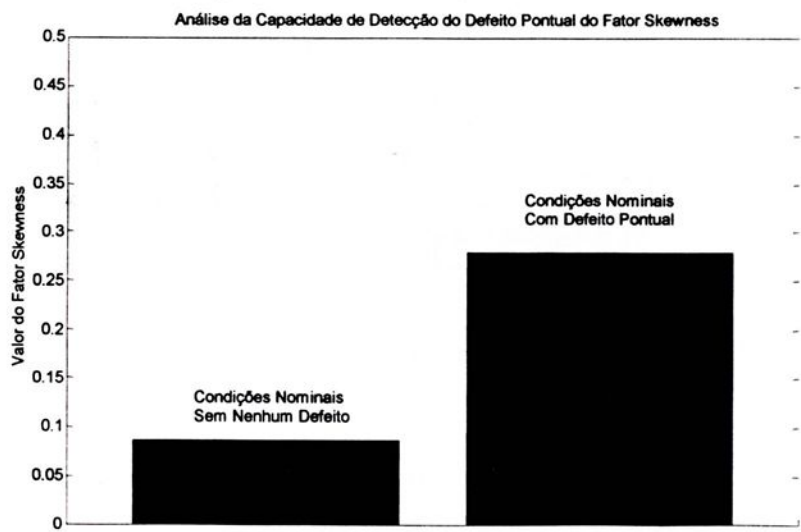


Figura 4.22 - Gráfico comparativo do parâmetro skewness, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas.

4.4.4 Parâmetro Kurtosis

Com base na análise visual realizada sobre a Figura 4.23, observou-se que este parâmetro foi totalmente incapaz de indicar a presença e evolução da excentricidade.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.24, notou-se uma forte alteração no seu valor, indicando claramente a presença do defeito pontual, Stewart (1977) demonstrou que para valores de kurtosis menores que 3.5 não existe falha pontual, de 3.5 a 4.5 um pequeno dano pontual está presente e para valores maiores que 4.5 um grande dano ocorreu. Neste estudo, foram encontrados valores totalmente concordantes com os propostos por Stewart (1977), para a condição normal, sem a presença do defeito, o valor de kurtosis encontrado foi de 2.8 e para a condição contendo uma grande falha pontual, o valor de kurtosis foi de 6.4.

Portanto, conclui-se que o este parâmetro foi incapaz de identificar defeitos que causem modulação ao longo do sinal, mas é altamente capacitado na identificação de defeitos pontuais.

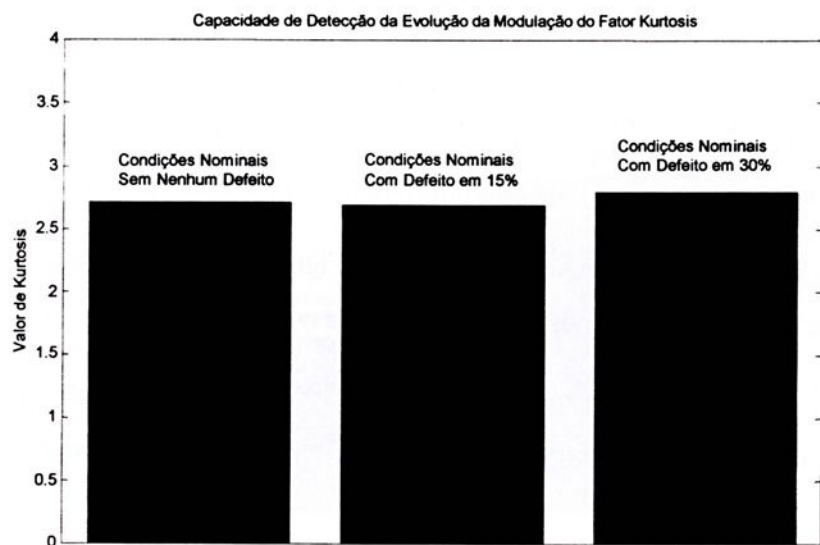


Figura 4.23 - Gráfico comparativo do parâmetro kurtosis, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas.

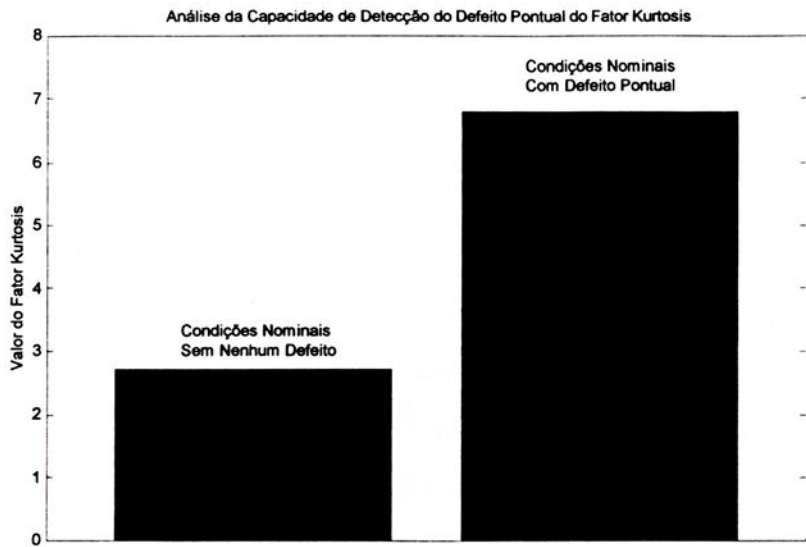


Figura 4.24 - Gráfico comparativo do parâmetro kurtosis, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas.

4.4.5 Parâmetro Fator de Crista

Com base na análise visual realizada sobre a Figura 4.25, observou-se que este parâmetro indicou, ainda que timidamente a presença da modulação, mas não foi capaz de indicar a evolução desta modulação, o que indica que o fator de crista é instável e portanto não pode ser utilizado na indicação de defeitos que causem modulação ao longo do sinal.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.26, notou-se uma forte alteração no seu valor na presença do defeito pontual, o que indica o defeito pontual.

Portanto, conclui-se que o este parâmetro foi incapaz de identificar defeito causado pela excentricidade, mas é altamente capacitado na identificação de defeitos pontuais.

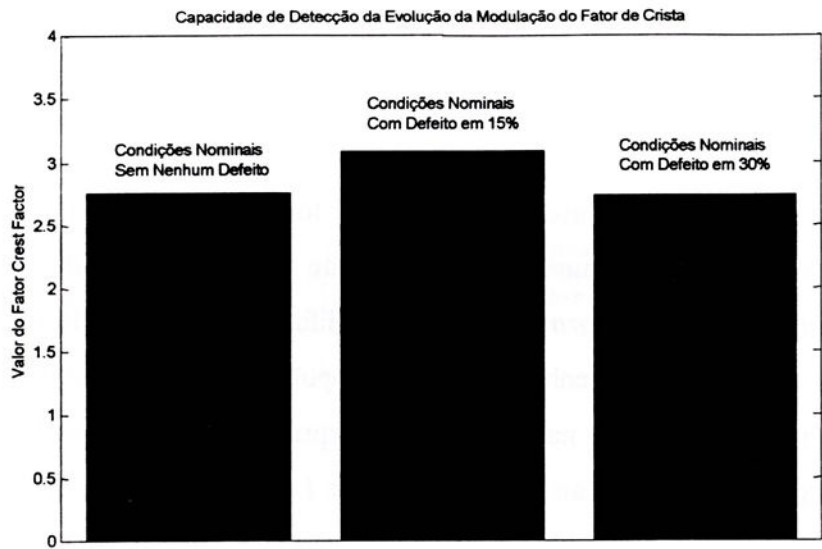


Figura 4.25 - Gráfico comparativo do fator de crista, representativo dos valores deste parâmetro para as condições descritas.

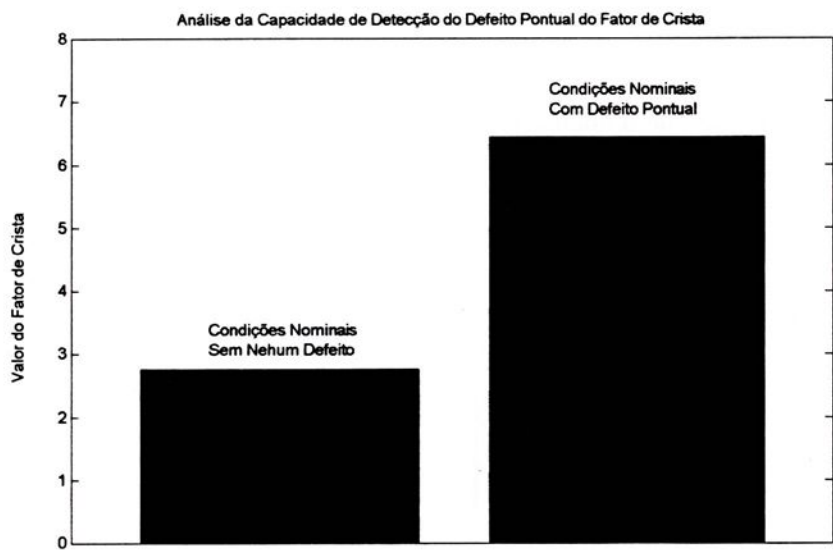


Figura 4.26 - Gráfico comparativo do parâmetro fator de crista, apresenta os valores deste parâmetro para as condições descritas.

4.5 ANÁLISE ESPECTRAL CLÁSSICA

Esta análise baseia-se na identificação das componentes espectrais e qual a sua intensidade. Fundamentalmente esta identificação pode se obtida por intermédio do espectro em amplitude, *power spectrum*, auto-espectro entre outras formas, todos estes são basicamente obtidos por intermédio da transformada de Fourier, que atualmente é facilmente obtida segundo o algoritmo denominado *Fast Fourier Transform* mundialmente difundido e conhecido por FFT. Assim, não foi necessária a construção de nenhuma rotina computacional para a obtenção dos espectros, onde alguma atenção é necessária na discretização, representados pelos parâmetros de aquisição, a fim de evitar alguns problemas, tais como, *Aliasing* e *Leakage* (McConnell, 1995).

Com base na análise visual realizada sobre as Figura 4.27, Figura 4.28, Figura 4.29, pode-se observar a presença de bandas laterais e também o aumento da amplitude destas com a evolução do defeito, causado pela excentricidade.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.30, notou-se presença de diversas linhas espectrais estendendo-se sobre uma ampla região e com pequenas amplitudes, em razão da presença de um defeito pontual.

Portanto, conclui-se que a análise espectral apresenta os tipos de defeitos estudados.

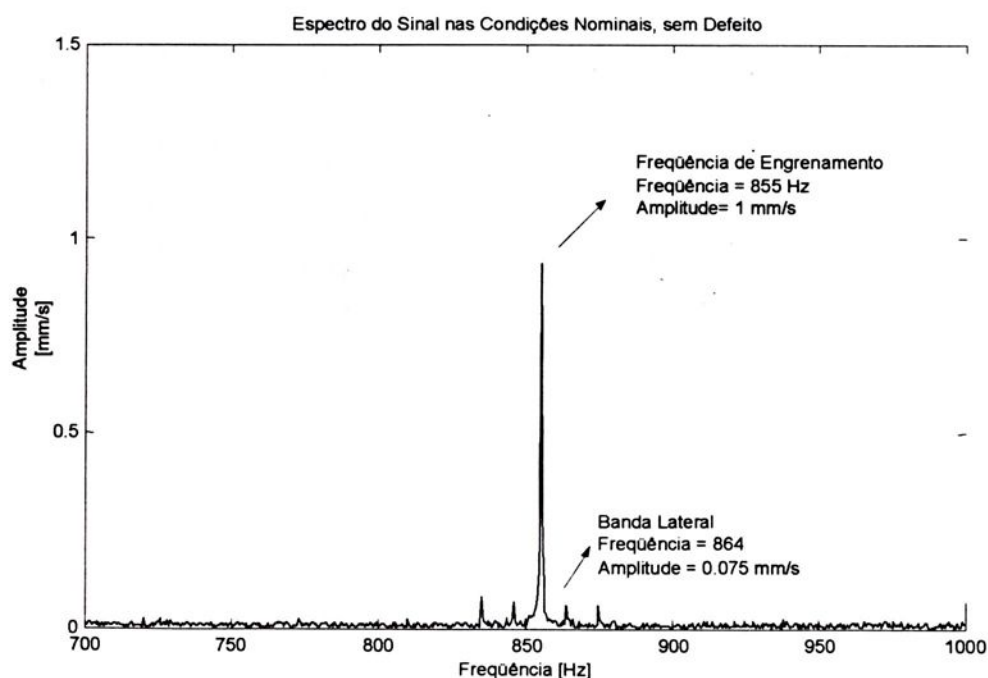


Figura 4.27 – Zoom espectral na região de análise, nota-se a pequena amplitude da banda lateral, em razão de uma pequena excentricidade residual não significativa.

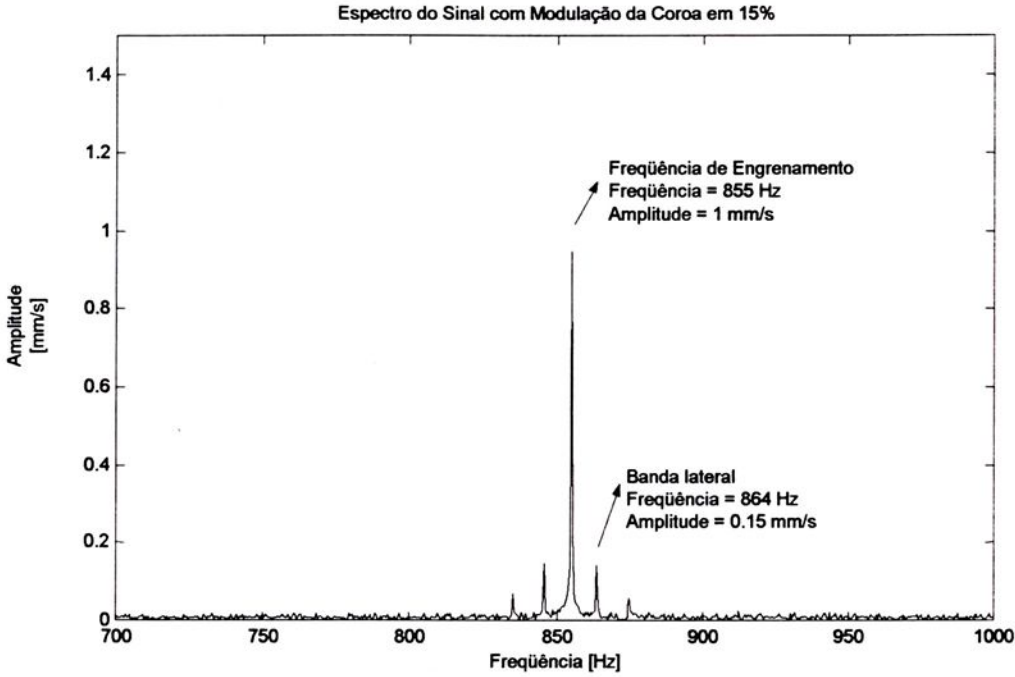


Figura 4.28 - Zoom espectral na região de análise, nota-se o aumento da banda lateral, em razão de uma pequena evolução da excentricidade, cuja amplitude corresponde a 15% da amplitude da frequência de engrenamento.

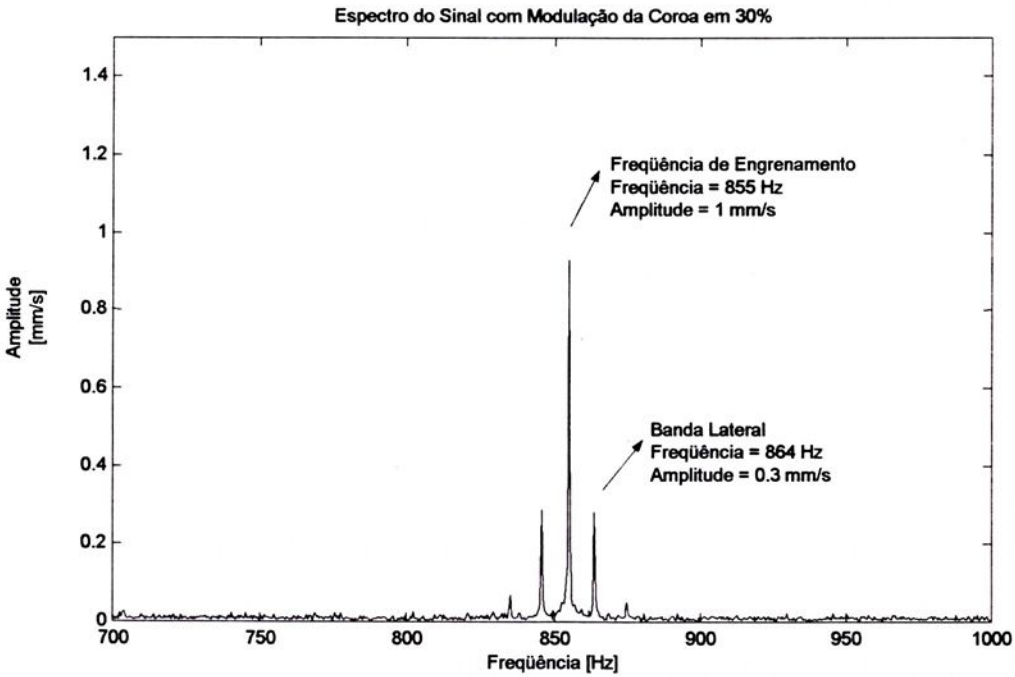


Figura 4.29 - Zoom espectral na região de análise, nota-se o aumento das bandas laterais, em razão de uma evolução da excentricidade, cuja amplitude corresponde a 30% da amplitude da frequência de engrenamento

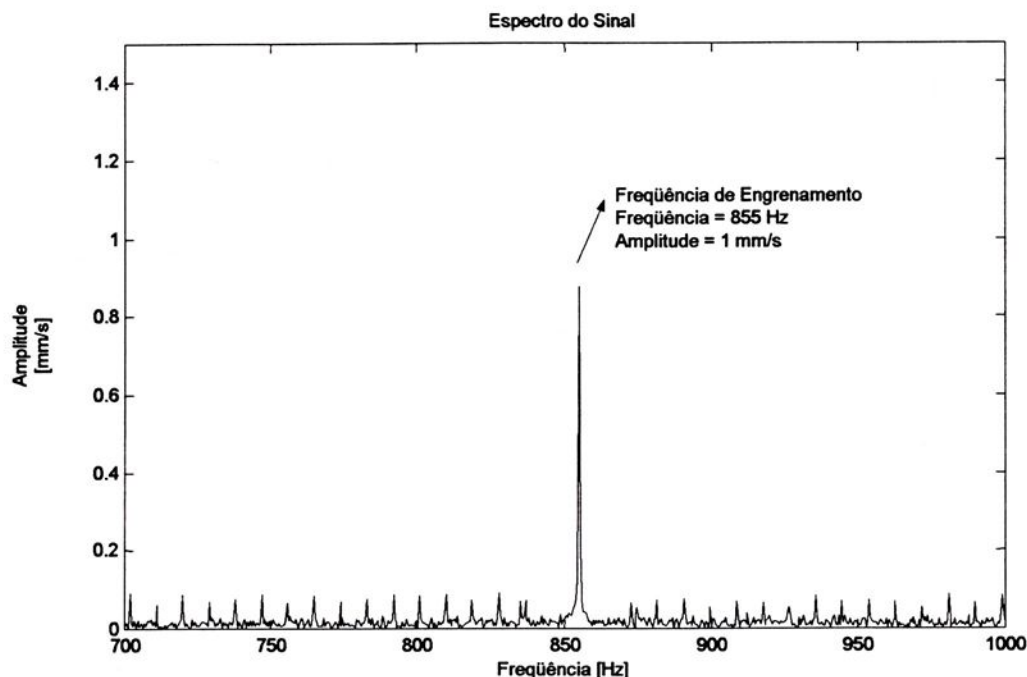


Figura 4.30 - Zoom espectral na região de análise, nota-se a presença de diversas linhas espectrais se estendendo sobre uma ampla região e com pequenas amplitudes, em virtude da presença de um defeito pontual.

4.6 TRANSFORMADA CURTA DE FOURIER (STFT)

A transformada curta de Fourier introduz a análise tempo-frequência. Conforme apresentado no capítulo 3, as transformações tempo-frequência envolvem integrais, e outras operações matemáticas complexas, e relativamente demoradas de serem implementadas, o que inviabilizaria a implementação de cada uma das transformações utilizadas neste trabalho. Devido à estes fatos, optou-se em utilizar um conjunto de rotinas especialmente desenvolvidas para a obtenção de diversas distribuições e transformações tempo-frequência, implementada por um convênio entre dois importantes centros científicos, o *Centre National de la Recherche Scientifique*, situado na França e a *Rice University* nos Estados Unidos. Tal conjunto de rotinas foi implementado sobre a plataforma Matlab®, sendo denominado *Time-Frequency Toolbox: For Use With Matlab®*, cujos autores são Françoise Auger, Patrick Flandrin, Paulo Gonçalves e Olivier Lemoine. Este será utilizado para a obtenção de todas as distribuições tempo-frequência.

A STFT apresenta o sinal conjuntamente no tempo e na frequência. A intensidade é demonstrada segundo uma escala de cores, em que quanto mais quente a cor, maior é a intensidade do sinal neste local.

Com base na análise visual realizada sobre a Figura 4.31, representativa das condições normais e sem a presença de nenhum defeito, nota-se claramente a presença de uma faixa uniforme e de coloração amarelo-claro, estendendo-se durante todo o intervalo de tempo, cuja frequência é de 855 Hz, portanto esta componente é a frequência de engrenamento. Notou-se ainda uma faixa bem mais clara, também contínua, cuja frequência se encontra em 1710 Hz, esta é referente ao primeiro harmônico da frequência de engrenamento. Observou-se ainda alguns átomos isolados em baixas frequências, cuja identificação é bastante difícil, provavelmente refere-se a frequência de giro do eixo da coroa.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.32, nota-se uma mudança em relação à Figura 4.31 na faixa temporal de 0 a 30ms, no qual observou-se um aumento da intensidade da cor durante este intervalo. Este fato se deve, provavelmente, ao aumento da amplitude de modulação. Mas este diagnóstico é difícil de ser feito, já que o sinal analisado é referente à TSA, e a componente moduladora tem a mesma frequência que o giro do eixo que está sendo analisado, no caso o eixo da coroa. Provavelmente este diagnóstico seria mais preciso se estivesse sendo analisado o eixo do pinhão.

A Figura 4.33 apresenta uma característica que reafirma a condição descrita acima, já que observo-se na faixa de 855Hz, cores fortes durante o período de 0 a 50 ms e cores fracas durante o período de 50 a 100 ms, indicando assim o aumento da modulação.

Já no caso da Figura 4.34, notou-se claramente uma faixa de frequências de 250 a 1500Hz especificamente no tempo de 30ms, o que caracteriza uma mudança localizada no sinal de vibração, indicando assim a falha no dente 24.

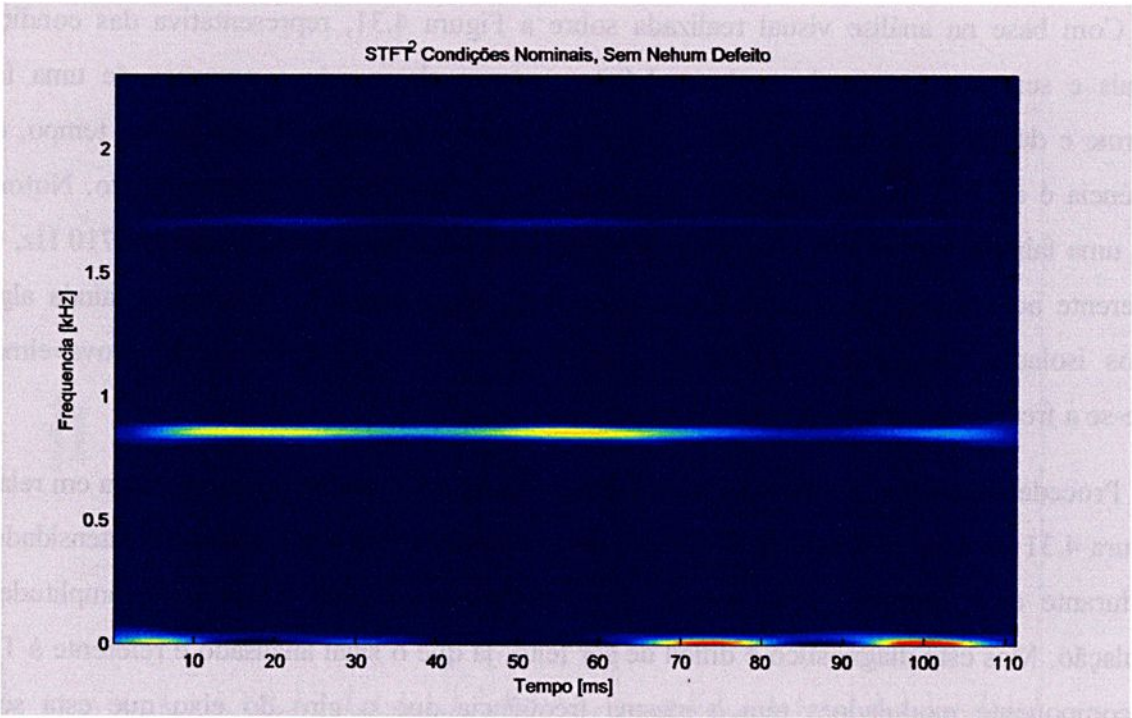


Figura 4.31 – Transformada Curta de Fourier (STFT), para as condições nominais sem a presença de nenhum defeito.

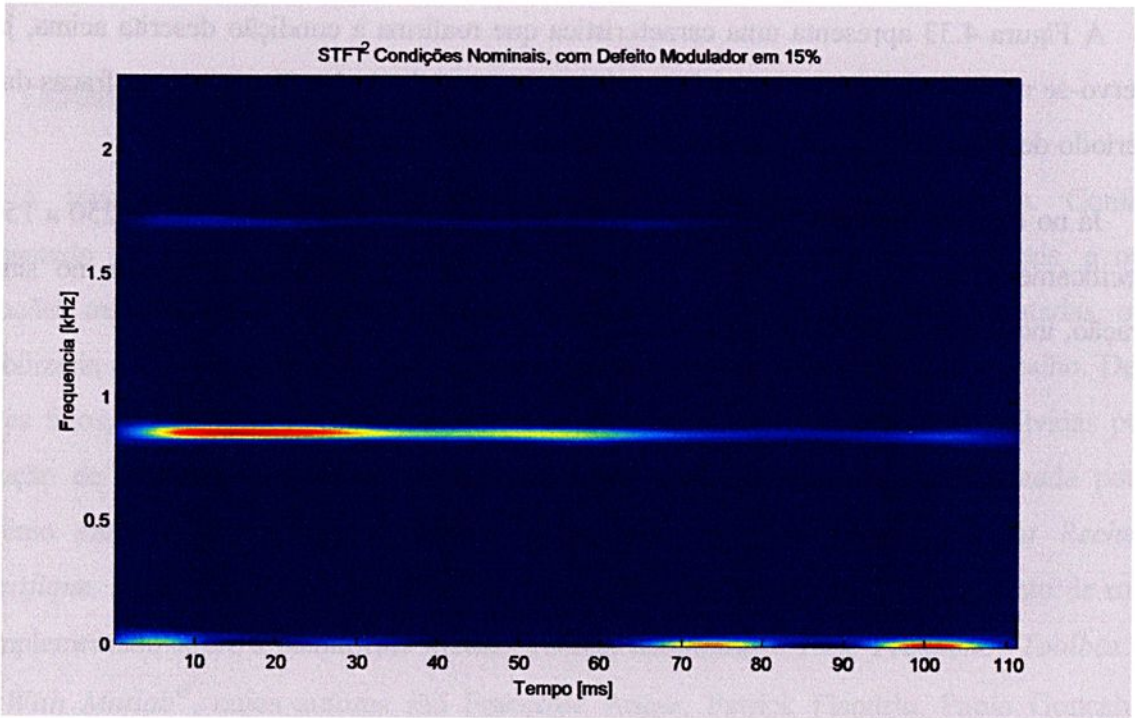


Figura 4.32 – Transformada Curta de Fourier (STFT), para as condições nominais, com defeito modulador em 15%.

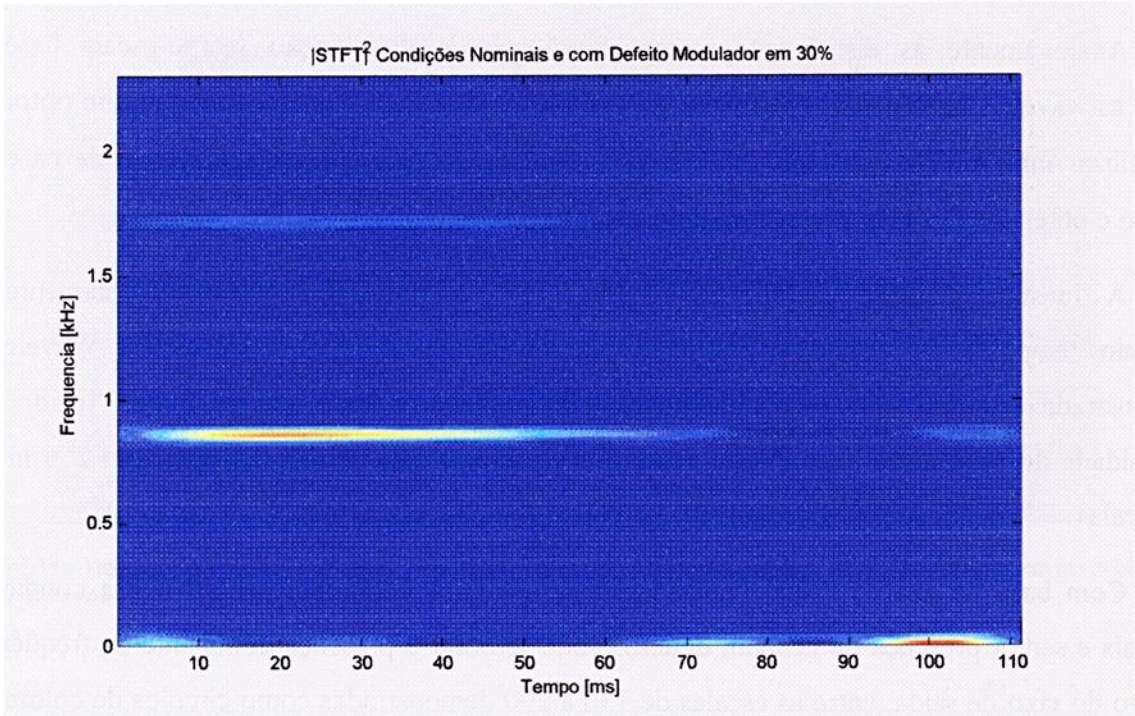


Figura 4.33 - Transformada Curta de Fourier (STFT), para as condições nominais, com defeito modulador em 30%.

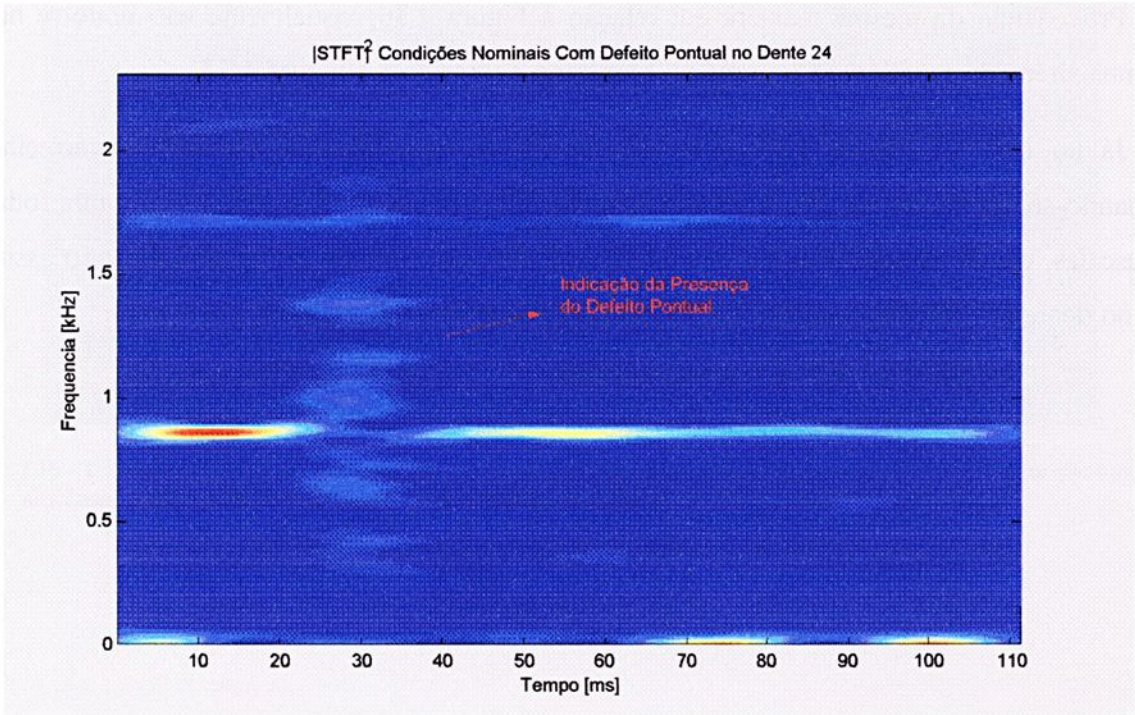


Figura 4.34 - Transformada Curta de Fourier (STFT), para as condições nominais, com defeito pontual no dente número 24.

4.7 TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA

Analogamente às distribuições tempo-frequência, a distribuição tempo-escala baseada sobre as wavelets também são relativamente complexas de serem implementadas, assim optou-se em utilizar uma *toolbox* existente no Matlab®, denominada WaveMenu, que serviu de base no estudo e obtenção dos mapas wavelets apresentados a seguir.

A transformada Wavelet, diferencia-se da STFT por apresenta o sinal conjuntamente no domínio tempo-escala e não no domínio tempo frequência. A intensidade da Wavelet é demonstrada segundo uma escala de cores, em que quanto mais quente a cor, maior é a intensidade do sinal neste local. Neste estudo, utilizou-se a wavelet Morlet contendo 256 níveis de escalas.

Com base na análise visual realizada sobre a Figura 4.35, representativa das condições normais e sem a presença de nenhum defeito, pode-se notar a presença dominante da frequência de giro do eixo de saída, entre as escalas de 130 a 200 demonstradas como círculos de coloração amarela, estendendo se durante todo o intervalo de tempo. Não sendo possível observar claramente nenhuma outra frequência dominante.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.36, visualmente não pode-se notar nenhuma alteração significativa no gráfico. O mesmo ocorre com a Figura 4.37.

Já no caso da Figura 4.38, notou-se claramente uma faixa de coloração avermelhada originando-se nas baixas escalas, conseqüentemente altas frequências, estendo-se durante toda as 256 escalas, o que caracteriza uma mudança localizada no sinal de vibração, indicando assim a falha no dente 25.

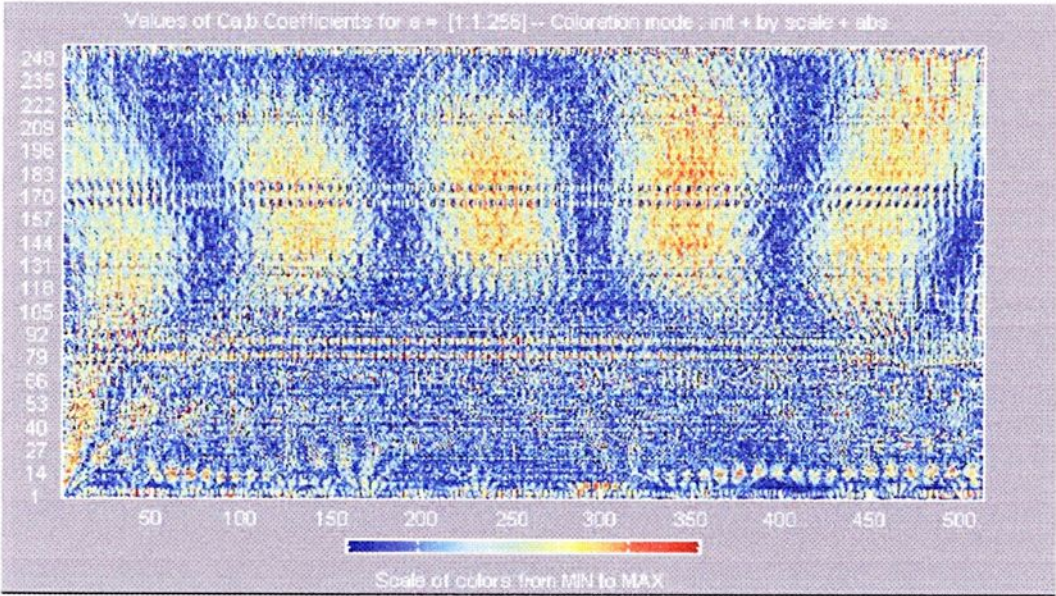


Figura 4.35 - Transformada Wavelet contínua, para as condições nominais sem a presença de nenhum defeito, em que o eixo das abscissas indica o número de pontos e o das ordenadas as escalas.

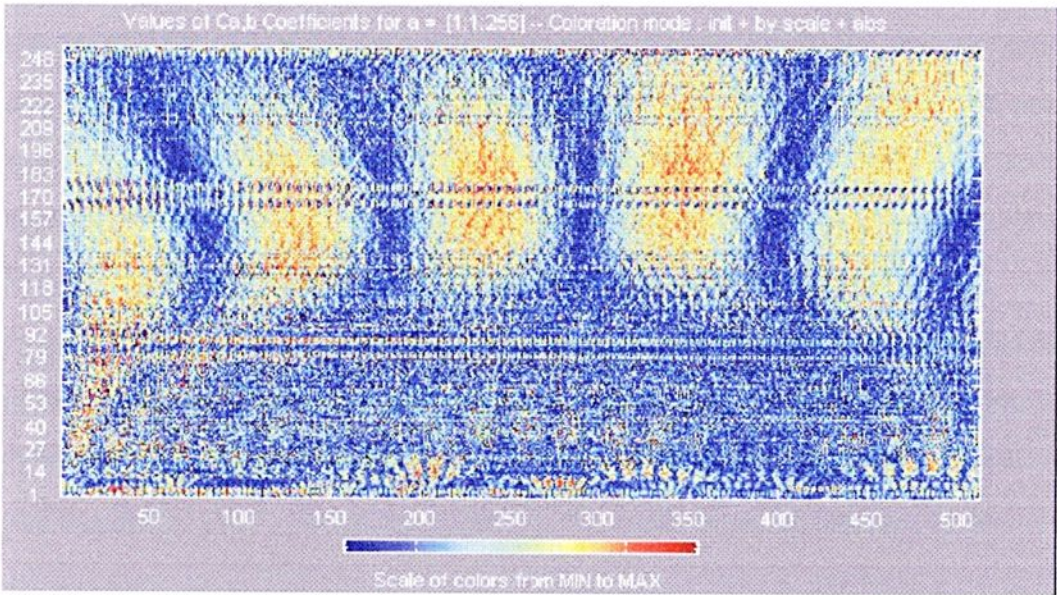


Figura 4.36 - Transformada Wavelet contínua, para as condições nominais, com defeito modulador em 15%, em que o eixo das abscissas indica o número de pontos e o das ordenadas as escalas..

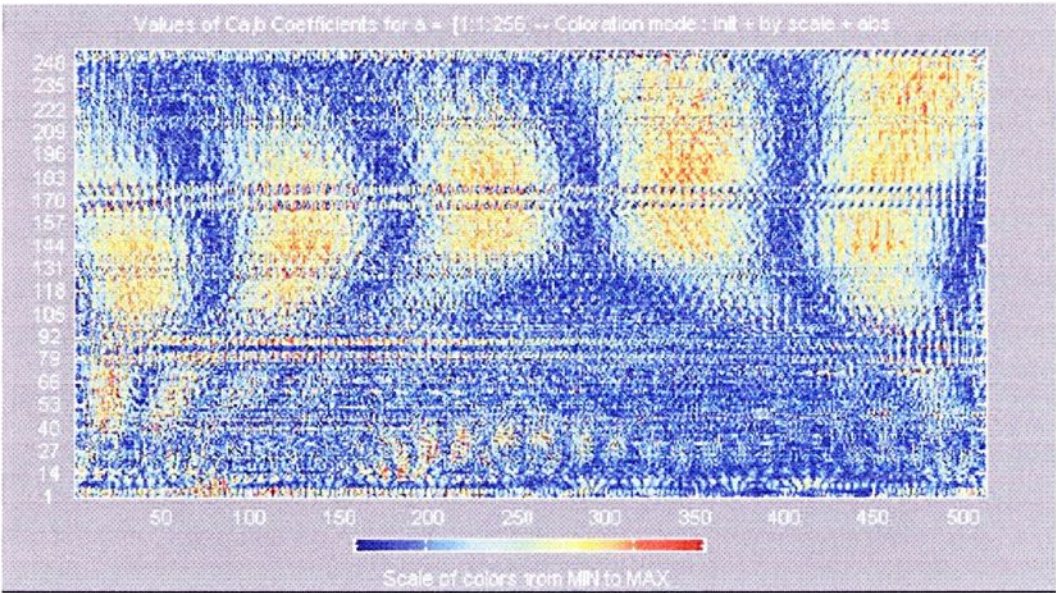


Figura 4.37 - Transformada Wavelet contínua, para as condições nominais, com defeito modulador em 30%, em que o eixo das abscissas indica o número de pontos e o das ordenadas as escalas.

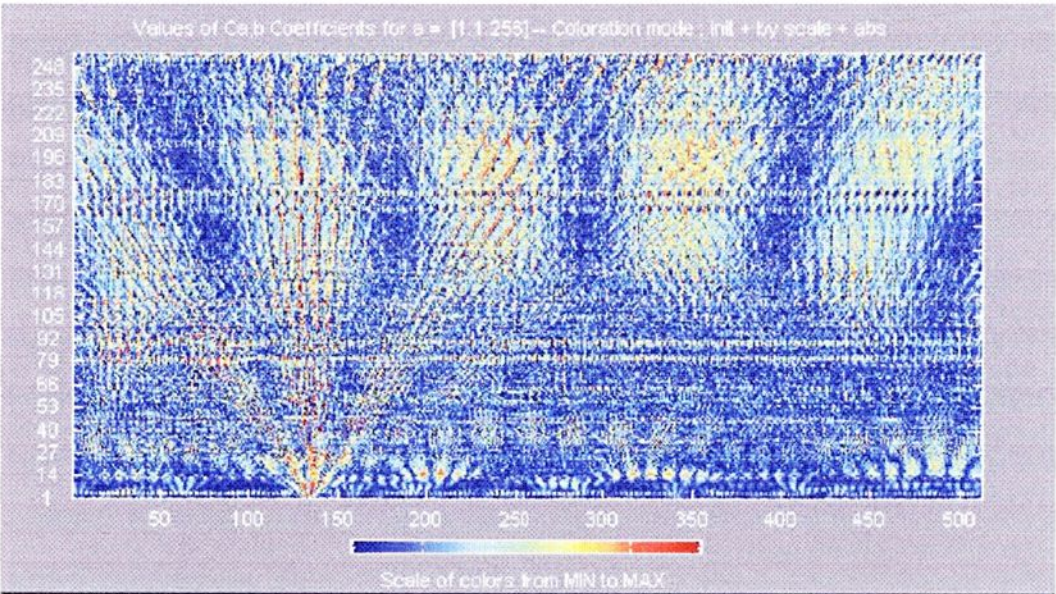


Figura 4.38 - Transformada Wavelet contínua, para as condições nominais, com defeito pontual no dente número 24, em que o eixo das abscissas indica o número de pontos e o das ordenadas as escalas.

4.8 DISTRIBUIÇÃO WIGNER-VILLE

Da mesma forma que a STFT, a distribuição Wigner-Ville apresenta o sinal conjuntamente no tempo e na frequência. A intensidade é demonstrada segundo uma escala de cores, na qual quanto mais quente a cor, maior é a energia do sinal neste local.

Com base na análise visual realizada sobre a Figura 4.39, representativa das condições normais e sem a presença de nenhum defeito, nota-se claramente a presença de uma faixa uniforme e de coloração azul-claro, estendendo-se durante todo o intervalo de tempo, cuja frequência é de 855 Hz, portanto esta componente é a frequência de engrenamento. Notou-se ainda uma faixa bem mais clara, também contínua, cuja frequência se encontra em 1710 Hz, esta é referente ao primeiro harmônico da frequência de engrenamento. Observou-se ainda, como era esperado, alguns termos cruzados, que não possuem nenhum significado.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.40, nota-se uma suave alteração em relação à Figura 4.39 na faixa temporal de 0 a 30ms, na qual observou-se um aumento da intensidade da cor durante este intervalo. Este fato deve-se, provavelmente, ao aumento da amplitude de modulação. Mas este diagnóstico é difícil de ser feito, já que o sinal analisado é referente à TSA, e a componente moduladora tem a mesma frequência que o giro do eixo que esta sendo analisado, no caso o eixo da coroa. Provavelmente este diagnóstico seria mais preciso se estivesse sendo analisado o eixo do pinhão.

A Figura 4.41, apresenta uma característica que reafirma a condição descrita acima, já que observa-se na faixa de 855Hz, cores fortes durante o período de 0 a 50 ms e cores fracas durante o período de 50 a 100 ms, indicando assim o aumento da modulação.

Já no caso da Figura 4.42, notou-se claramente uma faixa de frequências de 500 a 1500Hz especificamente no tempo de 30ms, o que caracteriza uma mudança localizada no sinal de vibração, indicando assim a falha no dente 25. Nota-se também a grande quantidade de termos cruzados induzidos por esse defeito.

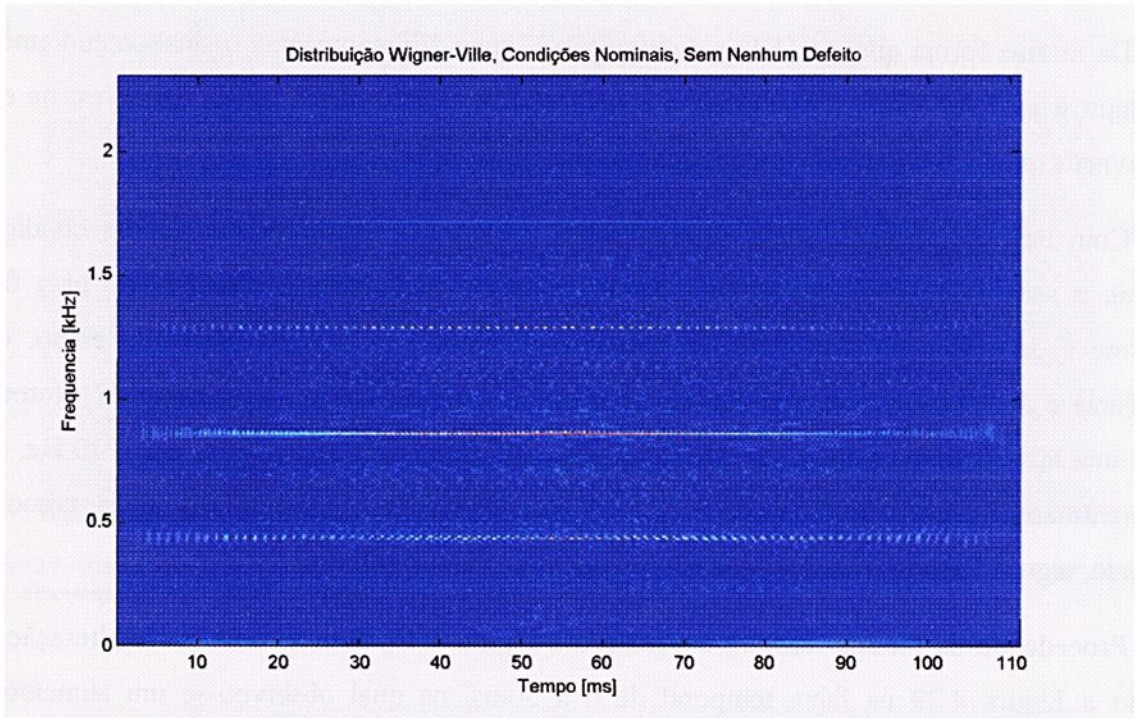


Figura 4.39 – Distribuição Wigner-Ville, para as condições nominais sem a presença de nenhum defeito.

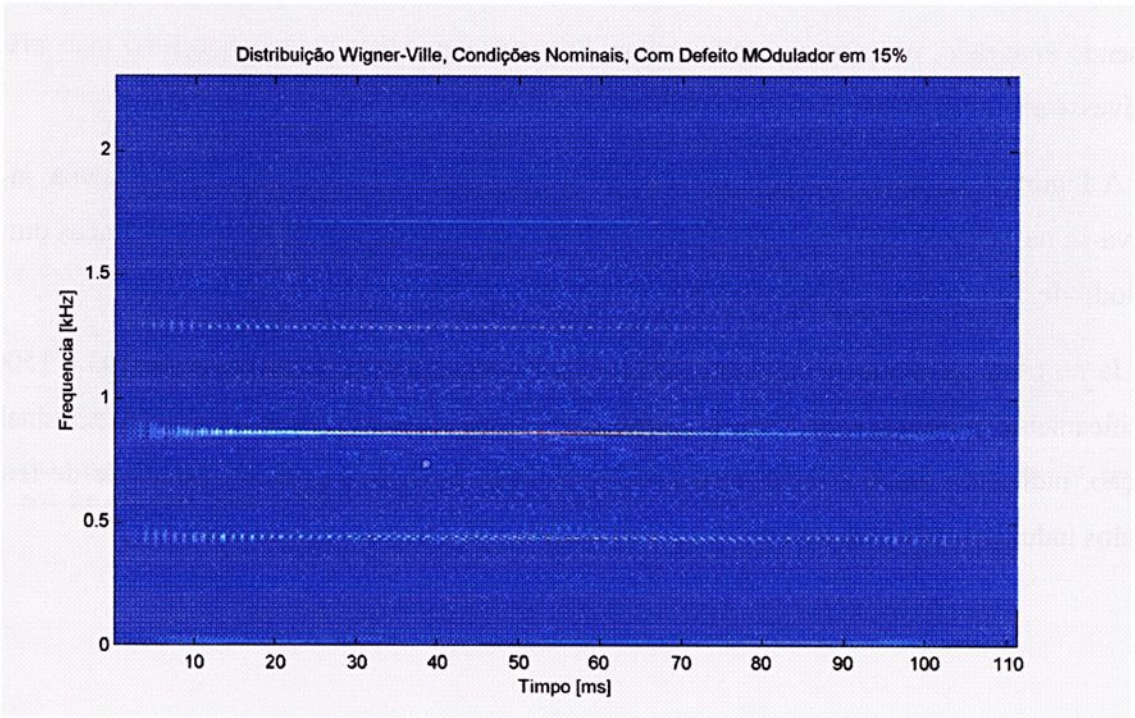


Figura 4.40 - Distribuição Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito modulador em 15%.

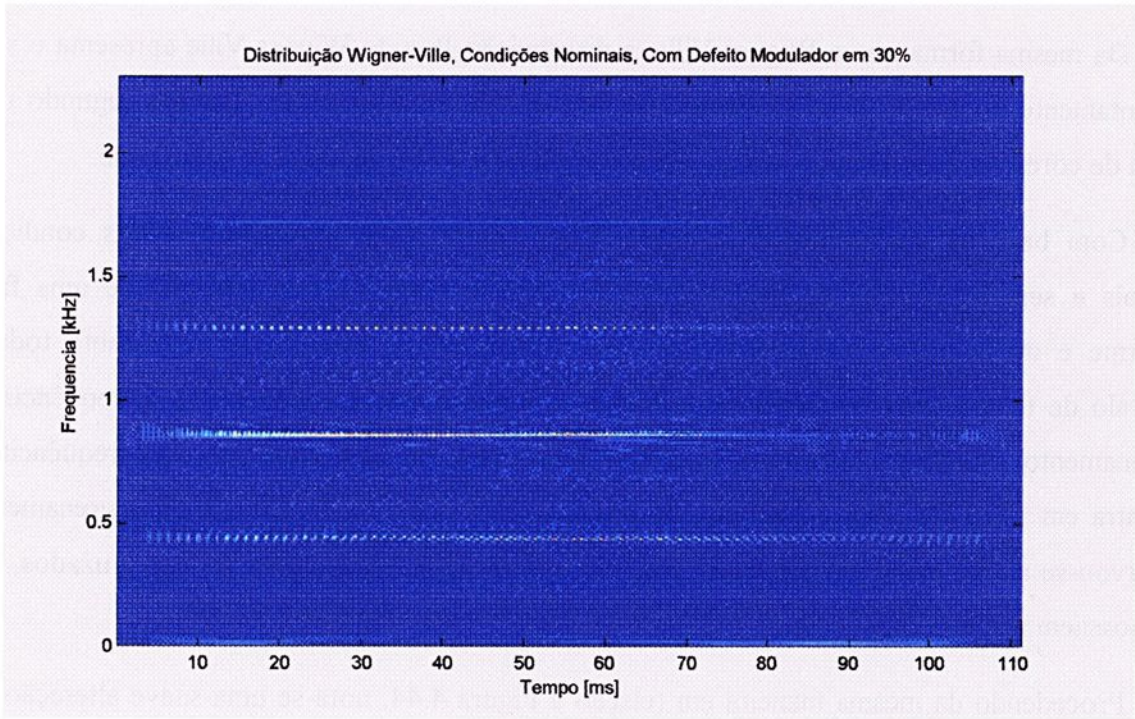


Figura 4.41 - Distribuição Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito modulador em 30%.

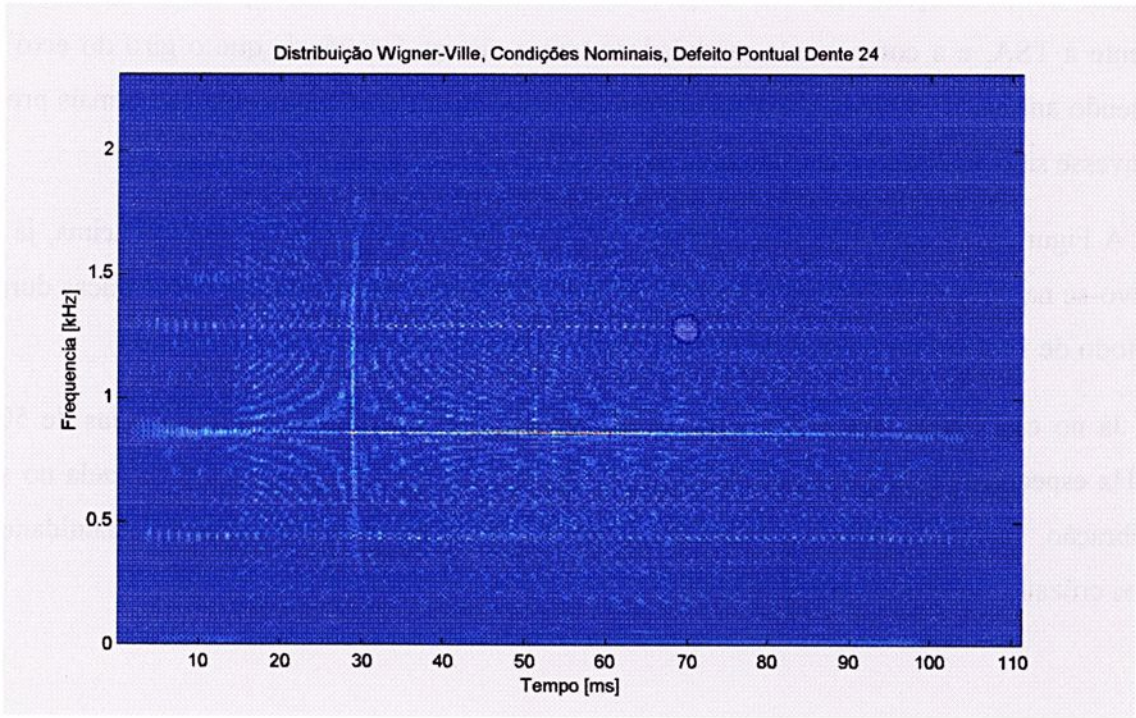


Figura 4.42 - Distribuição Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito pontual no dente número 25.

4.9 DISTRIBUIÇÃO PSEUDO WIGNER-VILLE

Da mesma forma que a Wigner-Ville, a distribuição Pseudo Wigner-Ville apresenta o sinal conjuntamente no tempo e na frequência. A intensidade também é demonstrada segundo uma escala de cores, na qual quanto mais quente a cor, maior é a energia do sinal neste local.

Com base na análise visual realizada sobre Figura 4.43, representativa das condições normais e sem a presença de nenhum defeito, nota-se claramente a presença de uma faixa uniforme e de coloração azul-claro com tons avermelhados, estendendo-se durante todo o intervalo de tempo, cuja frequência é de 855 Hz, portanto esta componente, é a frequência de engrenamento. Notou-se ainda uma faixa bem mais clara, também contínua, cuja frequência se encontra em 1710 Hz, esta é referente ao primeiro harmônico da frequência de engrenamento. Observou-se ainda, como era esperado, mas em menor quantidade, alguns termos cruzados, que não possuem nenhum significado.

Procedendo da mesma maneira em relação à Figura 4.44, nota-se uma suave alteração em relação a Figura 4.43 na faixa temporal de 0 a 30ms, na qual observou-se um aumento da intensidade da cor durante este intervalo. Este fato deve-se, provavelmente, ao aumento da amplitude de modulação. Mas este diagnóstico é difícil de ser feito, já que o sinal analisado é referente à TSA, e a componente moduladora tem a mesma frequência que o giro do eixo que esta sendo analisado, no caso o eixo da coroa. Provavelmente este diagnóstico seria mais preciso se estivesse sido analisado o eixo do pinhão.

A Figura 4.45 apresenta uma característica que reafirma a condição descrita acima, já que observo-se na faixa de 855Hz, cores fortes durante o período de 0 a 50 ms e cores fracas durante o período de 50 a 100ms, indicando assim o aumento da modulação.

Já no caso da Figura 4.46, notou-se claramente uma forte faixa de frequências de 500 a 1500Hz especificamente no tempo de 30ms, o que caracteriza uma mudança localizada no sinal de vibração, indicando assim a falha no dente 24. Nota-se também a grande quantidade de termos cruzados induzidos por esse defeito.

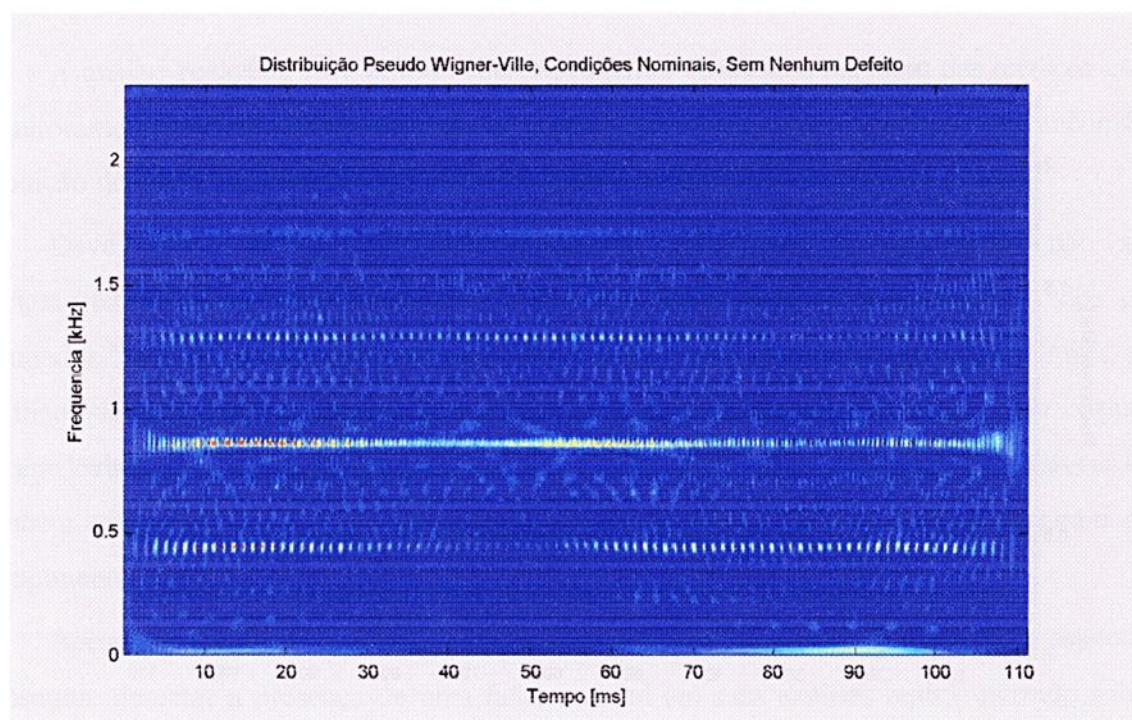


Figura 4.43 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, para as condições nominais sem a presença de nenhum defeito.

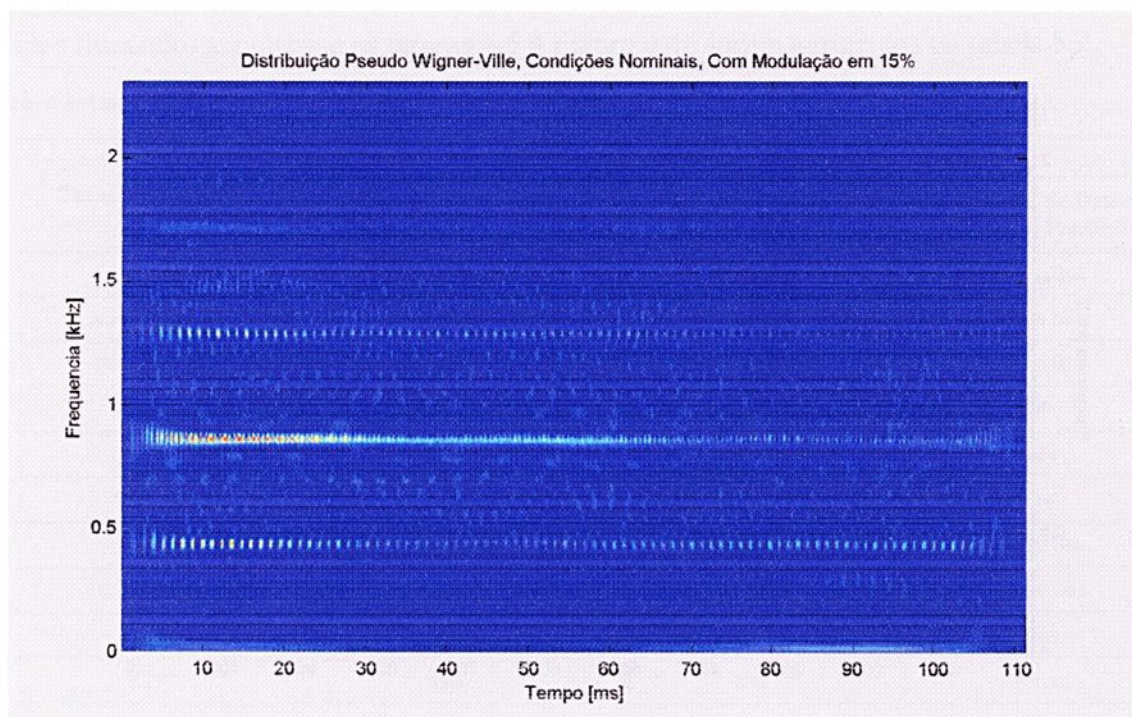


Figura 4.44 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito modulador em 15%.

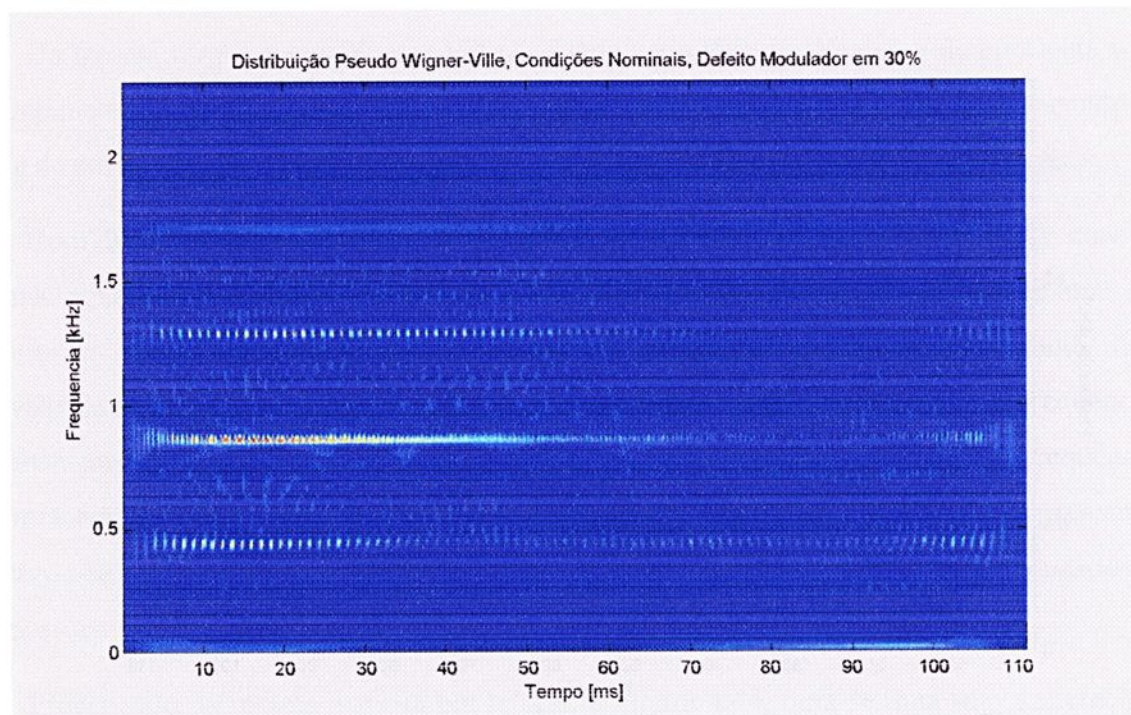


Figura 4.45 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito modulador em 30%.

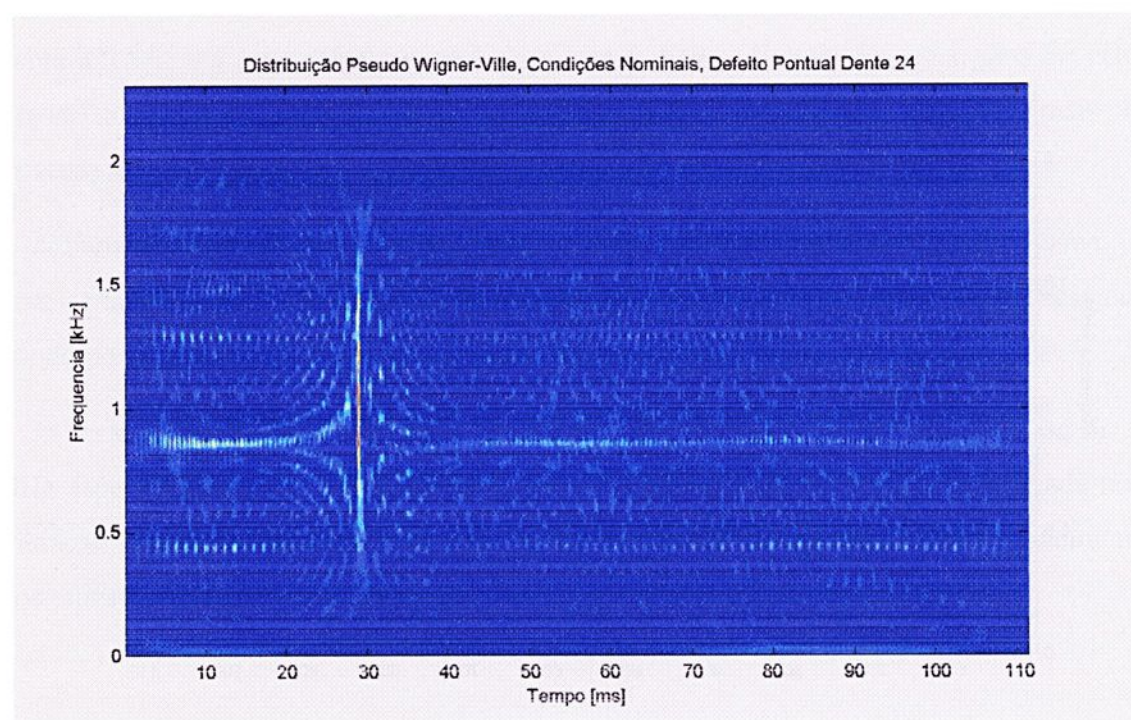


Figura 4.46 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito pontual no dente número 24

4.10 CONCLUSÕES GERAIS SOBRE AS TÉCNICAS USUAIS SOB CONDIÇÕES CONSTANTES DE POTÊNCIA

A análise realizada teve como principal objetivo verificar a resposta das técnicas usuais de monitoramento, na detecção de uma excentricidade no eixo da coroa, acompanhamento da evolução dessa excentricidade e a detecção de um dano pontual.

Deve ficar claro que o fato de uma técnica possuir “capacidade” não significa obrigatoriamente que esta conseguirá detectar o aparecimento ou a evolução dos defeitos estudados. Um exemplo claro desse fenômeno ocorre com a análise espectral clássica, na qual verificou-se que essa ferramenta tem uma ótima “capacidade” de detecção e evolução da excentricidade, representada pelo aparecimento e aumento das amplitudes das bandas laterais, também apresentou mudanças significativas no caso do dano pontual, em que surgiram diversas componentes espectrais em torno da frequência de engrenamento.

Apesar de possuir “capacidade”, Mcfadden (1985) mostrou que a análise espectral não conseguiu detectar a presença de uma falha pontual em suas análises reais, realizado sobre uma caixa de redução de utilização aeronáutica. Este fato deve-se especialmente, como já foi mencionado, à grande quantidade de linhas espectrais presente em um espectro real de um redutor, as quais quase sempre encobrem as indicações referentes ao dano pontual. Os resultados obtidos tomando-se por base as figuras 4.5 à Figura 4.46 foram agrupados na tabela 5.2.

Tabela 4.3: Conclusões gerais obtidas sobre as análise realizadas.

Técnica de Análise	CONDIÇÕES ANALISADAS		
	Capacidade de Detecção da Excentricidade	Detecção da Evolução da Excentricidade	Capacidade de Detecção de Dano Pontual
TSA	Nenhuma	Nenhuma	Muito Boa
Sinal Residual	Nenhuma	Nenhuma	Muito Boa
Demodulação	Boa	Boa	Muito Boa
Variância	Nenhuma	Nenhuma	Boa
RMS	Indeterminada	Indeterminada	Boa
Skewness	Nenhuma	Nenhuma	Boa
Kurtosis	Nenhuma	Nenhuma	Muito Boa
Crest Factor	Nenhuma	Nenhuma	Muito Boa
Espectro	Excelente	Excelente	Boa
STFT	Boa	Boa	Excelente
Wavelet	Pequena	Pequena	Excelente
Wigner-Ville	Boa	Boa	Excelente
Pseudo Wigner-Ville	Boa	Boa	Excelente





COMPORTAMENTO DAS TÉCNICAS USUAIS DE MONITORAMENTO SOB CONDIÇÕES VARIÁVEIS DE POTÊNCIA

No capítulo 4, foram verificadas as capacidades de diagnóstico e de acompanhamento de falha das principais técnicas de análise de redutores de engrenagens, sob condições constantes de potência. A tabela 4.2 apresenta o nível de capacidade das técnicas estudadas.

Neste capítulo será analisado o comportamento das técnicas que se mostraram mais adequadas em diagnosticar e acompanhar falhas do tipo estudado, quando os sinais a serem analisados forem submetidos à variação de potência.

Para se verificar o comportamento das técnicas classificadas quando submetidas à condição de potência variável, foram gerados sinais conforme apresentados na tabela 5.1.



Tabela 5.1: Sinais e suas condições representativas utilizada nas simulações.

Sinais Característicos	Condições Representativas
Sinal 5	Condições não nominais de operação representada pelo aumento de 25% da demanda de torque, permanecendo a rotação nominal, com a presença de um defeito decorrente de uma excentricidade do eixo que contem a coroa na ordem de 30%.
Sinal 6	Condições não nominais de operação representada pelo aumento de 25% na rotação, permanecendo o torque nominal, com a presença de um defeito decorrente de uma excentricidade do eixo que contem a coroa na ordem de 30%.
Sinal 7	Condições não nominais de operação representada pelo aumento de 25% da demanda de torque, permanecendo a rotação nominal, com a presença de um defeito pontual, decorrente de uma grande trinca no dente número 25.
Sinal 8	Condições não nominais de operação representada pelo aumento de 25% na rotação, permanecendo o torque constante, com a presença de um defeito pontual, decorrente de uma grande trinca no dente número 25.

A análise realizada sobre este quatro tipos de sinais, apresentados nas Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4, tem como objetivo verificar a influência causada pela variação tanto do torque quanto da rotação, no diagnóstico dos dois tipos de defeitos estudados, excentricidade da coroa e uma falha pontual.

Serão estudadas apenas as técnicas que apresentaram bons resultados segundo estudo do capítulo anterior. Os parâmetros utilizados na simulação dos sinais, foram os mesmos utilizados para a geração dos sinais 1,2,3 e 4, utilizados no item capítulo 4.

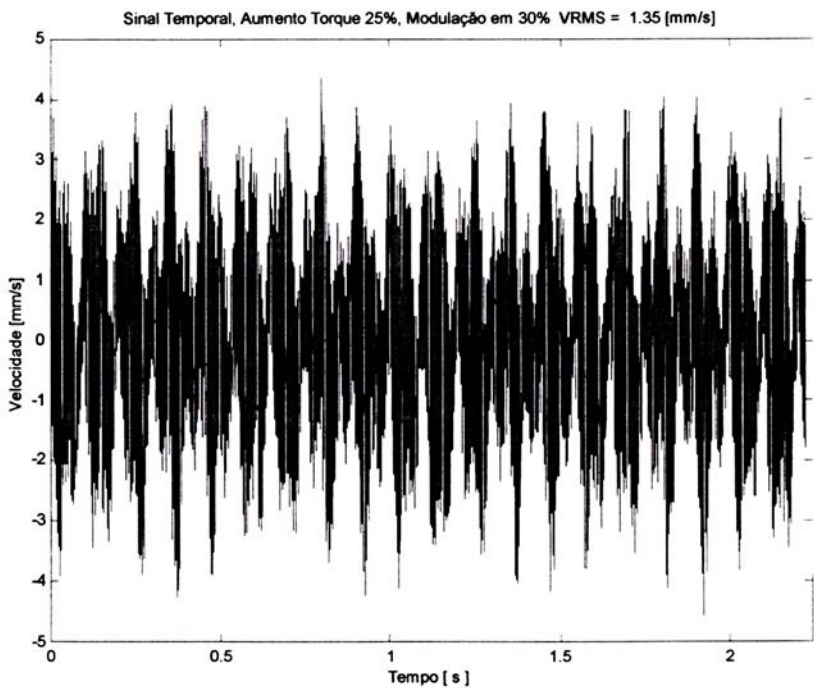


Figura 5.1 - Sinal 5: representação temporal, contendo 20 giros da coroa em condições não nominais, representada pelo aumento de torque em 25%, com defeito modulador em 30%.

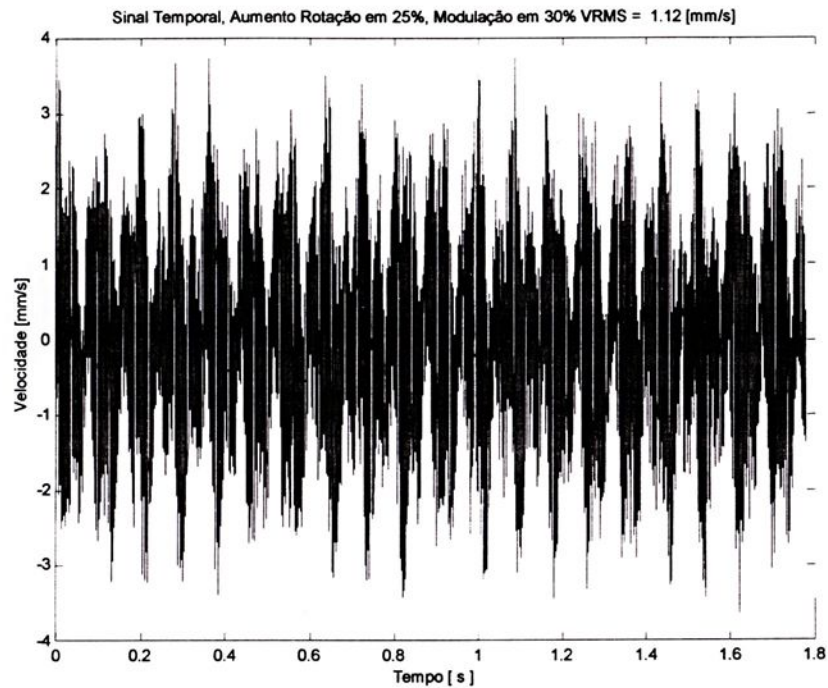


Figura 5.2 - Sinal 6: representação temporal, contendo 20 giros da coroa em condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito modulador em 30%.

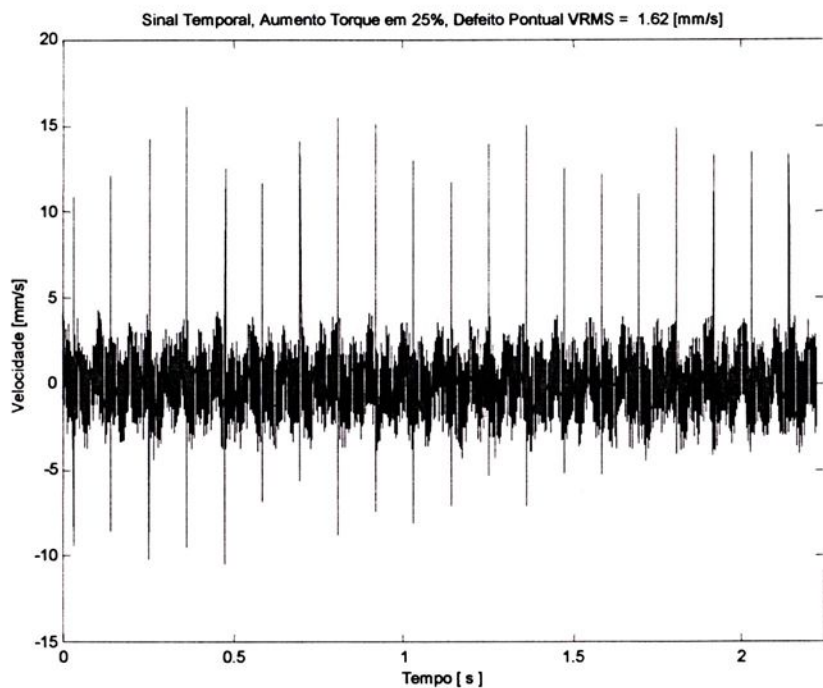


Figura 5.3 - Sinal 7: representação temporal, contendo 20 giros da coroa em condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito pontual.

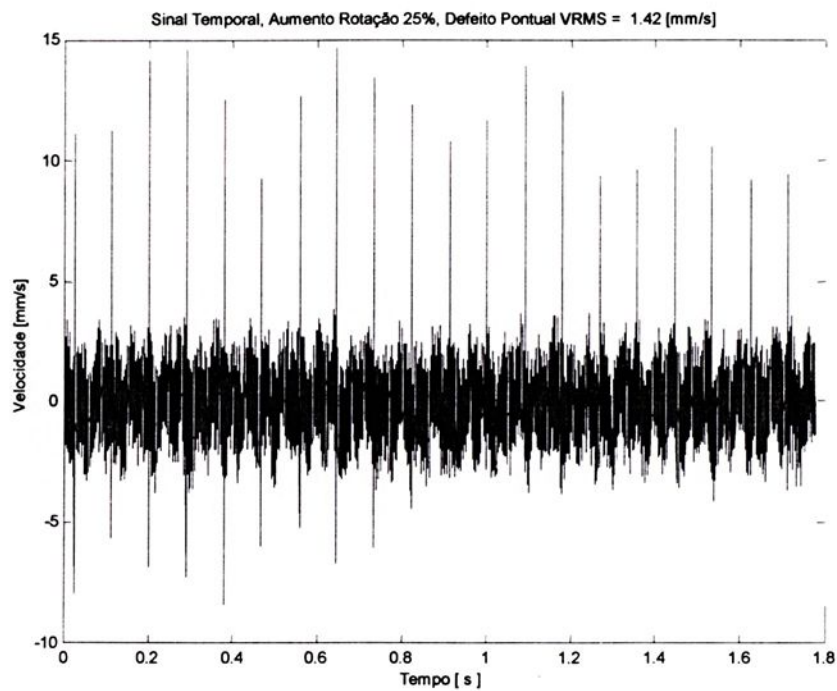


Figura 5.4 - Sinal 8: representação temporal, contendo 20 giros da coroa em condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito pontual

Nos itens a seguir, serão apresentados os resultados obtidos de cada uma das técnicas usuais de análise da mesma maneira utilizada para a condição de potência constante, os subitens 5.1, 5.2 e 5.5, apresentam os resultados obtidos da aplicação das técnicas da média temporal síncrona, sinal residual e análise espectral clássica respectivamente, sobre os sinais temporais representados pelas figuras Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4. Já nos subitens, 5.3, 5.4, 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9, relativos a demodulação temporal, análise estatística, STFT, transformada Wavelet, distribuição Wigner-Ville e da distribuição Pseudo Wigner-Ville, respectivamente, apresentam os resultados obtidos a partir da aplicação dessas técnicas aos sinais previamente processados pela média temporal síncrona (TSA).

5.1 MÉDIA TEMPORAL SÍNCRONA

A) Defeito Pontual

Observando as figuras, Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7, verifica-se que a TSA é influenciada tanto pelo torque quanto pela rotação.

Quando houve a variação da demanda de torque, notou-se claramente um aumento generalizado da amplitude do sinal, inclusive do pico indicativo do defeito pontual, que passou da ordem de 8 mm/s para 10 mm/s.

Já a variação de rotação, mostrou-se menos influente do que o torque, mas alterou também as características do sinal.

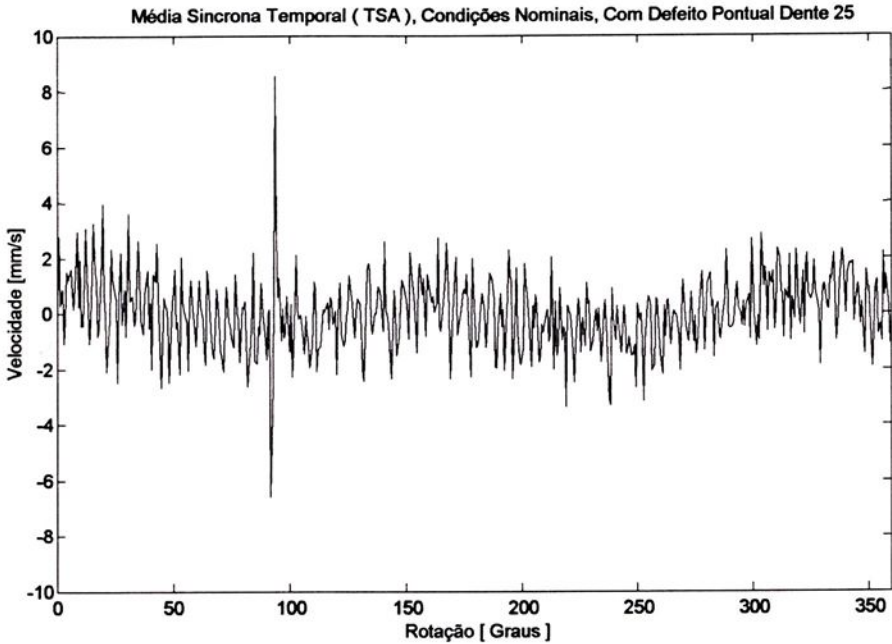


Figura 5.5 - Média temporal síncrona do sinal 1, condições nominais de operação, com defeito pontual no dente 25.

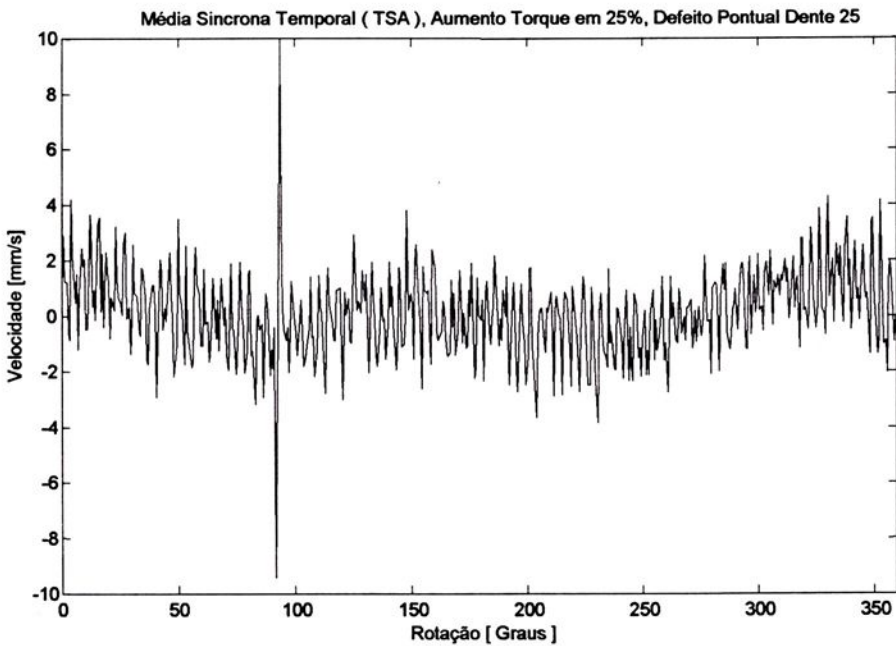


Figura 5.6 - Média temporal síncrona do sinal 7, condições não nominais de operação, com aumento de 25% na demanda de torque e defeito pontual no dente 25.

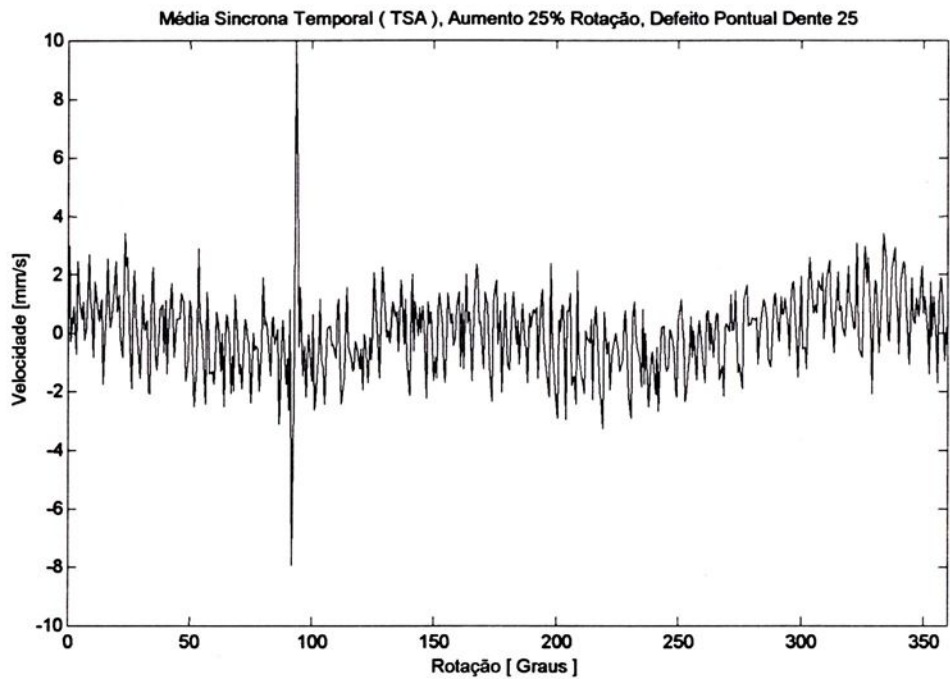


Figura 5.7 - Média temporal síncrona do sinal 8, condições não nominais de operação, com aumento de 25% na rotação e defeito pontual no dente 25.

5.2 SINAL RESIDUAL

A) Defeito Pontual

Observando as figuras, Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10, verifica-se que sinal residual é influenciado tanto pelo torque quanto pela rotação.

Quando ocorre variação na demanda de torque, nota-se claramente um aumento generalizado da amplitude do sinal, inclusive do pico indicativo do defeito pontual, que passou da ordem de 8 mm/s para 10 mm/s.

Já a variação de rotação, mostrou-se bem menos influente do que o torque, mas alterou também as características do sinal.

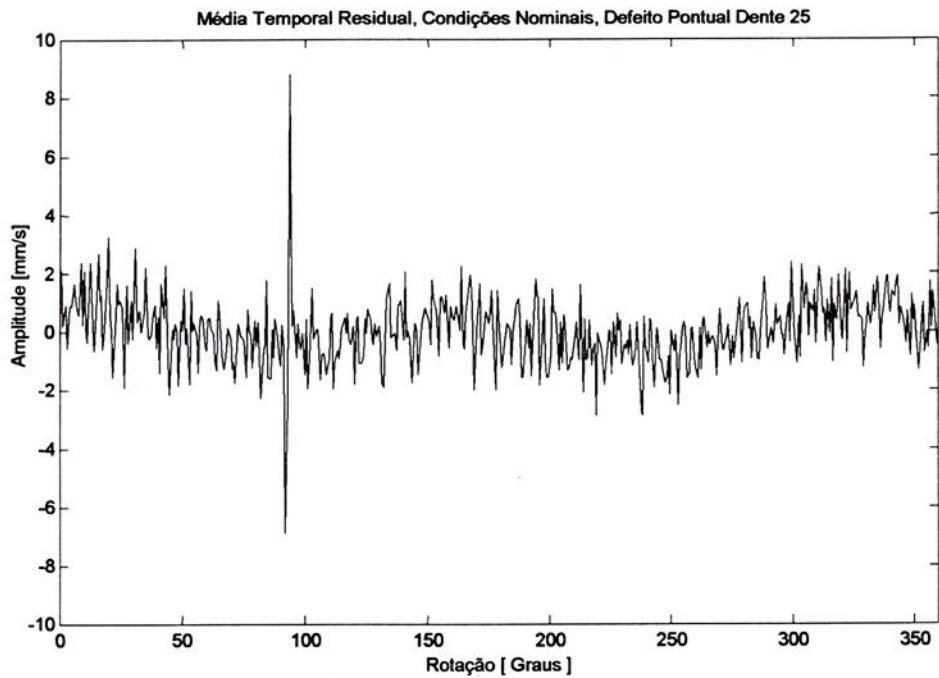


Figura 5.8 – Sinal residual temporal do sinal 1, condições nominais de operação, com defeito pontual no dente 25.

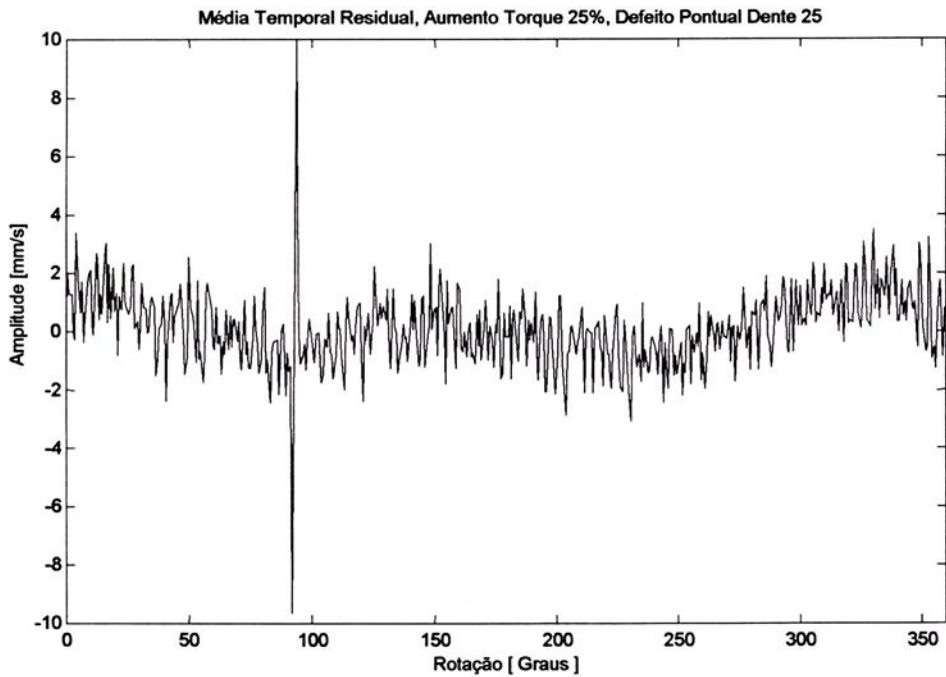


Figura 5.9 - Sinal residual temporal do sinal 7, condições não nominais de operação, com aumento de 25% na demanda de torque e defeito pontual no dente 25.

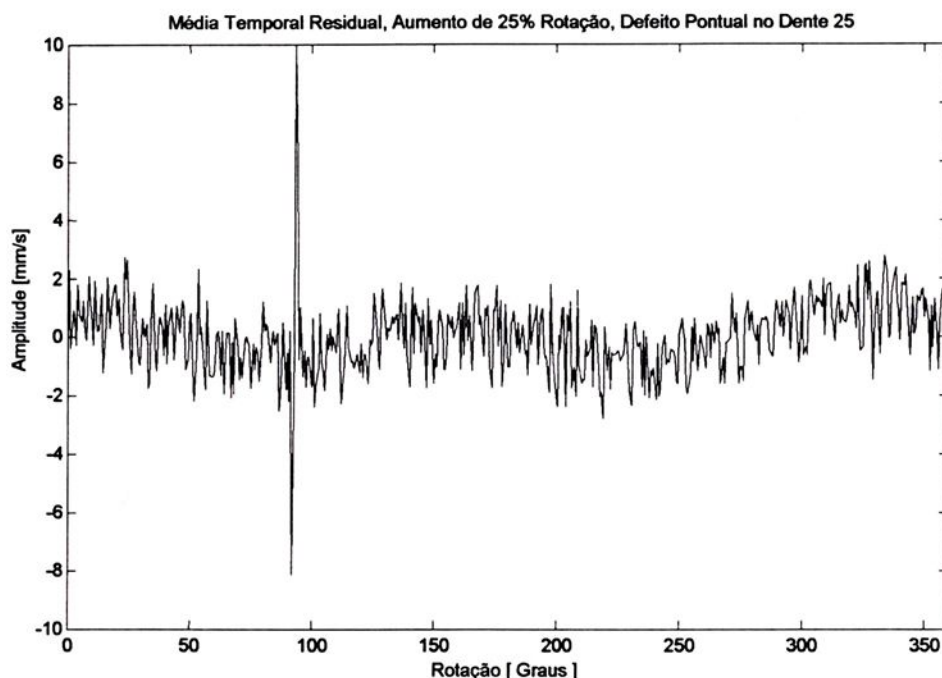


Figura 5.10 – Sinal residual temporal do sinal 8, condições não nominais de operação, com aumento de 25% na rotação e defeito pontual no dente 25.

5.3 DEMODULAÇÃO TEMPORAL

A) Defeito Devido a Excentricidade

Para esta condição, verifica-se que a análise por demodulação é susceptível a variação de torque, pois pode-se observar, nas Figura 5.11 e Figura 5.12, o aumento da distância do centro à extremidade da órbita, que passou de $d=1,65$ para $d=2$, com o mesmo nível de defeito. Já a rotação não demonstrou influenciar esta técnica para análise deste tipo de defeito, conforme observado nas Figura 5.11 e Figura 5.13.

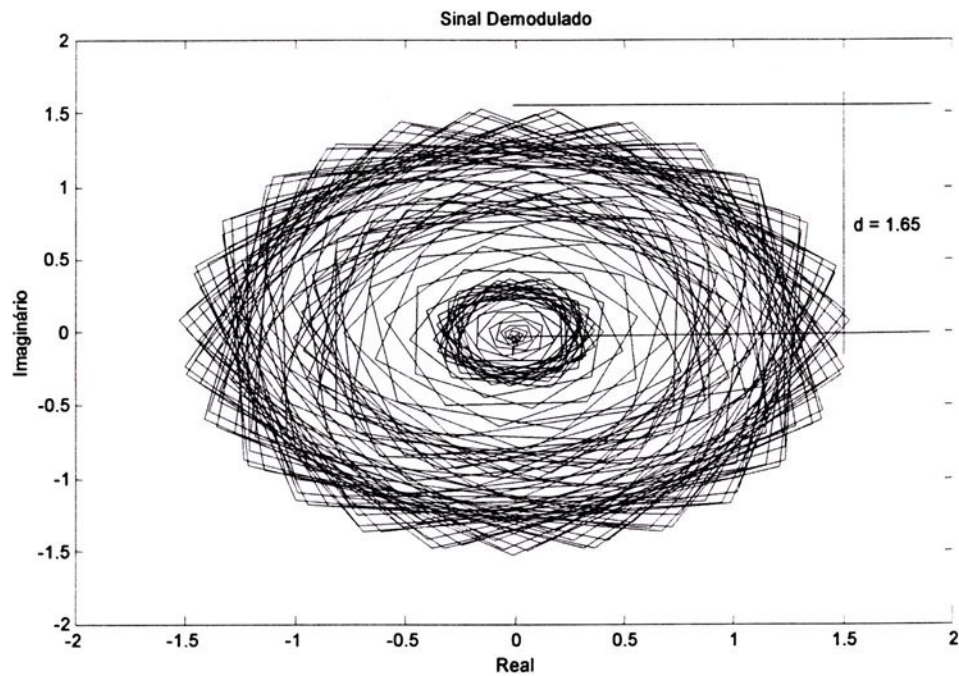


Figura 5.11 - Gráfico do sinal demodulado, condições nominais, com defeito modulador em 30%.

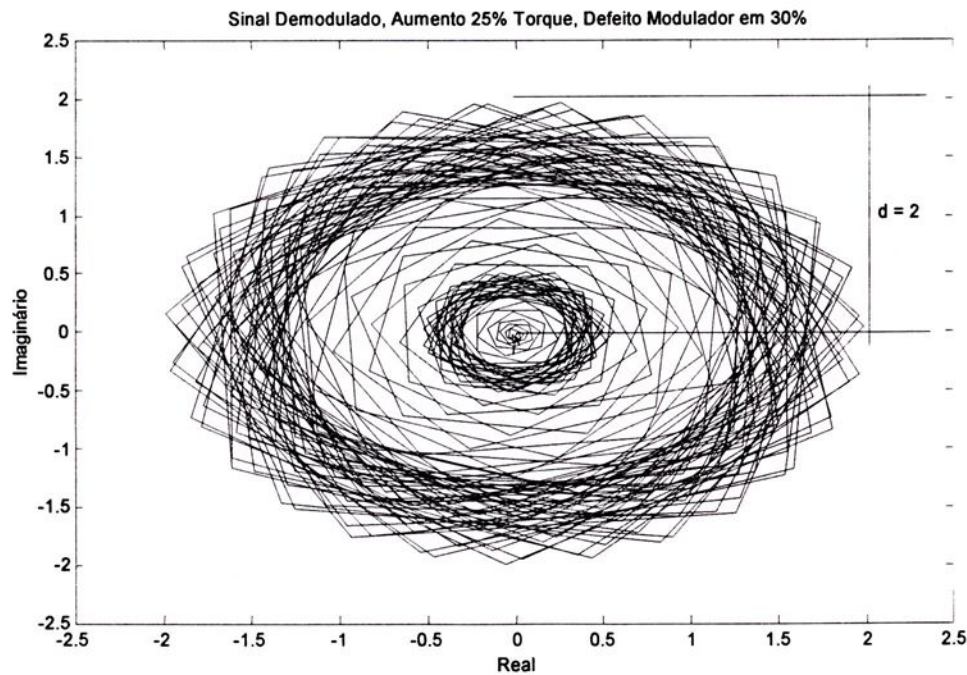


Figura 5.12 - Gráfico do sinal demodulado, condições não nominais, representada pelo aumento na demanda de torque em 25%, com defeito modulador em 30%.

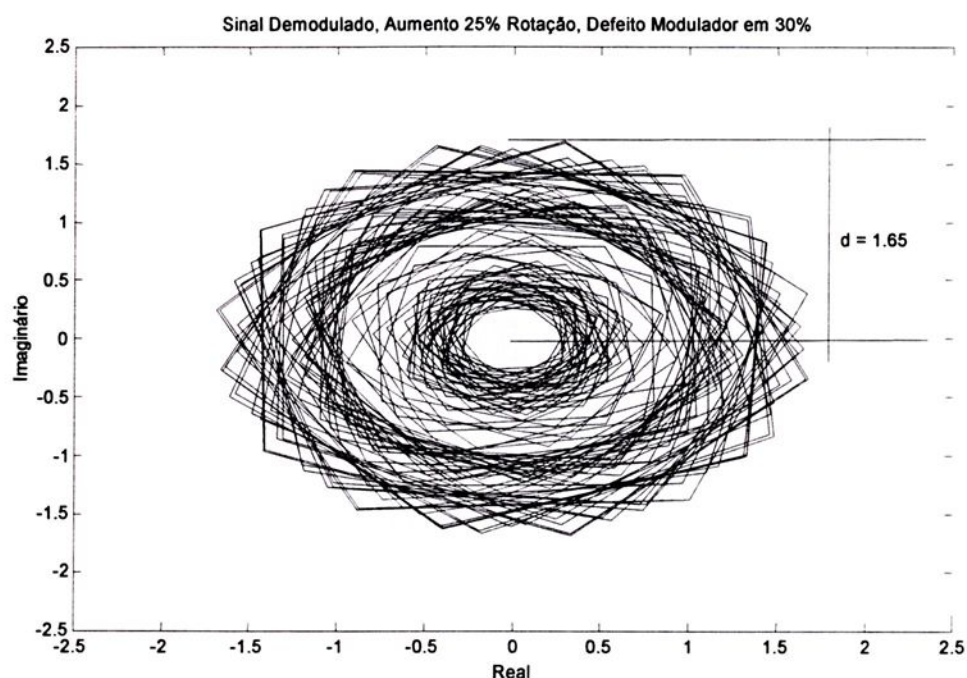


Figura 5.13 - Gráfico do sinal demodulado, condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito modulador em 30%.

B) Defeito Devido a Falha Pontual

Neste caso, tanto o torque como a rotação influenciaram a demodulação, ambos modificaram o gráfico, conforme pode ser visto nas figuras: Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16.

Assim, de uma forma geral, conclui-se que a demodulação é influenciada pela variação de potência.

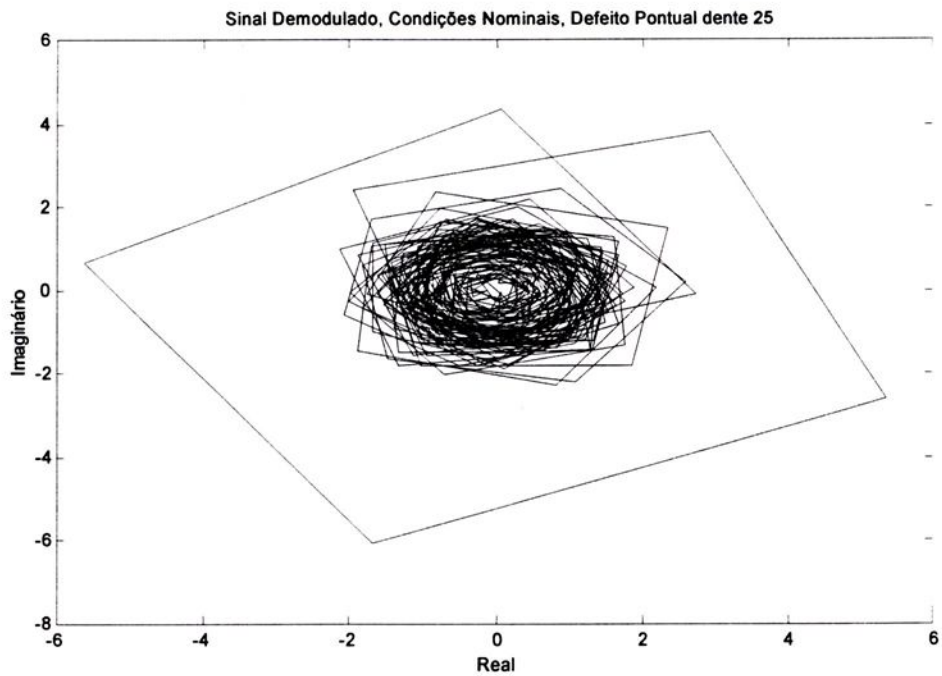


Figura 5.14 - Gráfico do sinal demodulado, condições nominais, com defeito pontual.

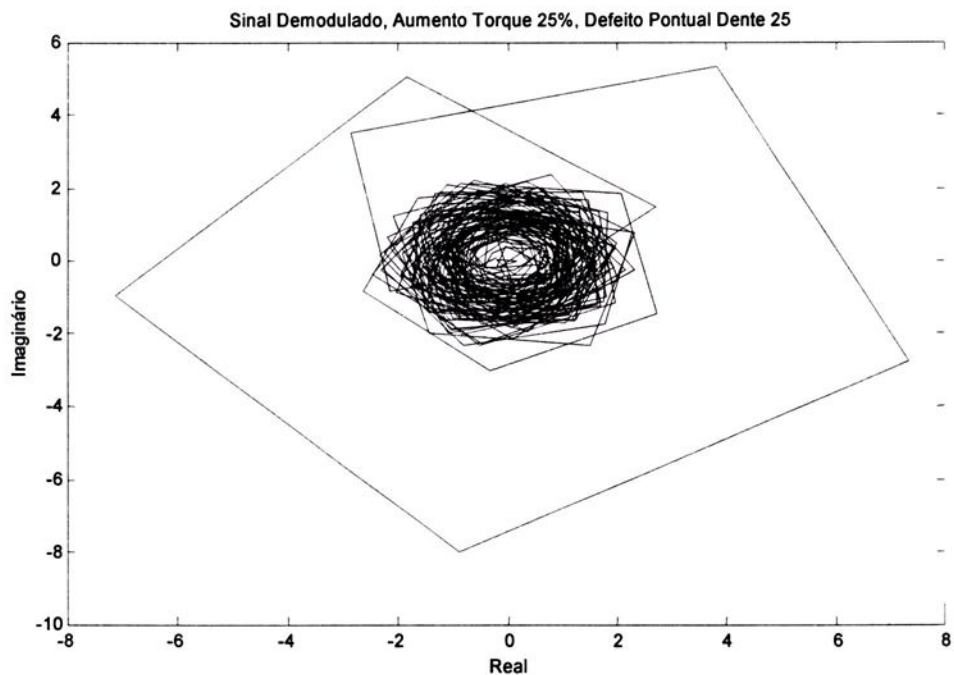


Figura 5.15 - Gráfico do sinal demodulado, condições não nominais, representada pelo aumento na demanda de torque em 25%, com defeito pontual.

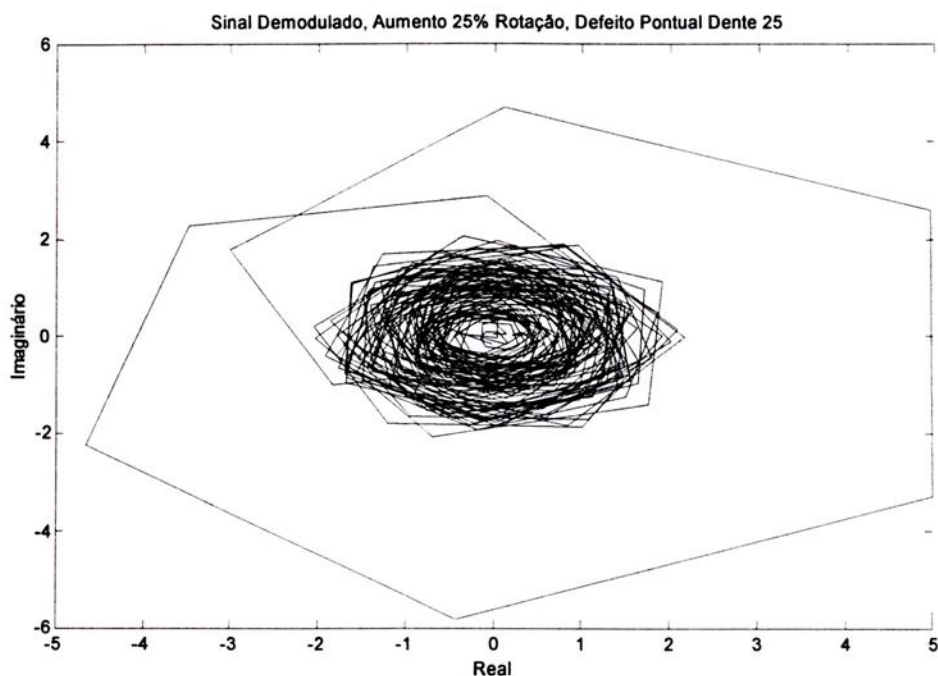


Figura 5.16 - Gráfico do sinal demodulado, condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito pontual.

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

5.4.1 Momento de Segunda Ordem (Variância)

Para a condição de defeito pontual, tanto o torque como a rotação influenciaram o valor do fator variância, conforme pode ser visto na Figura 5.17.

Assim, conclui-se que o segundo momento estatístico é influenciado pela variação de potência.

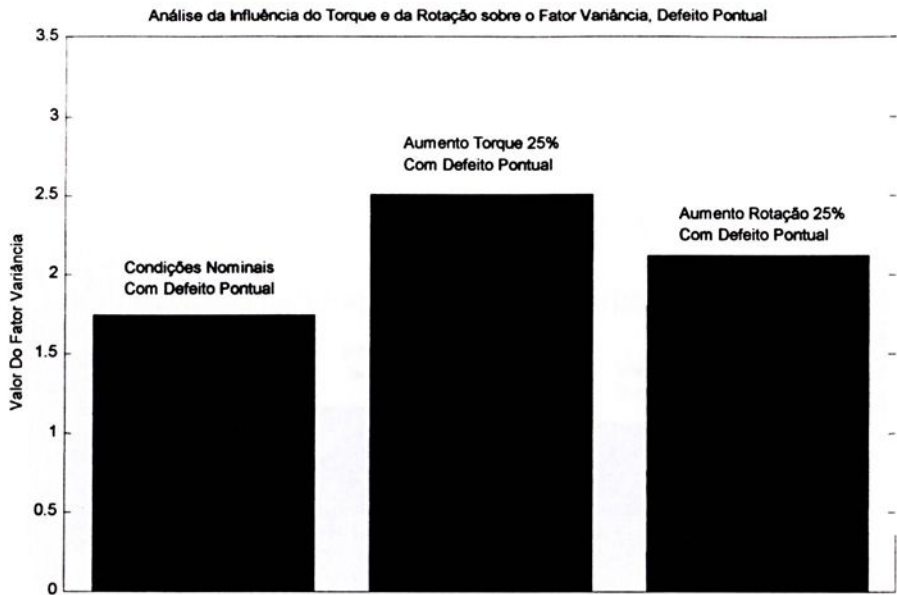


Figura 5.17 - Gráfico comparativo do fator variância, às condições descritas no gráfico, para defeito pontual

5.4.2 Fator Skewness

Para a condição de defeito pontual, observou-se que o aumento do torque praticamente não afetou este fator. No caso da variação de rotação, este comportamento não se manteve, conforme pode ser observado na Figura 5.18.

Assim, conclui-se que o fator Skewness é influenciado pela variação de potência.

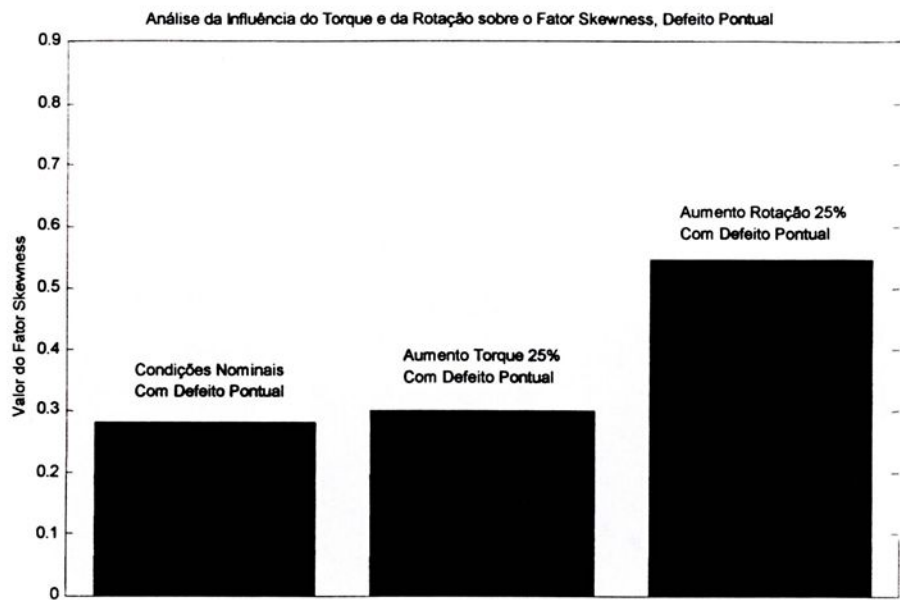


Figura 5.18 - Gráfico comparativo do fator skewness, às condições descrita, para defeito pontual

5.4.3 Fator Kurtosis

Para a condição de defeito pontual, tanto o torque como a rotação influenciaram o valor do fator kurtosis, conforme pode ser visto na Figura 5.19.

Assim, conclui-se que o fator kurtosis é influenciado pela variação de potência.

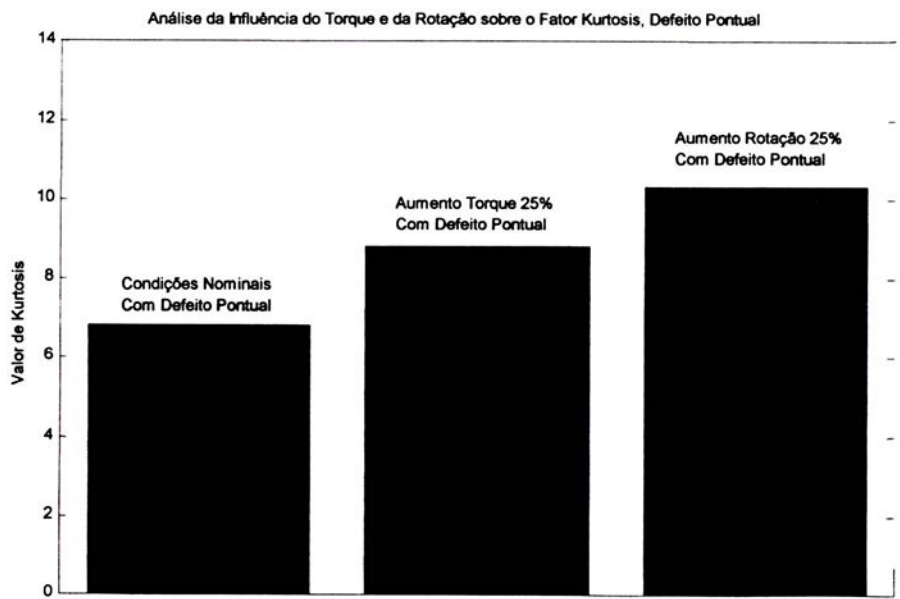


Figura 5.19 - Gráfico comparativo do fator kurtosis as condições descritas, para o defeito pontual

5.4.4 Fator de Crista

Para a condição de defeito pontual, tanto o torque como a rotação influenciaram o valor do fator de Crista, conforme pode ser visto na Figura 5.20. Mas esta influência foi consideravelmente pequena, na ordem de 6% para o torque e 18% para o caso da rotação.

Mesmo que fracamente, conclui-se que o fator de crista é influenciado pela variação de potência.

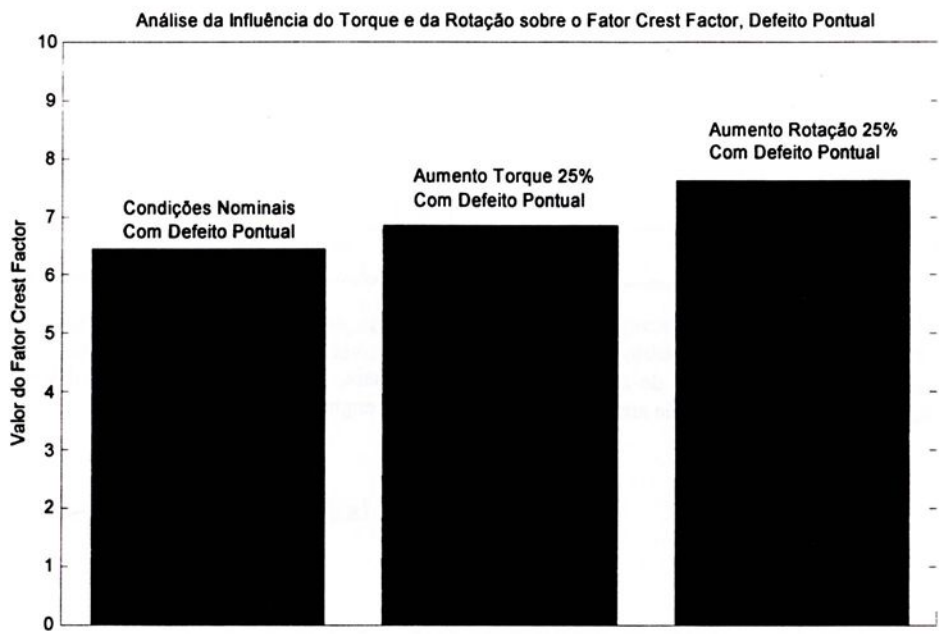


Figura 5.20 - Gráfico comparativo do fator de crista as condições descrita, para o defeito pontual

5.5 ANÁLISE ESPECTRAL CLÁSSICA

A) Defeito Devido a Excentricidade

Para a condição de defeito de excentricidade, verifica-se que a análise espectral demonstrou ser susceptível a variação de torque, pois pode-se observar na Figura 5.22 a variação das amplitudes tanto das bandas laterais quando da própria frequência de engrenamento, para um mesmo nível de defeito. Observou-se, no entanto, que a relação entre as amplitudes permaneceu constante. O mesmo ocorre na variação de rotação, pois as linhas espectrais acompanharam o aumento da rotação, Figura 5.23.

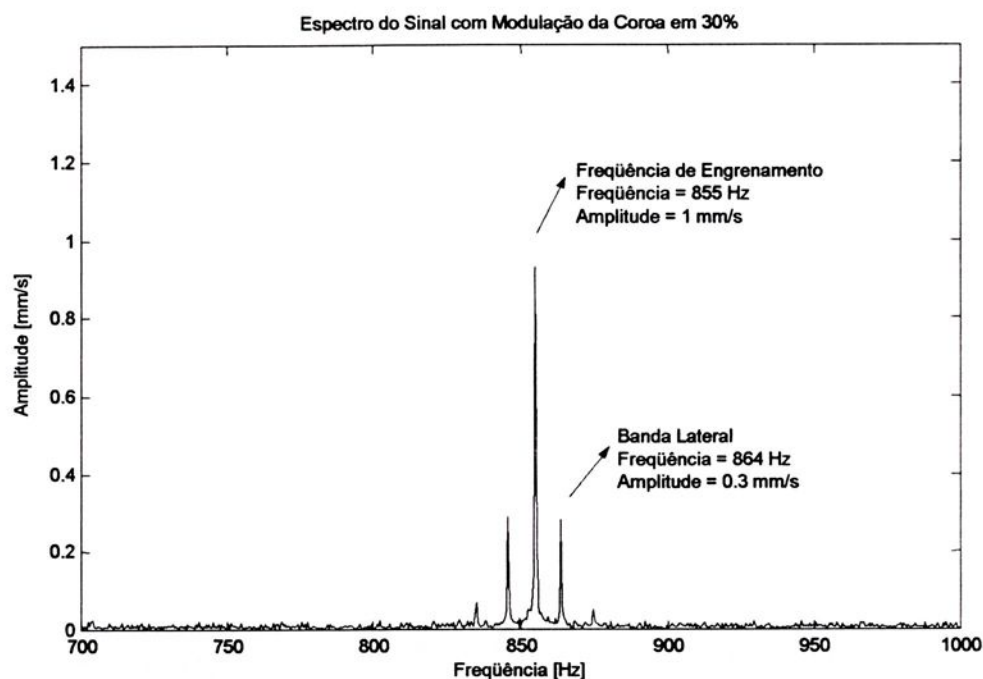


Figura 5.21 - Zoom espectral na região de análise, condições nominais, nota-se a amplitude das banda laterais, devido a excentricidade na ordem de 30% da amplitude da frequência de engrenamento.

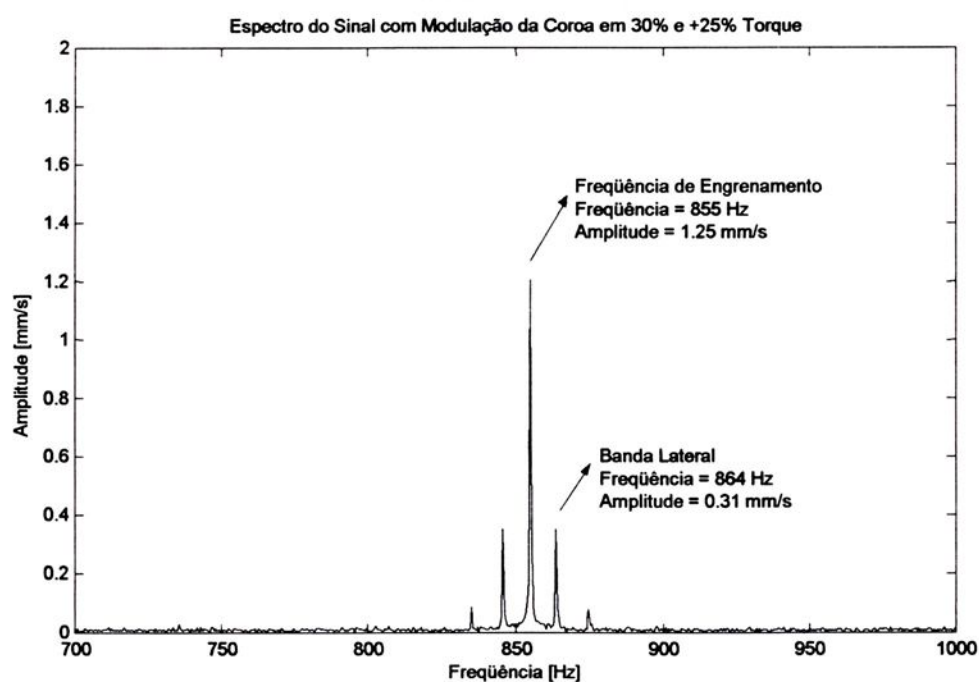


Figura 5.22 - Zoom espectral na região de análise, condições não nominais, representada pelo aumento na demanda de torque de 25%, nota-se a amplitude das banda laterais, devido a excentricidade na ordem de 30% da amplitude da frequência de engrenamento.

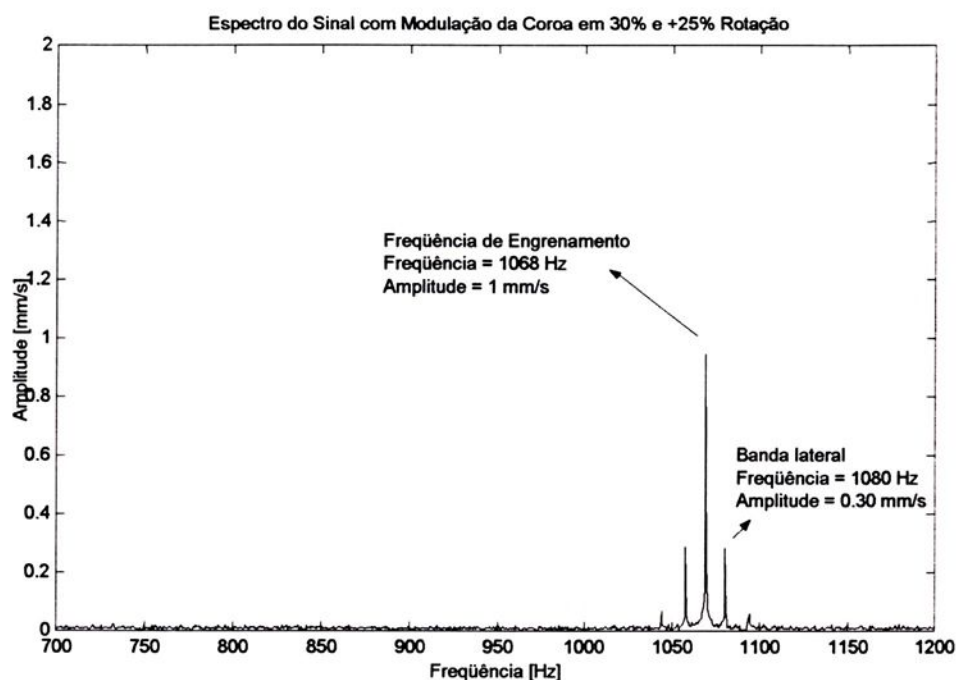


Figura 5.23 - Zoom espectral na região de análise, condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, nota-se a amplitude das banda laterais, devido a excentricidade na ordem de 30% da amplitude da frequência de engrenamento.

B) Defeito Devido a Falha Pontual

Neste caso, tanto o torque como a rotação influenciaram na aparência do espectro, pode-se notar o aumento do valor do amplo conjunto de linhas espectrais em torno da frequência de engrenamento, no caso do aumento da rotação, observou-se a variação do espaçamento entre essas mesmas linhas espectrais, conforme pode ser visto nas figuras: Figura 5.24, Figura 5.25 e Figura 5.26.

Assim, conclui-se que o espectro é influenciado pela variação de potência.

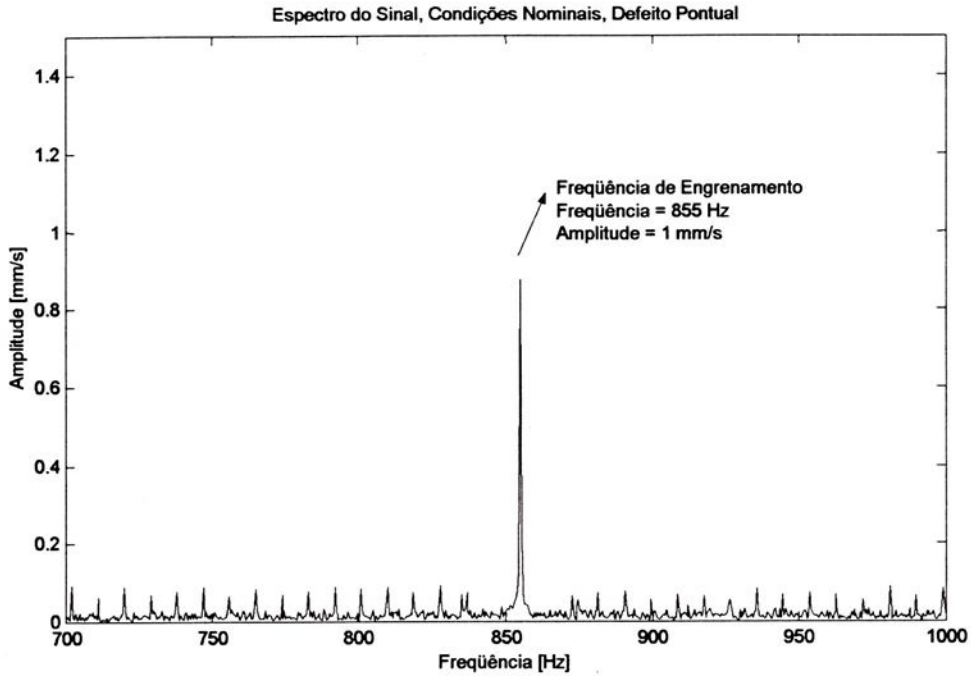


Figura 5.24 - Zoom espectral na região de análise, condições nominais, com um defeito pontual .

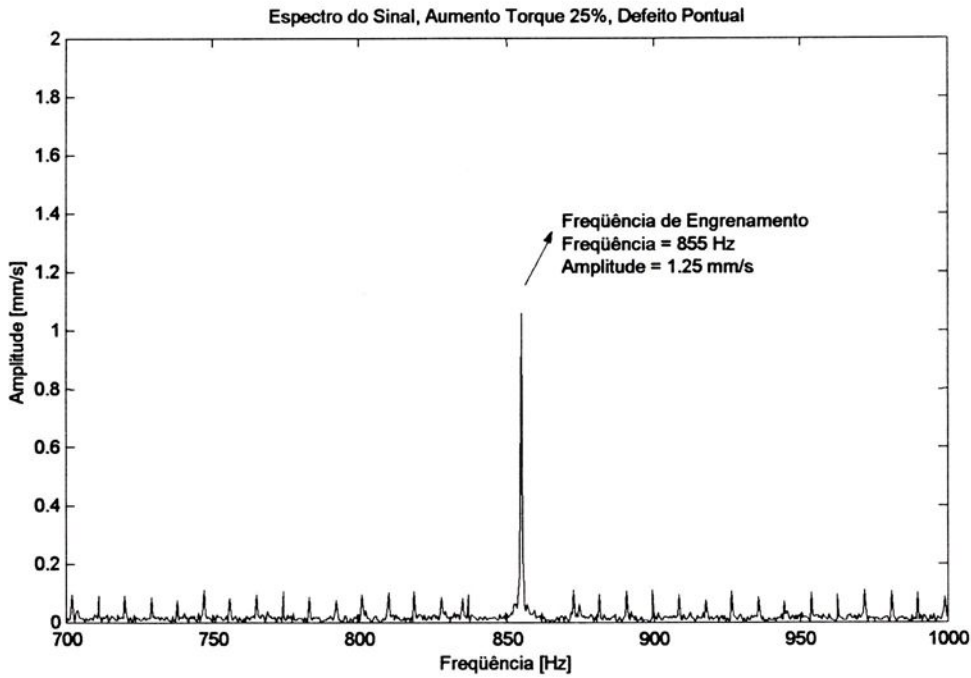


Figura 5.25 - Zoom espectral na região de análise, condições não nominais, representada pelo aumento da demanda de torque em 25%, com um defeito pontual .

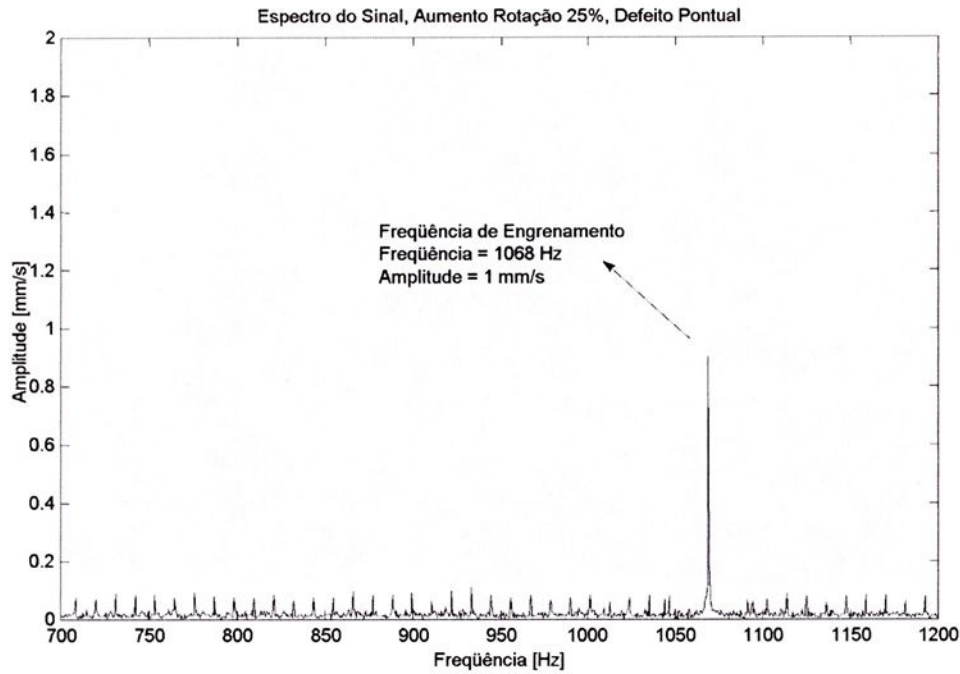


Figura 5.26 - Zoom espectral na região de análise, condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com um defeito pontual.

5.6 TRANSFORMADA CURTA DE FOURIER (STFT)

A) Defeito Devido a Excentricidade

Para esta condição de defeito a análise realizada através da STFT demonstrou ser susceptível a variação de torque, pois pode-se observar na Figura 5.28 em relação à Figura 5.27, a variação da coloração na faixa referente a frequência de engrenamento, 855Hz, para um mesmo nível de defeito. O mesmo ocorre na variação de rotação, pois as duas principais informações contidas neste gráfico, frequência de engrenamento e seu primeiro harmônico mudaram de posição e de coloração, acompanhando assim o aumento da rotação, Figura 5.29.

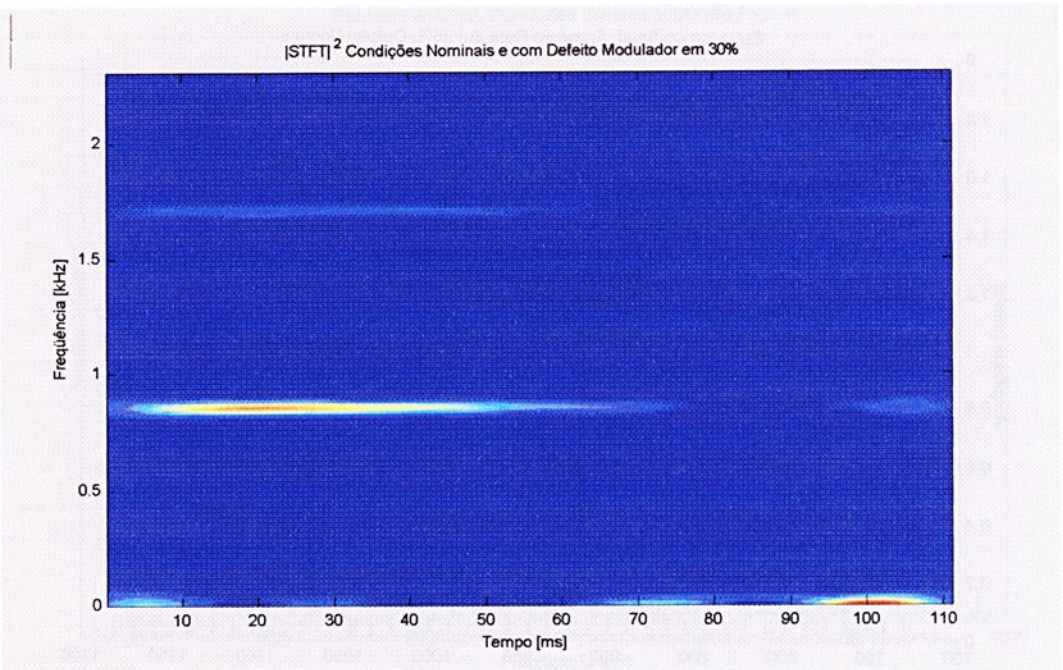


Figura 5.27 - Transformada Curta de Fourier (STFT), para as condições nominais, com defeito modulador em 30%.

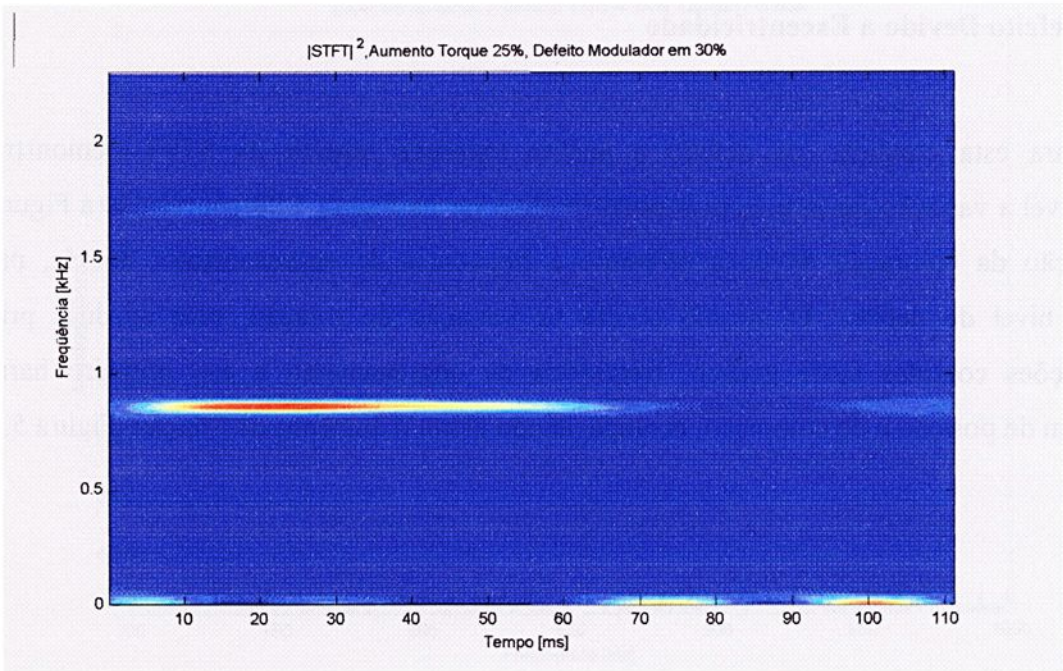


Figura 5.28 - Transformada Curta de Fourier (STFT), para condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito modulador em 30%.

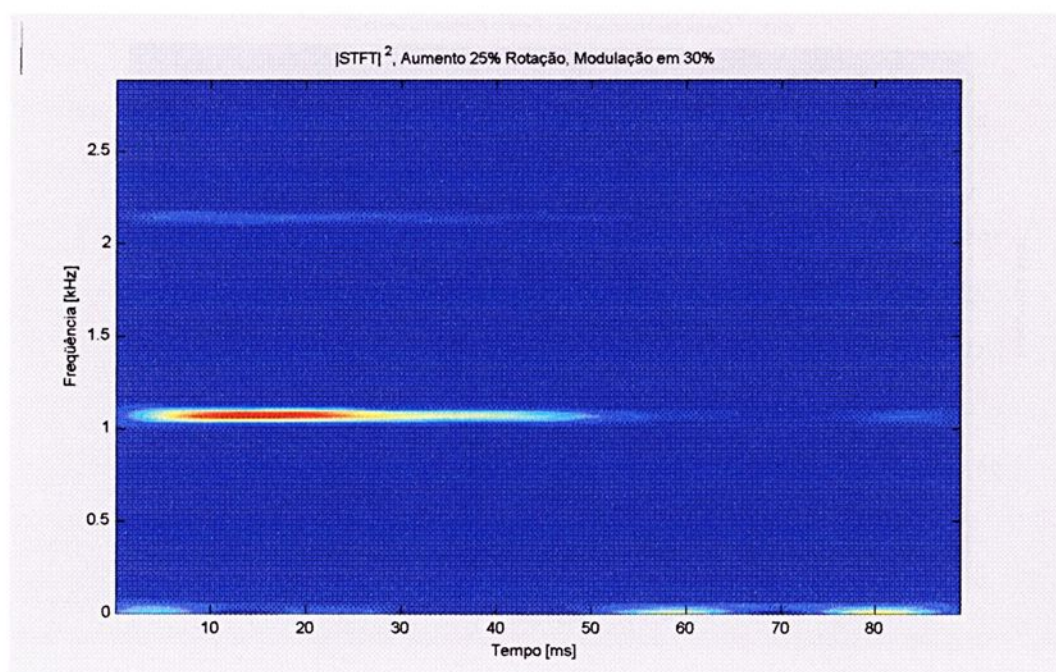


Figura 5.29 - Transformada Curta de Fourier (STFT), para condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito modulador em 30%.

B) Defeito Devido a Falha Pontual

No caso do dano pontual, tanto o torque como a rotação influenciaram na aparência do gráfico, essa modificação se apresenta na variação da coloração, conforme pode ser visto na Figura 5.31 e na Figura 5.32.

Assim, conclui-se que a STFT é influenciada pela variação de potência.

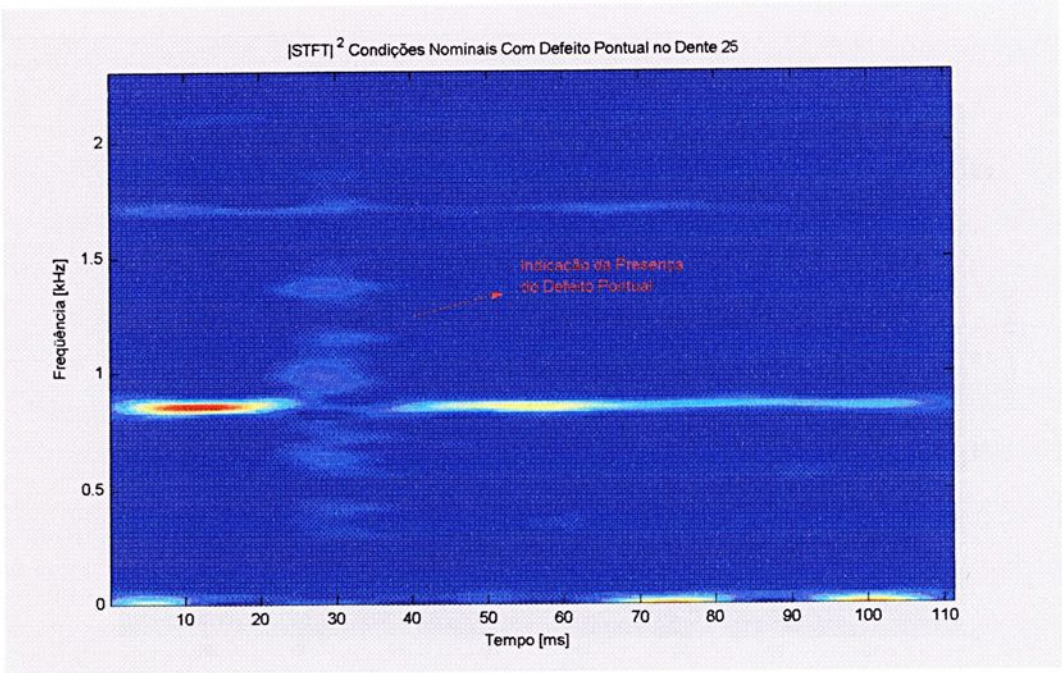


Figura 5.30 - Transformada Curta de Fourier (STFT), condições nominais, com defeito pontual.

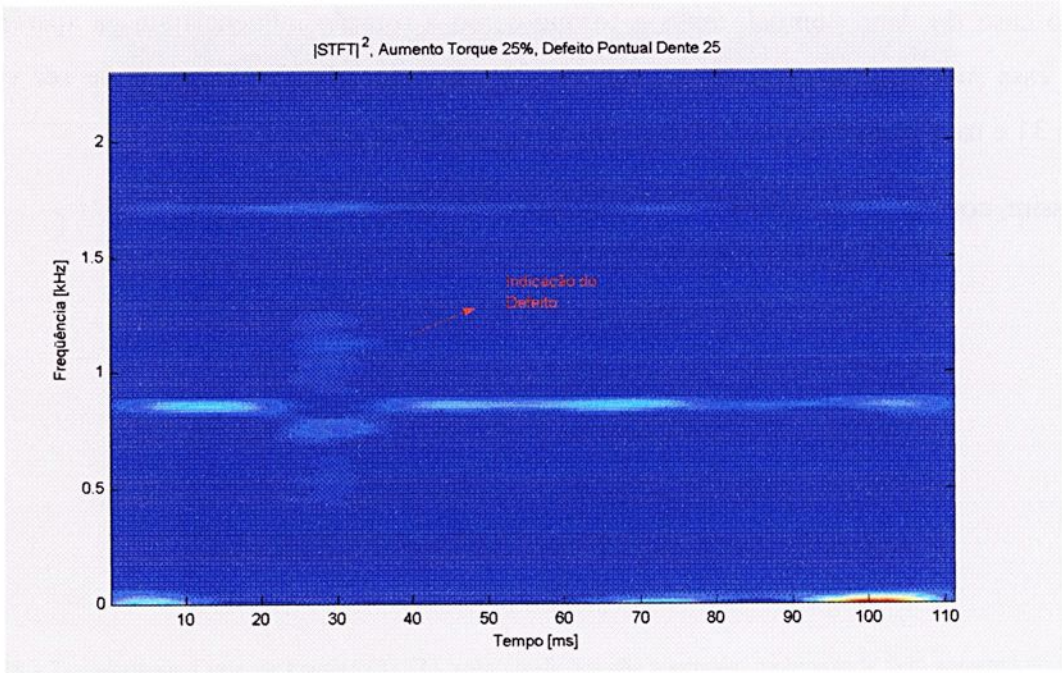


Figura 5.31 - Transformada Curta de Fourier (STFT), condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito pontual.

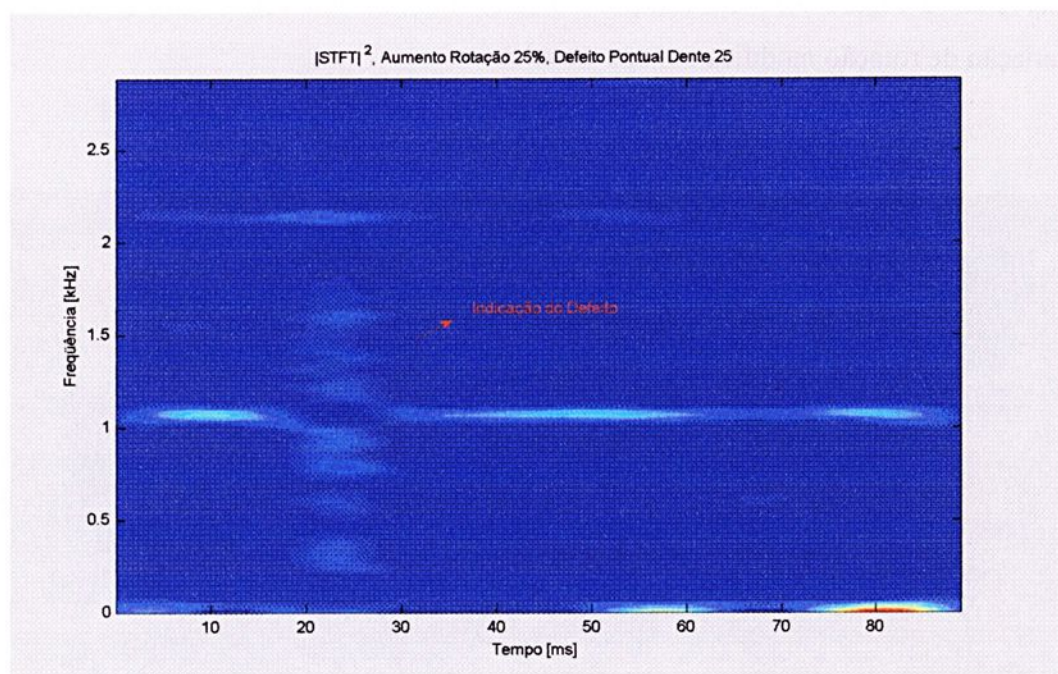


Figura 5.32 - Transformada Curta de Fourier (STFT), condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito pontual.

5.7 TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA

A) Defeito Devido a Excentricidade

A transformada Wavelet, como já foi visto, diferencia-se da STFT por apresentar o sinal no domínio tempo-escala e não no domínio tempo frequência. A intensidade da resposta obtida pela transformada Wavelet é demonstrada através de uma escala de cores, onde quanto mais quente a cor maior é a intensidade do sinal neste local.

Observando a Figura 5.33, representativa das condições normais e com defeito modulador em 30%, pode-se notar a presença dominante da frequência de giro do eixo de saída, entre as escalas de 130 a 200 demonstradas como círculos de coloração amarela, estendendo se durante todo o intervalo de tempo. Não apresentando nenhuma outra frequência dominante.

Quando variou-se a intensidade do torque, pode-se observar a variação na coloração da frequência dominante, apresentando cores mais vivas, o que demonstra a influencia deste no mapa wavelet, conforme pode ser visto na Figura 5.34. No caso da variação da rotação pode se

notar observando a Figura 5.35 em relação a Figura 5.33, modificações no aspecto do mapa, assim a variação de rotação modifica o mapa wavelet.

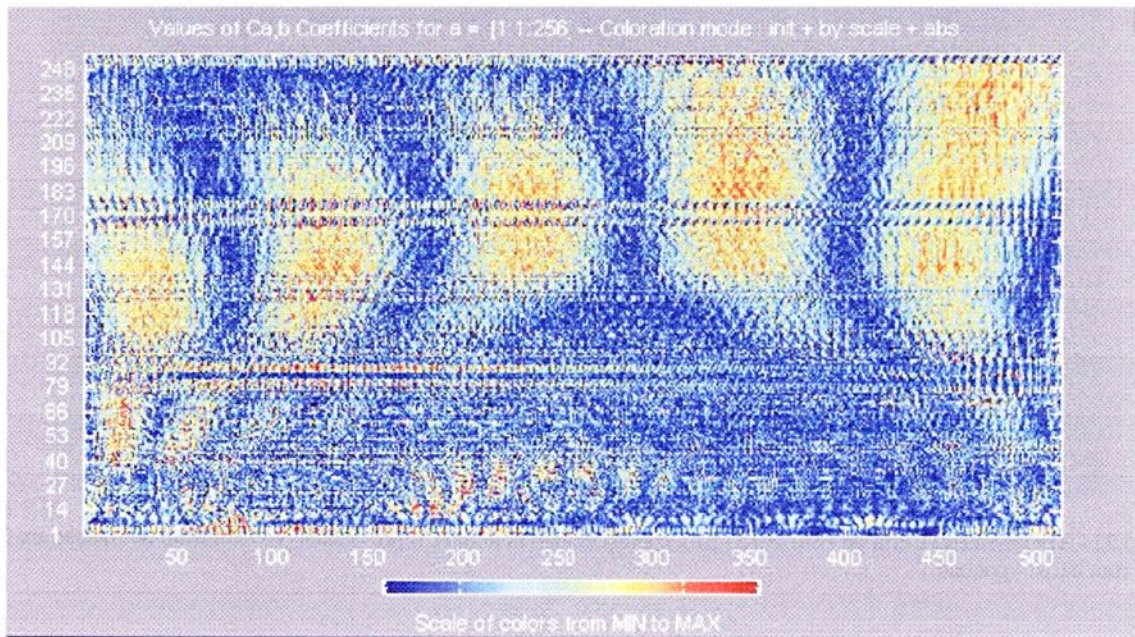


Figura 5.33 - Transformada Wavelet contínua, para as condições nominais, com defeito modulador em 30%.

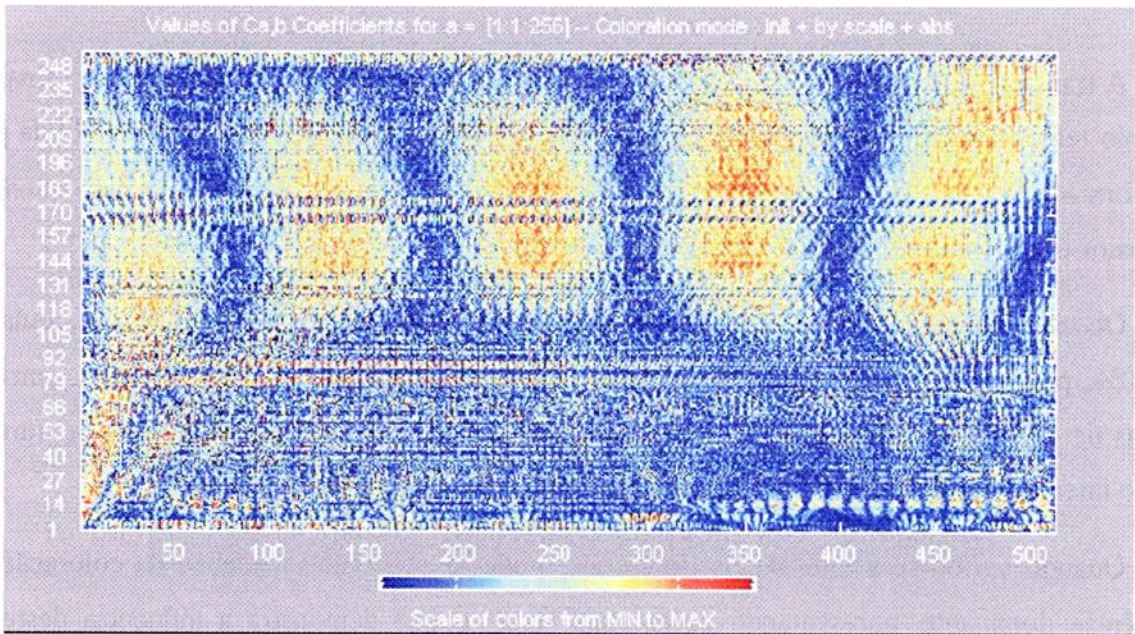


Figura 5.34 - Transformada Wavelet contínua, condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito modulador em 30%.

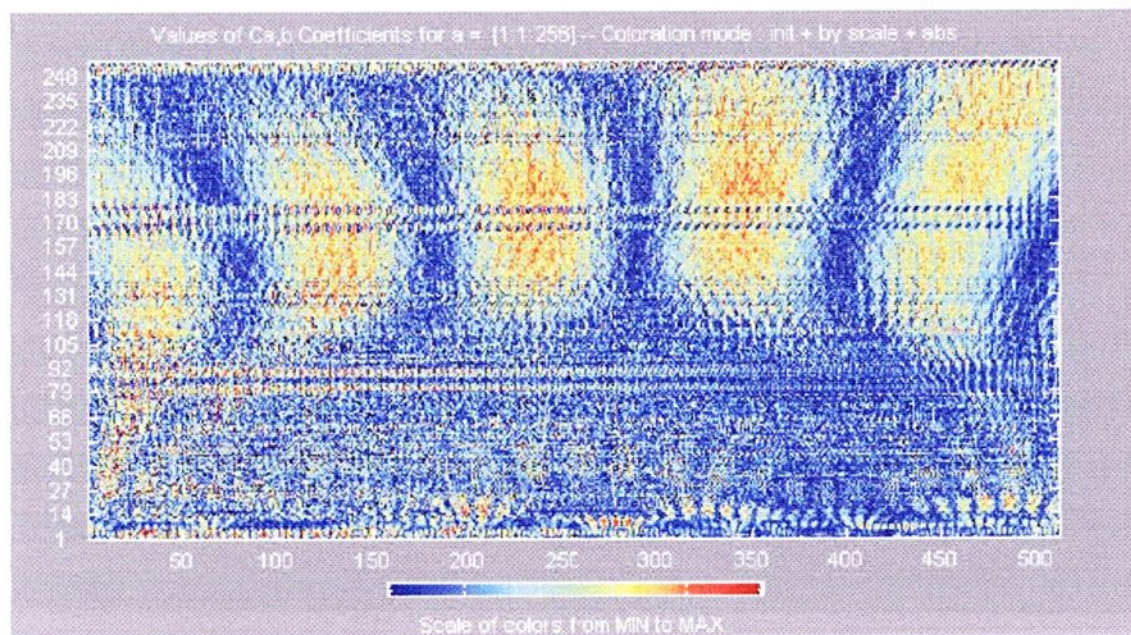


Figura 5.35 - Transformada Wavelet contínua, para condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito modulador em 30%.

B) Defeito Devido ao Dano Pontual

No caso da Figura 5.36, nota-se que a faixa de coloração avermelhada originando-se nas baixas escalas, conseqüentemente altas frequências estendendo-se por todas as escalas, o que caracteriza uma mudança localizada no sinal de vibração, indicando assim a indicação de falha alterou-se com a variação tanto do torque quanto da rotação, como pode ser visto nas figuras Figura 5.37 e Figura 5.38. Portanto, a transformada de wavelet contínua baseada na wavelet Morlet e influenciada pela variação de potência.

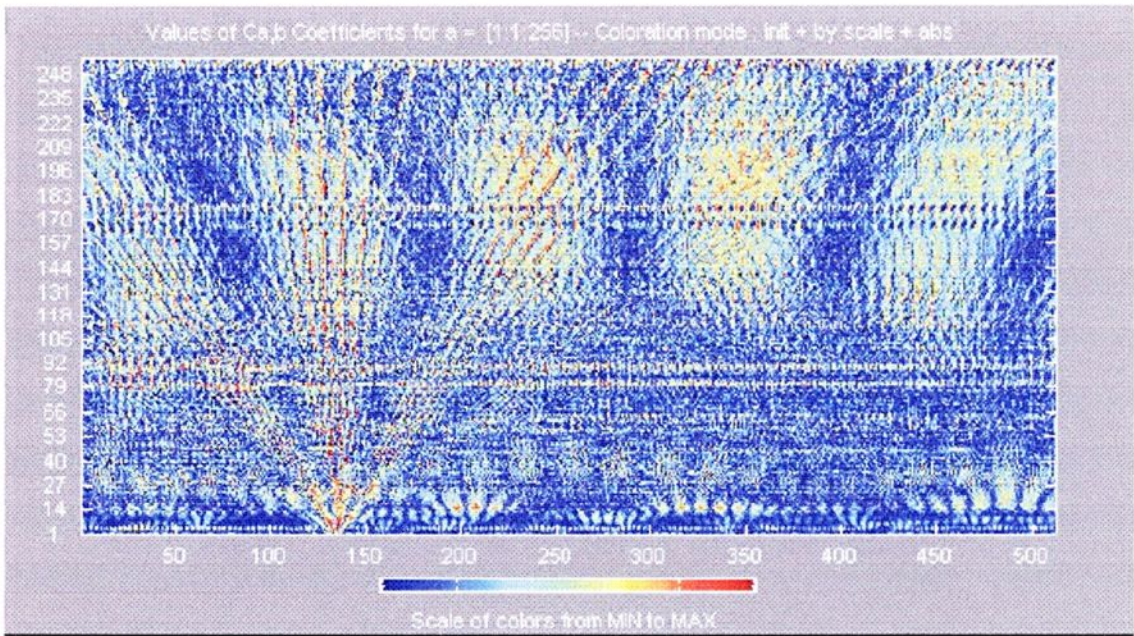


Figura 5.36 - Transformada Wavelet contínua, para as condições nominais, com defeito pontual no dente 25.

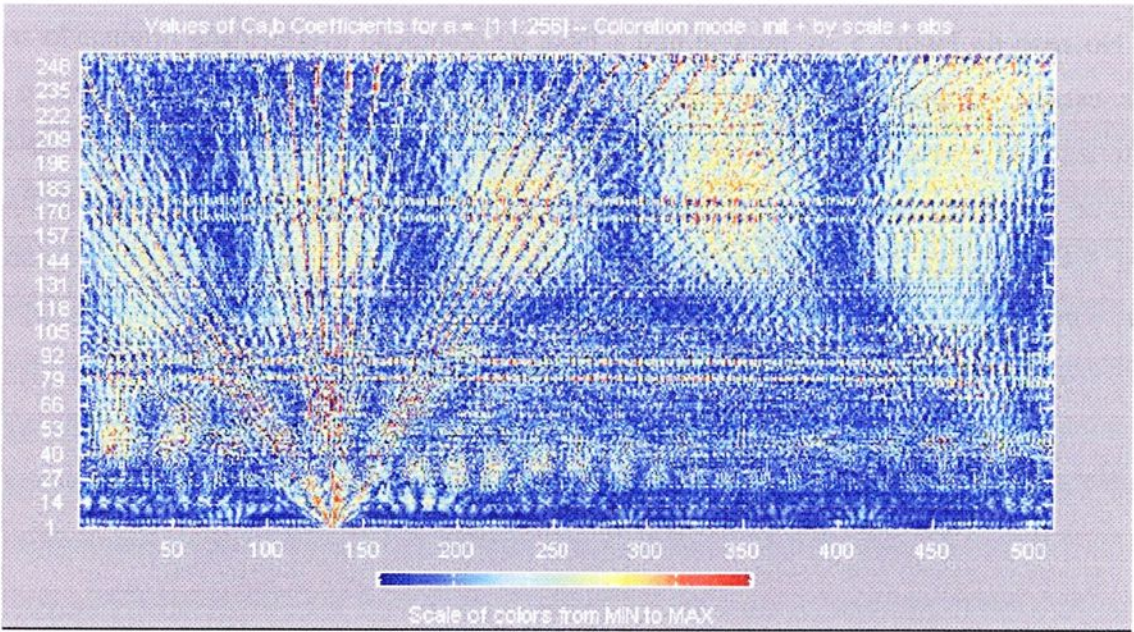


Figura 5.37 - Transformada Wavelet contínua, para condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito pontual no dente 25.

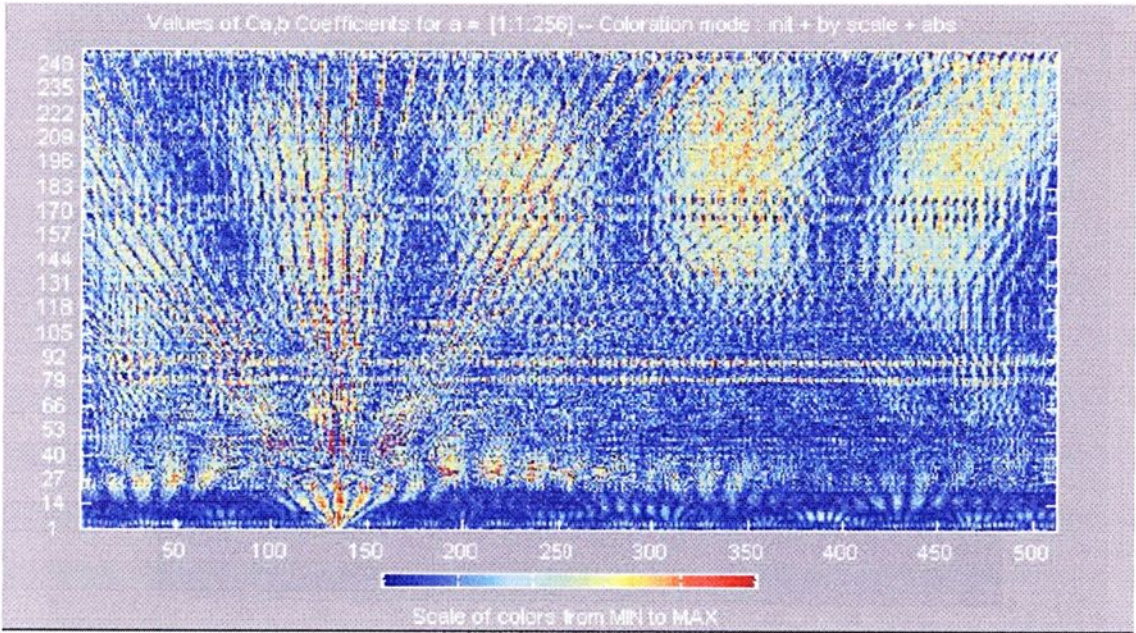


Figura 5.38 - Transformada Wavelet contínua, condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito pontual no dente 25.

5.8 DISTRIBUIÇÃO DE WIGNER-VILLE

A) Defeito Devido a Excentricidade

Para esta condição, a análise visual realizada nos mapas obtidos através da distribuição Wigner-Ville, não apresentaram mudanças significativas, mesmo ocorrendo variações tanto de torque quanto de potência, para um mesmo nível de defeito, como pode ser visto nas figuras: Figura 5.39, Figura 5.40 e Figura 5.41.

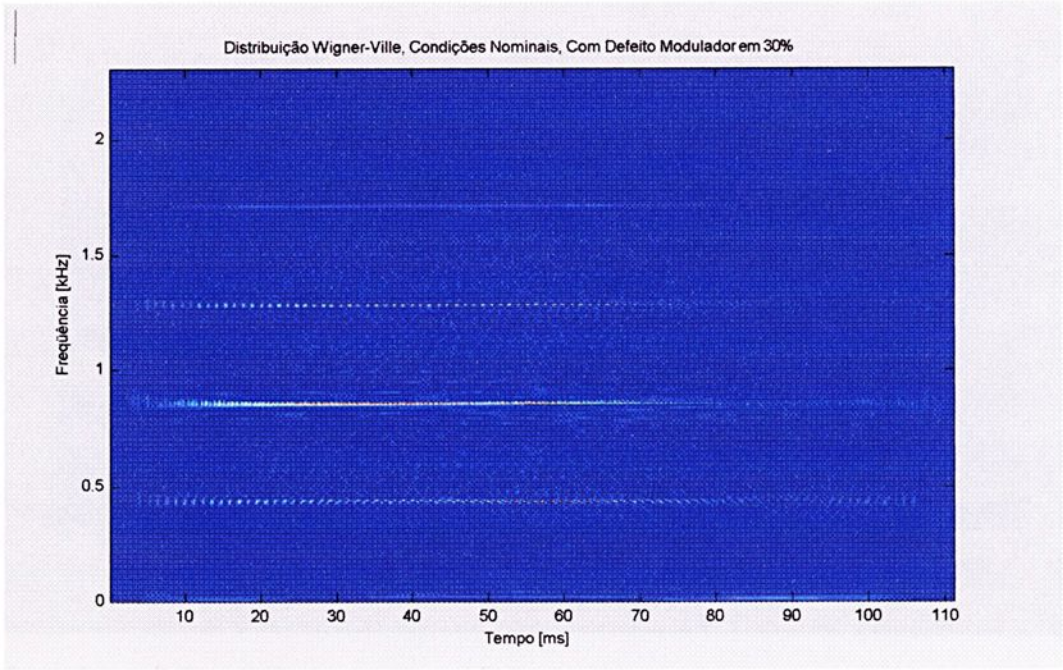


Figura 5.39 - Distribuição Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito modulador em 30%.

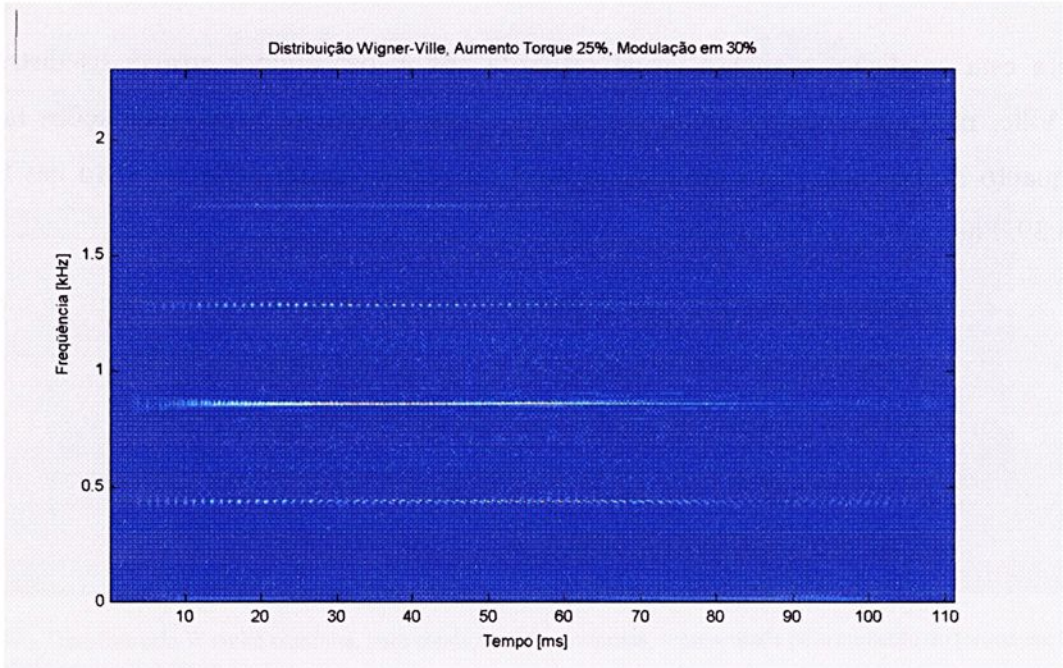


Figura 5.40 - Distribuição Wigner-Ville, para condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito modulador em 30%.

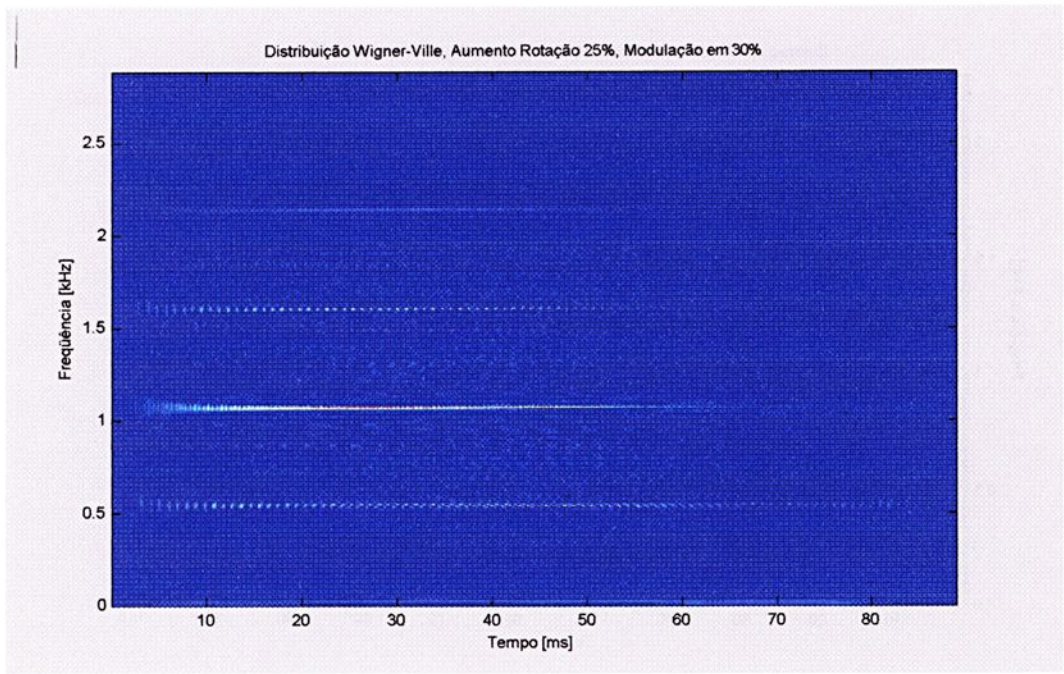


Figura 5.41 - Distribuição Wigner-Ville, para condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito modulador em 30%.

B) Defeito Devido ao Dano Pontual

Neste caso, ocorreu o mesmo comportamento verificado para o dano devido a excentricidade, ou seja, visualmente não foi possível observar mudanças significativas no gráfico mesmo ocorrendo variações, tanto de torque quanto de potência, para um mesmo nível de defeito, conforme pode ser visto nas figuras: Figura 5.42, Figura 5.43 e Figura 5.44.

Assim, conclui-se que a distribuição Wigner Ville aparentemente não é ou é pouco influenciada pela variação de potência, mas não se pode afirmar que isto seja válido para qualquer tipo de defeito.

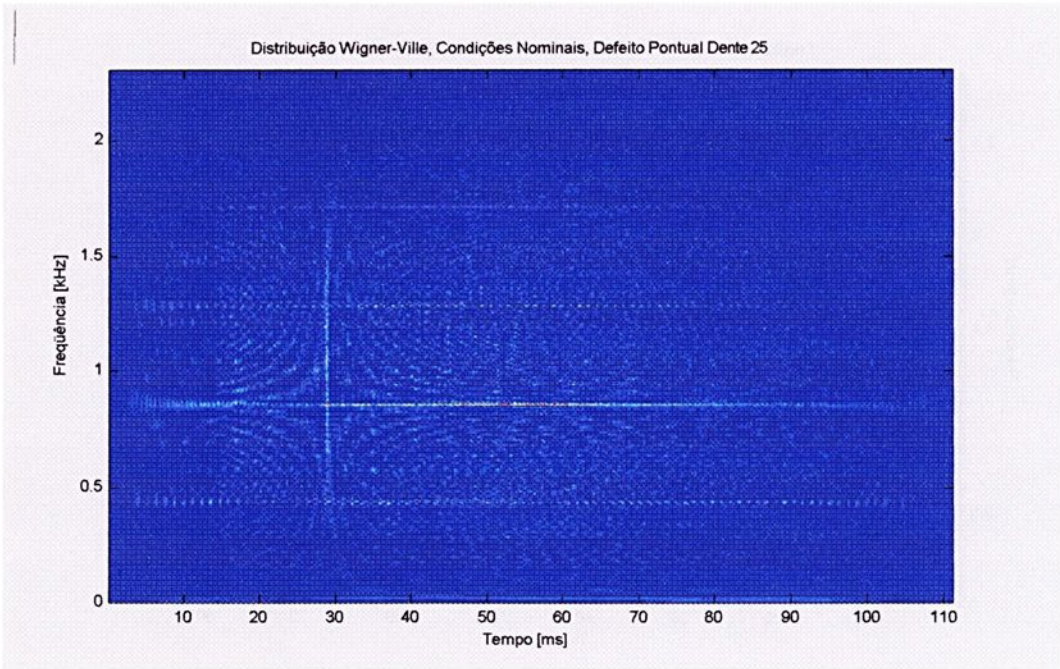


Figura 5.42 - Distribuição Wigner-Ville, condições nominais, com defeito pontual no dente 25.

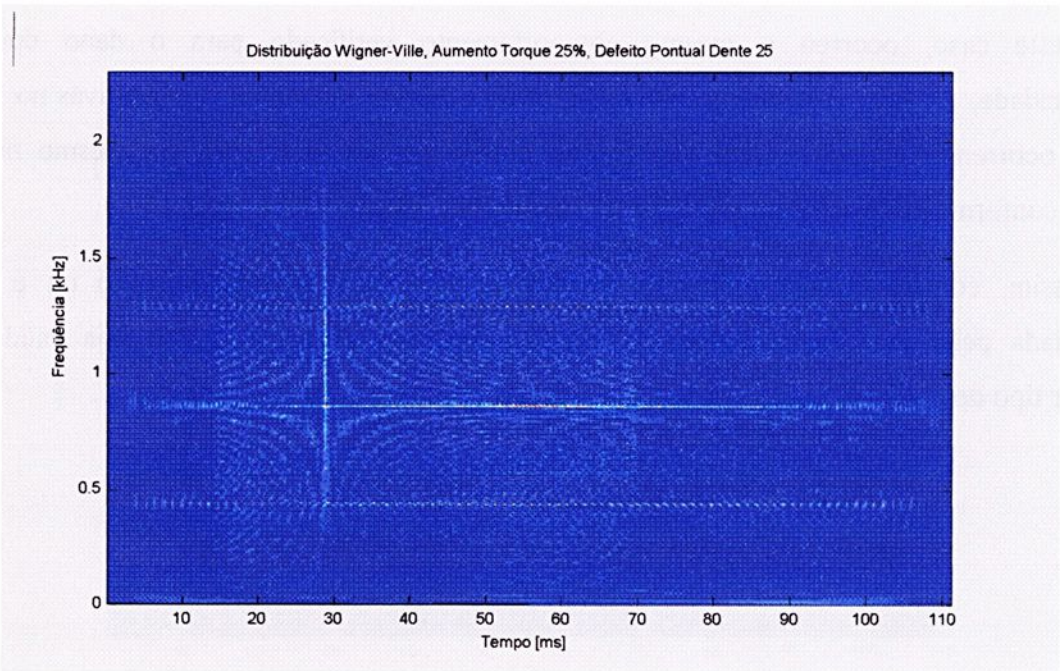


Figura 5.43 - Distribuição Wigner-Ville, condições não nominais, representado pelo aumento do torque em 25%. com defeito pontual no dente 25.

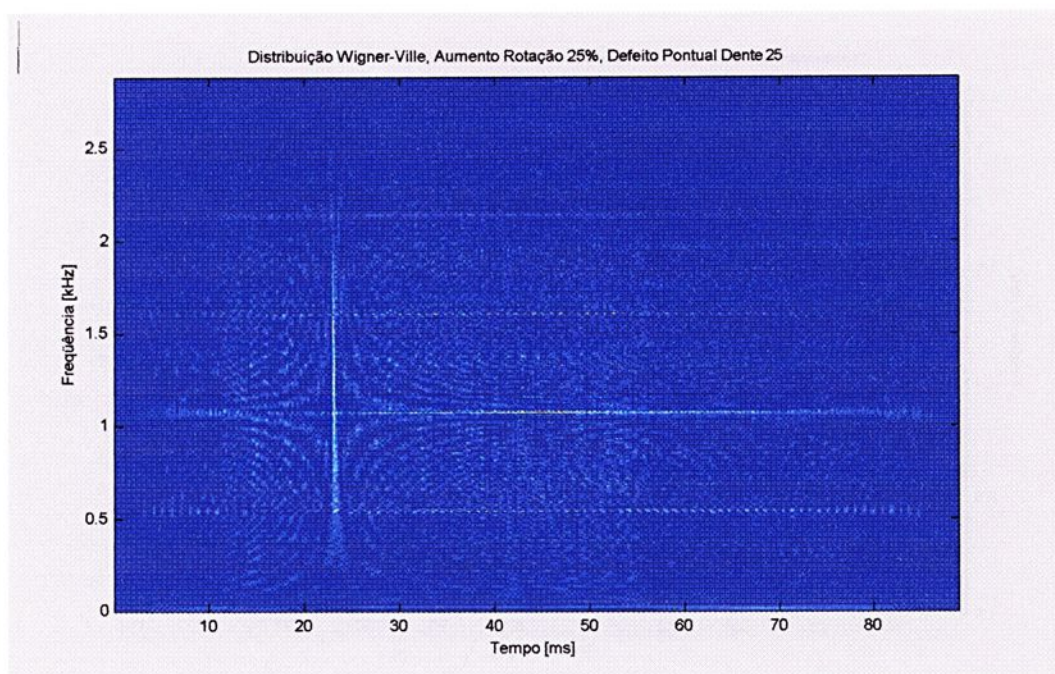


Figura 5.44 - Distribuição Wigner-Ville, condições não nominais, representado pelo aumento da rotação em 25%, com defeito pontual no dente 25.

5.9 DISTRIBUIÇÃO PSEUDO WIGNER-VILLE

A) Defeito Devido a Excentricidade

Neste caso, a análise visual realizada no mapa obtido através da distribuição Pseudo Wigner-Ville não apresentou mudanças significativas, mesmo ocorrendo a variações, tanto de torque quanto de potência, para um mesmo nível de defeito, conforme apresenta as figuras Figura 5.45, Figura 5.46 e Figura 5.47

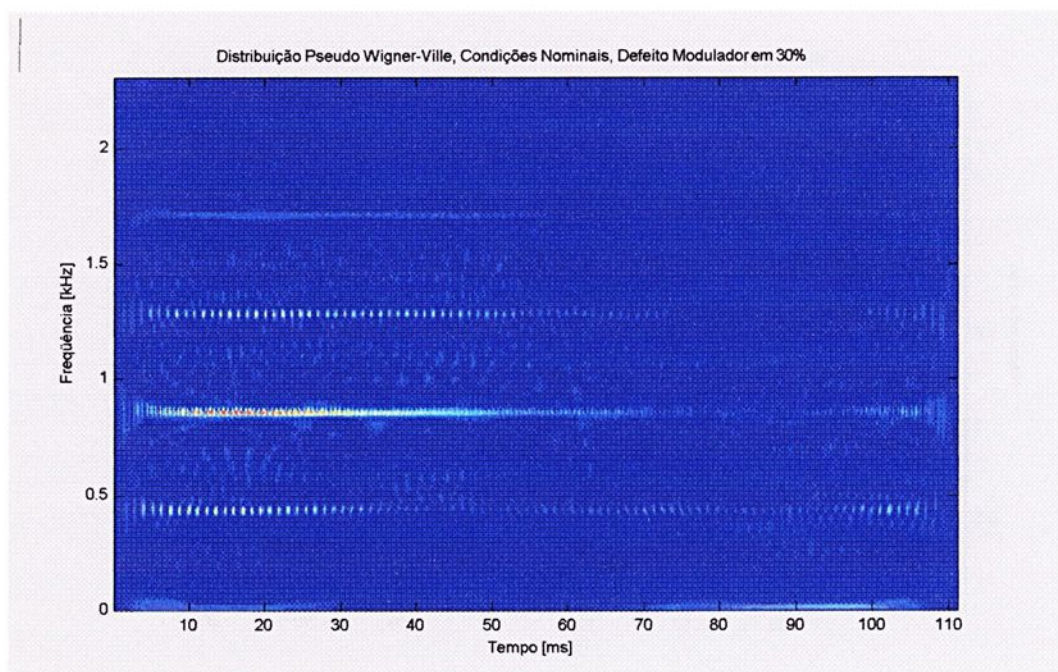


Figura 5.45 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, condições nominais, com defeito modulador em 30%.

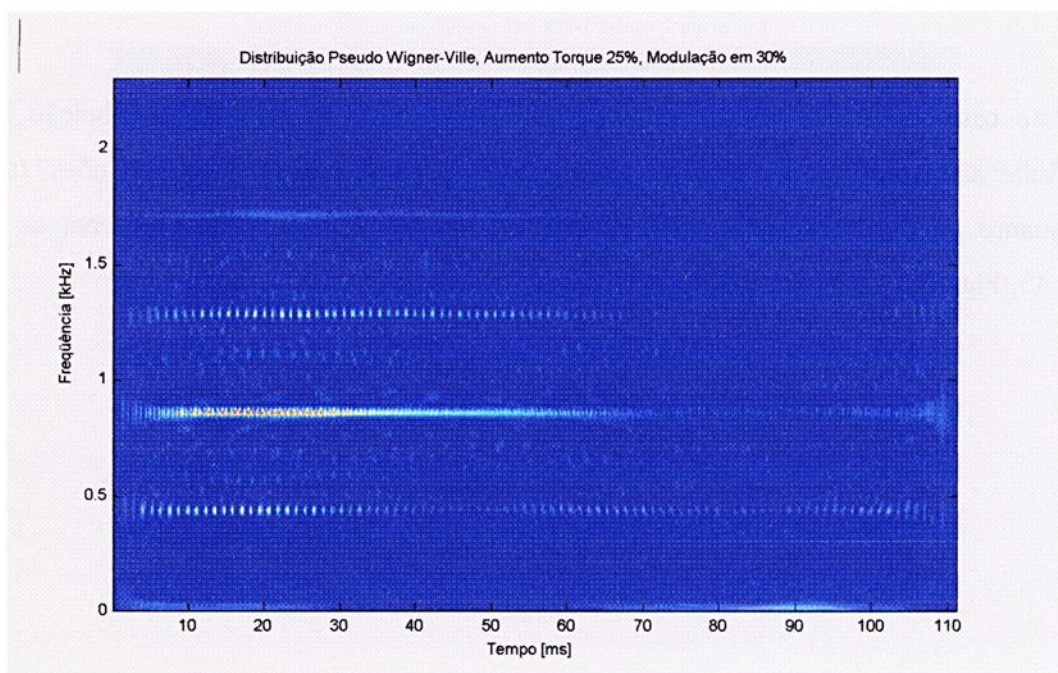


Figura 5.46 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, condições não nominais, representada pelo aumento do torque em 25%, com defeito modulador em 30%.

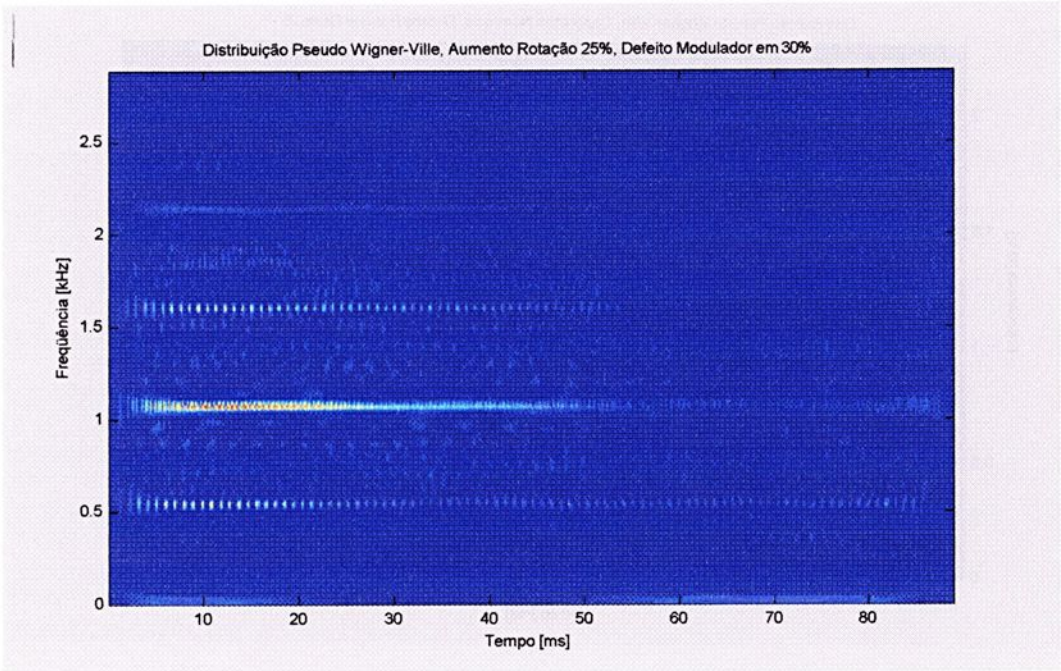


Figura 5.47 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, condições não nominais, representada pelo aumento da rotação em 25%, com defeito modulador em 30%.

B) Defeito Devido ao Dano Pontual

Para este tipo de defeito, ocorreu o mesmo comportamento observado para a excentricidade, visualmente não foi possível observar mudanças significativas no gráfico, mesmo ocorrendo variações, tanto de torque quanto de potência, para um mesmo nível de defeito, conforme pode ser visto nas Figura 5.48, Figura 5.49 e Figura 5.50

Assim, conclui-se que a distribuição Pseudo Wigner Ville aparentemente não é ou é pouco influenciada pela variação de potência, pelo menos para os dois tipos testados.



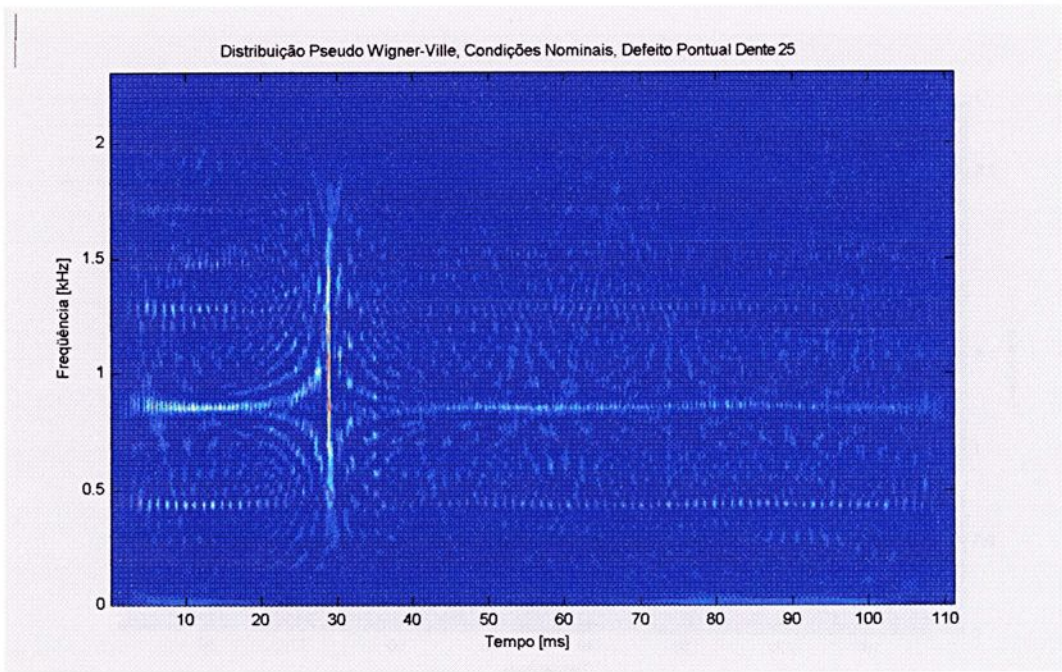


Figura 5.48 - Distribuição Wigner-Ville, para as condições nominais, com defeito pontual no dente 25.

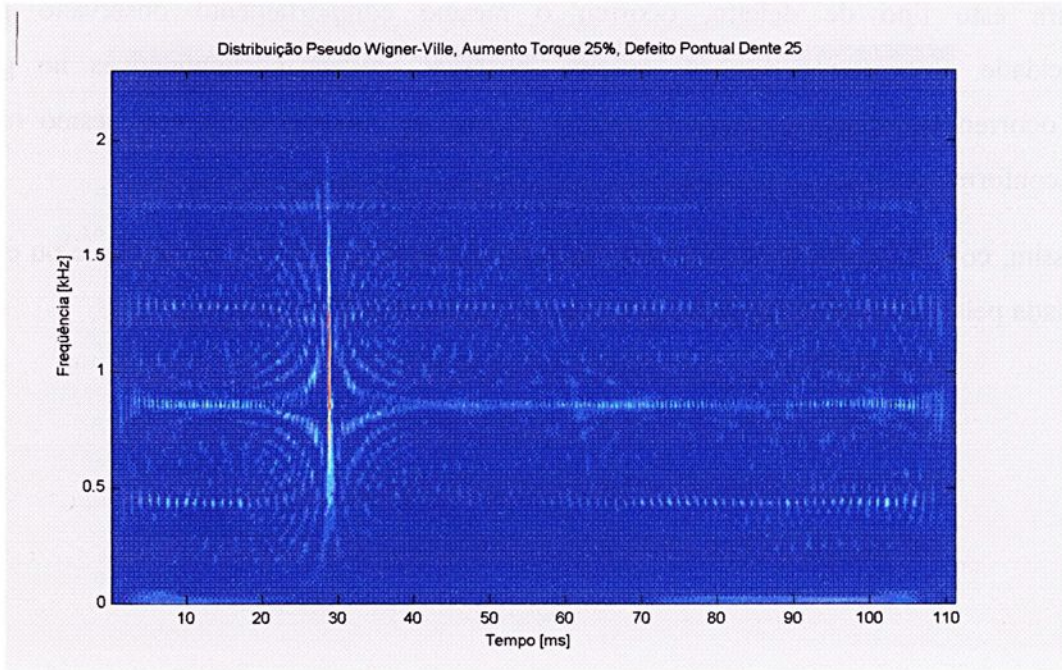


Figura 5.49 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, condições não nominais, representado pelo aumento do torque em 25%, com defeito pontual no dente 25.

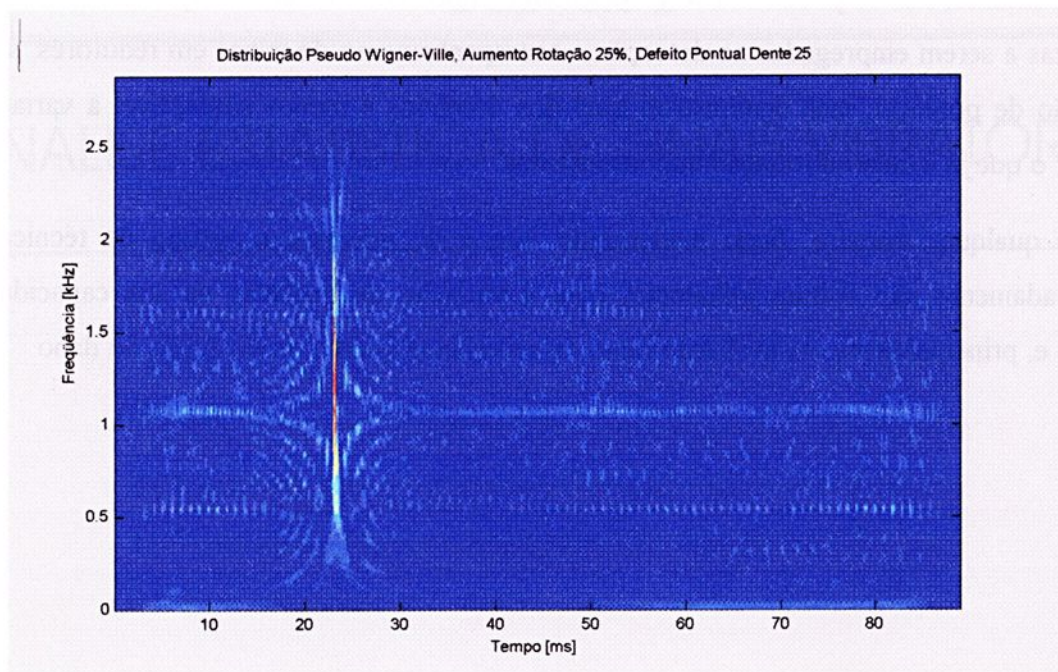


Figura 5.50 - Distribuição Pseudo Wigner-Ville, condições não nominais, representado pelo aumento da rotação em 25%, com defeito pontual no dente 25.

5.10 CONCLUSÕES GERAIS SOBRE AS TÉCNICAS USUAIS DE MONITORAMENTO QUANDO SUBMETIDAS À CONDIÇÃO DE POTÊNCIA VARIÁVEL

A análise realizada no capítulo 4, teve como principal objetivo verificar a capacidade das técnicas usuais de monitoramento na detecção de uma excentricidade no eixo da coroa, acompanhamento da evolução dessa excentricidade e a detecção de um dano pontual.

Uma vez que alguma das técnicas apresentasse capacidade de detecção de um ou ambos os defeitos estudados, no caso uma excentricidade e uma grande trinca pontual, estas técnicas foram submetidas a um novo teste, visando avaliar a influência que a variação de torque e de rotação pudesse causar.

Para isso, foram gerados alguns sinais onde o nível do defeito permaneceu constante e foi alterado o torque envolvido e posteriormente a rotação envolvida, cada um individualmente, ora o torque ora a rotação.

Este estudo demonstrou que apenas as técnicas fator de crista, distribuição Wigner-Ville e Pseudo Wigner-Ville, se mostraram pouco influenciadas pela variação de potência quanto a sua capacidade de monitoramento da falha detectada.

No entanto, não se pode afirmar apenas com os dois testes realizados que estas ferramentas estão aptas a serem empregadas na detecção e acompanhamento de falhas em redutores, sujeitos a variação de potência, mas demonstrou qual dos domínios é menos susceptível a variação de potência, o que já é uma informação importantíssima.

De qualquer maneira, ficou evidenciado que é de interesse o estudo de técnicas que comprovadamente não sofram influências com a variação de potência na sua capacidade de detecção e, principalmente, na avaliação tanto da severidade quanto da evolução do dano.



ANÁLISE ESTATÍSTICA DE SINAIS VIBRATÓRIOS

Descrever e caracterizar um sinal composto por milhares de pontos em um, dois ou no máximo quatro números é uma das características da análise estatística de sinais. Neste capítulo, inicialmente os sinais são classificados segundo suas características e só posteriormente inicia-se a modelagem e caracterização estatística, a qual está baseada na teoria dos conjuntos e na teoria da probabilidade. Esta última possibilitou, entre diversas outras, o surgimento de uma poderosa ferramenta, denominada Função Densidade de Probabilidade, que será brevemente apresentada neste capítulo. Graças a Galileu Galilei, Pascal, Fermat, Jacob Bernoulli, Abraham de Moivre, Pierre Simon de Laplace, entre outros brilhantes cientistas, a teoria da probabilidade foi descoberta e desenvolvida e, dentre suas diversas aplicações encontra-se a análise de sinais.

6.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SINAIS

Um sinal representa quantitativamente ou qualitativamente uma propriedade física transportadora de alguma informação. Por exemplo, a respiração humana está constantemente enviando sinais a várias partes do corpo humano, causando certas ações ou reações. Portanto o sinal proveniente da respiração é denominado excitação e a ação provocada em algum órgão do corpo é denominada resposta. Outros exemplos de sinais são aqueles gerados eletricamente pelo

homem, como os sinais de rádio, televisão, satélites, radares, entre tantos outros. Existem ainda sinais que não tem origem elétrica, como alguns biológicos, sinais acústicos e aqueles provenientes de sistemas mecânicos como é o caso dos sinais vibratórios.

Para a descrição e manipulação dos sinais, é importante o conhecimento das formas de representação desses sinais. Inicialmente, um sinal $f(x)$ pode se definido simplesmente como uma função de x , que varia de uma certa maneira e transporta alguma informação. Na maioria dos casos, a variável independente x é o tempo t , que transporta informações da propriedade de interesse, que pode ser o deslocamento, velocidade ou aceleração proveniente de algum sistema dinâmico.

Na natureza, assim como na maioria dos sistemas artificiais, os sinais produzidos são denominados analógicos, ou seja, um sinal $f(t)$ é definido para todos os valores da variável contínua t , e sua amplitude pode atingir qualquer valor dentro de um intervalo contínuo. Esse tipo de sinal pode ainda receber outras denominações, tal como tempo-contínuo.

Por outro lado, existem sinais produzidos, na grande maioria pelo homem, que são definidos unicamente para valores discretos de t , sendo esses usualmente múltiplos inteiros de algum parâmetro básico T , assim podem ser escritos como:

$$f(t) = f(nT): \text{para } n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6.1)$$

Tais sinais, representados pela Eq. 6.1, é chamado tempo-discreto ou simplesmente discretos. Sinais discretos podem ser ainda digitalizados tornando-se sinais digitais, cuja principal característica é a representação do valor da amplitude segundo um código (tal como um número binário). Esse tipo de sinal é apropriado para a manipulação numérica em computadores, sendo atualmente muito utilizado.

Independentemente do seu tipo, analógico ou discreto, os sinais podem ser determinísticos ou aleatórios. Sinais determinísticos são aqueles que podem ser representados por uma expressão matemática exata, possibilitando assim, extrapolações para um valor exato tanto no futuro quanto no passado. Já os sinais aleatórios são sinais que não podem ser descritos ou representados por uma expressão matemática exata, assim, os sinais aleatórios necessitam, para a sua descrição, de métodos estatísticos. Os métodos estatísticos descrevem as propriedades do sinal em termos de parâmetros estatísticos, tais como, média, variância, desvio padrão, densidade de probabilidade, entre outras (Braun, 1986).



Sinais determinísticos podem ser classificados como periódicos e não-periódicos. Os sinais determinísticos periódicos podem ainda ser classificados como senoidais e periódico complexo.

Os sinais determinísticos periódicos senoidal podem ser definidos matematicamente por uma função variável com o tempo, conforme descreve a Eq. (6.2), na qual X é a amplitude do sinal, f_0 é a frequência em Hertz, t é o tempo e ϕ é o ângulo de fase.

$$x(t) = X \sin(2\pi f_0 t + \phi) \quad (6.2)$$

Os sinais determinísticos periódicos complexos podem ser definidos matematicamente por uma função cuja forma de onda se repete exatamente em intervalos regulares T_p , tal como apresenta a Eq. (6.3), na qual t é o tempo e n representa um inteiro.

$$x(t) = x(t \pm nT_p) \quad (6.3)$$

Os sinais determinísticos não-periódicos podem ainda ser classificados em sinais quase-periódicos e transientes.

A classe que engloba os sinais determinísticos não-periódicos quase-periódicos pode ser definida matematicamente por uma função variante com o tempo, conforme apresenta a Eq. (6.4), na qual f_n é a frequência em Hertz, diferente de um número racional para todos os valores de n , X_n é a amplitude da n -ésima componente, t é o tempo e ϕ_n é o ângulo de fase da n -ésima componente. Um bom exemplo é a vibração provocada por um motor de combustão interna quando um dos seus cilindros está fora de sincronismo com os demais.

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} X_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n) \quad (6.4)$$

Já os sinais determinísticos não-periódicos transientes podem ser compreendidos como todos os sinais que não se enquadram nas categorias citadas acima, os quais podem ser descritos por alguma função variante com o tempo, tal como a Eq. (6.5), na qual A é a amplitude inicial, a é o decaimento e t o tempo.

$$x(t) = \begin{cases} Ae^{-at} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (6.5)$$

A segunda grande classe é representada pelos sinais com características aleatórias, e são inicialmente divididos em: sinais aleatórios estacionários e não estacionários.

Os sinais aleatórios estacionários são caracterizados pelo fato das distribuições de probabilidade não dependerem do tempo absoluto, portanto, o termo estacionário refere-se às distribuições de probabilidade e não aos sinais amostrados. Esta característica implica que todas as propriedades estatísticas são independentes do tempo absoluto, assim o valor médio, valor médio quadrático, variância e desvio padrão são totalmente independentes do tempo. Estes podem ainda ser classificados como ergódico e não ergódico. Os sinais aleatórios estacionários ergódicos são caracterizados pelo fato de além de estacionários, todas as características estatísticas de conjunto, com respeito a uma variação do eixo temporal, e as características estatísticas tomadas ao longo de uma única amostra, coincidirem.

A Figura 6.1 ilustra esquematicamente a classificação geral dos sinais.

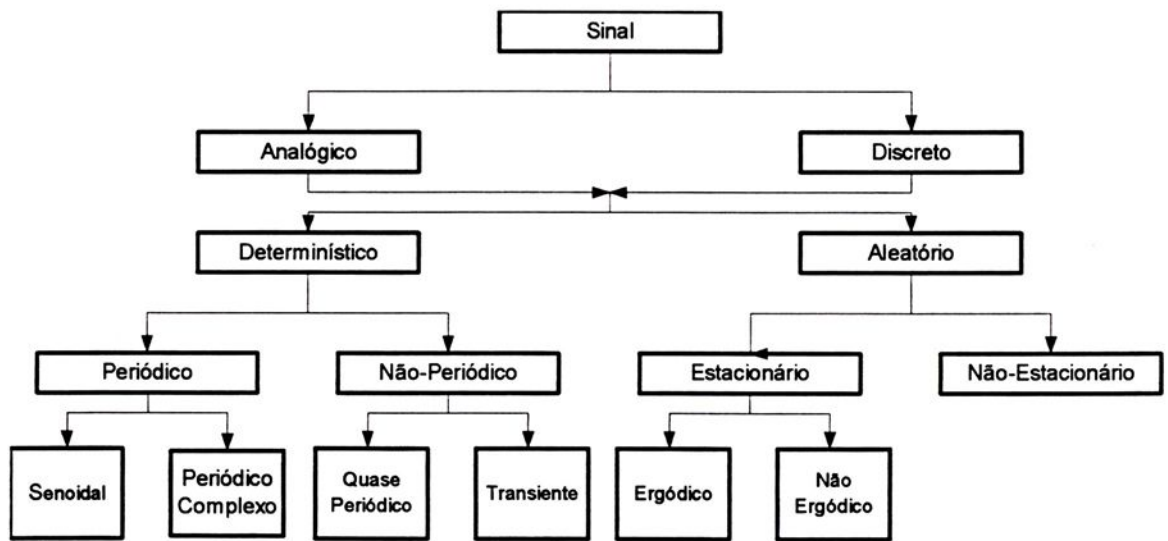


Figura 6.1:Classificação dos Sinais.

Conhecidas as características e a classificação dos sinais, o item a seguir, descreve especificamente dos sinais com características aleatórias, buscando descrever e modelar o seu comportamento.

6.2 MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DE SINAIS

A principal característica dos sinais aleatórios é a total ausência de uma equação matemática exata, que possa descrever o seu comportamento, tanto para valores no passado quanto no futuro. Essa característica pode ser observada na Figura 6.2, que representa um sinal temporal puramente aleatório, pode-se notar a falta de qualquer padrão de repetição ou forma.

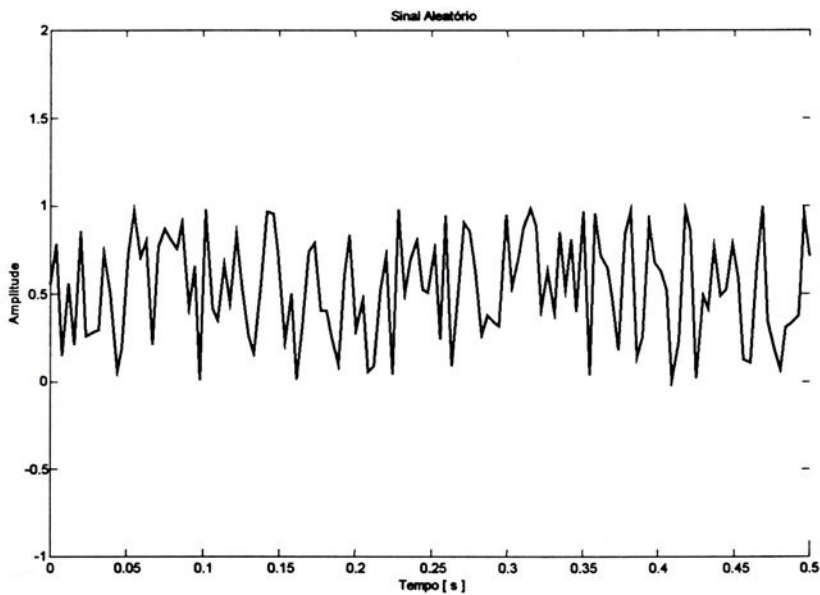


Figura 6.2: Representação de um sinal puramente aleatório com 128 pontos. Amplitude adimensional.

Em virtude desta característica, os sinais aleatórios são caracterizados e modelados segundo suas propriedades estatísticas, cujo principal objetivo é prever qual poderia vir a ser o valor da amplitude do sinal em um determinado tempo t . Estas características aleatórias são obtidas mediante os valores das amplitudes do sinal, as quais inicialmente serão denominados objetos.

Por definição (Larson, 1968) um conjunto estatístico é uma coleção de objetos. Qualquer objeto que pertença a um conjunto é denominado elemento deste conjunto. Geralmente os conjuntos são representados pelas letras do alfabeto maiúsculas (A, B, C, etc), e os elementos deste conjunto pelas letras minúsculas (a, b, c, etc). Para especificar que certos elementos pertencem a um conjunto, são utilizados colchetes { }, por exemplo, para descrever que o conjunto A é formado pelos elementos a, b, c, utiliza-se a seguinte nomenclatura:

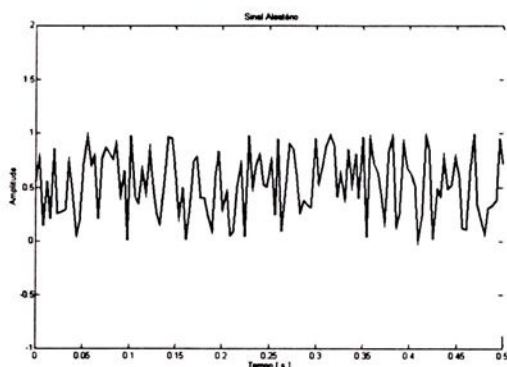
$$A = \{a, b, c\} \quad (6.6)$$

Outra definição importante relacionada ao sub-conjunto é descrita da seguinte maneira: A é um sub-conjunto de B ($A \subset B$) se e somente se todos os elementos que pertencem a A também pertencem a B.

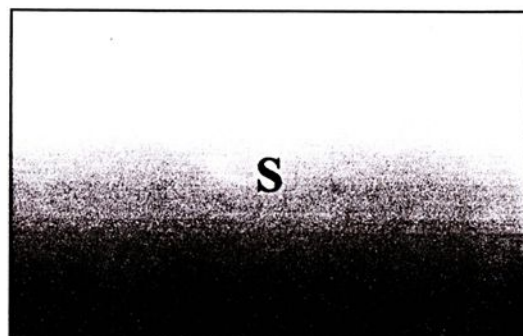
Assim, do ponto de vista estatístico, o sinal representado pela Figura 6.2, pode ser definido como um conjunto S, formado por 128 elementos (amplitudes do sinal) e descrito como:

$$S = \{0.5586, 0.7827, 0.1408, 0.5577, K, 0.7193\}_{128} \quad (6.7)$$

Graficamente, temos a seguinte equivalência:



(a)



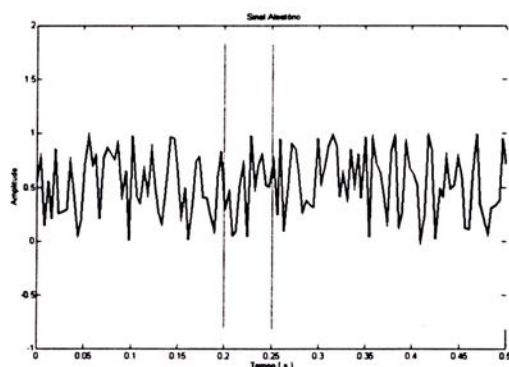
(b)

Figura 6.3: (a) Sinal temporal; (b) Conjunto estatístico equivalente.

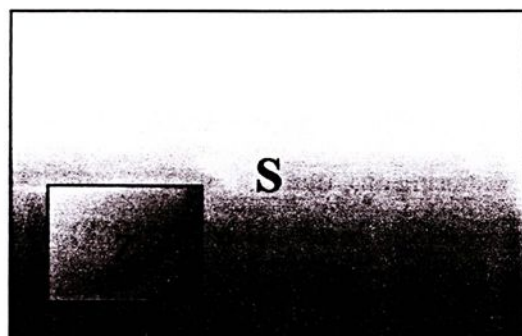
Pode-se também representar estatisticamente apenas alguns valores de um sinal, tal como o apresentado pela Figura 6.2, segundo a definição dos sub-conjuntos. Por exemplo, os valores das amplitudes entre os tempos $t_1 = 0.20s$ e $t_2 = 0.25s$ formam um sub-conjunto $Z \subset S$, sendo representado por:

$$Z = \{0.2935, 0.4655, 0.0455, K, 0.7547\}_{14} \quad (6.8)$$

Graficamente, podemos representar esta condição da seguinte maneira:



(a)



(b)

Figura 6.4: (a) Sinal temporal; apresentando uma faixa definida entre os tempos de 0.2 e 0.25 s (b) Conjunto estatístico equivalente S juntamente com o sub-conjunto Z..

Conhecendo-se a equivalência entre um sinal temporal aleatório e um conjunto estatístico, pode-se descrever a modelagem utilizada para caracterizar um fenômeno aleatório, o qual está fundamentado na teoria da probabilidade.

6.3 TEORIA DA PROBABILIDADE: MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS ALEATÓRIOS

A teoria da probabilidade foi desenvolvida exatamente para esse fim, ou seja, modelar o inesperado, um fenômeno aleatório.

Historicamente, os primeiros estudos matemáticos sobre "chances" foram realizados pelos italianos Gerônimo Cardano (1501-1576) e Galileu Galilei (1564-1642) e estavam relacionados com o jogo de dados. Mas o verdadeiro ponto de partida da moderna teoria das probabilidades ocorreu cem anos mais tarde com os estudos de Pascal e Fermat (1601-1665) os quais foram desenvolvidos posteriormente pelos matemáticos Jacob Bernoulli (suíço, 1654-1705); Abraham de Moivre (francês, 1667-1754); Pierre Simon de Laplace (francês, 1749-1827); Pafnuti L. Tchebycheff (russo, 1821-1894) e Andrei Andreyevitch Markov (russo, 1856-1922).

Para um maior rigor matemático, a teoria da probabilidade possui duas definições importantes aplicadas aos conjuntos estatísticos, na qual esses conjuntos são mais rigorosamente definidos, e chamados de espaço amostral. A caracterização de um espaço amostral é

extremamente importante, já que o modelo probabilístico adotado deve ser compatível com o tipo de espaço amostral, conforme será apresentado no decorrer deste item.

Um espaço amostral é definido como o conjunto de todos os possíveis resultados obtidos de um experimento, que por sua vez, é definido como qualquer operação cujo resultado não pode ser previsto com certeza (Larson, 1968). O exemplo mais clássico de um experimento é o jogo de dados.

Existem dois tipos básicos de espaço amostral, o espaço amostral discreto e o espaço amostral contínuo. O espaço amostral discreto pode ainda ser dividido em finito e contavelmente infinito.

Para a definição do espaço amostral discreto, considere o experimento de jogar a moeda. Esse experimento possui um espaço amostral discreto, já que cada um dos dois resultados (cara ou coroa) pode ser unicamente identificado por uma etiqueta (cara (C) ou coroa (Co)). Também é finito, já que o número de possíveis resultados são dois, um número finito, assim:

$$F = \{C, Co\} \quad (6.9)$$

Ao se realizar este experimento sequencialmente, o número de possíveis caras que podem ocorrer antes que ocorra uma coroa é infinita, assim esta condição sequencial irá formar um espaço amostral discreto, já que cada um dos resultados pode ser identificado por uma etiqueta (cara (C) ou coroa (Co)) e também é contavelmente infinito em razão do número de possíveis resultados ser infinito (Larson, 1968).

$$I = \{C, C, C, C, C, C, C, C, C, K, C, C, C, Co\} \quad (6.10)$$

O segundo tipo de espaço amostral, denominado espaço amostral contínuo, é sempre incontavelmente infinito, já que este é definido sobre um *continuum*. Para este caso, suponha que nos estamos medindo o tempo transcorrido durante a emissão de duas partículas de uma substância radioativa. O tempo transcorrido entre o início do experimento até que ocorra a emissão desta partícula radioativa pode ser qualquer um. Este espaço amostral é escrito como apresenta a Eq. 6.11, na qual t é o tempo transcorrido (Larson, 1968).

$$T = \{0 \leq t < \infty\} \quad (6.11)$$



Para finalizar, um subconjunto tal qual o apresentado pela Eq. 6.8 é denominado um evento do espaço amostral S .

Nos parágrafos anteriores, foi descrito e modelado o domínio estatístico, ou seja, o espaço amostral e seus eventos. Nos próximos parágrafos, será descrito e caracterizado os elementos que compõem o domínio estatístico, os quais são denominados de variáveis aleatórias.

Uma variável cujo valor é determinado pelo resultado de um experimento é denominada de uma variável aleatória. Rigorosamente definida (Larson, 1968), uma variável aleatória X é uma função real dos elementos de um espaço amostral.

Tal como o espaço amostra pode ser classificado como discretos e contínuos, as variáveis aleatórias também podem ser classificadas, basicamente da mesma maneira, ou seja, em variáveis aleatórias discretas e variáveis aleatórias contínuas. A diferença entre estes dois tipos de variáveis aleatórias é essencialmente a mesma diferença existente entre os espaços amostrais. Formalmente, uma variável aleatória discreta é definida quando os seus valores formam um conjunto discreto (contável) de números reais. Uma variável aleatória é contínua quando o seus valores formam um conjunto contínuo de números reais.

Para exemplificar as características de uma variável aleatória discreta, vamos considerar a rolagem de um par de dados uma única vez. Definindo X como a soma dos dois números que ocorrem, então o espaço amostral é:

$$K = \{(x_1, x_2) : x_1 = 1, 2, \dots, 6; x_2 = 1, 2, \dots, 6\} \quad (6.12)$$

e como foi definido

$$X(\omega) = x_1 + x_2 \quad \text{para } \omega = (x_1, x_2) \in K \quad (6.13)$$

então os valores de X é o conjunto $\{2, 3, \dots, 12\}$, desta forma, caracterizando X como uma variável aleatória discreta.

Da mesma maneira, para exemplificar as características de uma variável aleatória contínua, vamos considerar o seguinte exemplo: O instante o qual você deixa sua residência para suas atividades diárias é provável que seja qualquer um entre as 7h30min e 8h30min, inclusive. Seja Y o número de minutos (ou frações deste) antes das 8h00min no qual você deixa sua residência,

então um possível espaço amostral pode ser definido admitindo-se as 7h30mim como zero. Assim temos:

$$K = \{x : 0 \leq x \leq 30\} \quad (6.14)$$

utilizando este espaço amostral, a variável Y pode ser escrita, na notação funcional, por:

$$Y(\omega) = 30 - \omega \quad \text{para } \omega \in K \quad (6.15)$$

então os valores de Y formam um conjunto contínuo $\{x : 0 \leq x \leq 30\}$, que caracteriza Y como uma variável aleatória contínua.

Observando novamente a Figura 6.2, representativa de um sinal com características puramente aleatórias, cuja amplitude foi fixada entre os limites de 0 à 1, este sinal pode ser modelado estatisticamente da seguintes maneira:

- Espaço Amostral: é formado por todos os valores obtidos do experimento durante o intervalo de tempo de 0 à 0.5 segundos, sendo definido por:

$$S = \{x : 0 \leq x \leq 1\} \quad (6.16)$$

- Variável Aleatória: utilizando este espaço amostral, a variável aleatória pode ser escrita como $Y(\omega) = \omega$ para $\omega \in S$, assim os valores de Y formam um conjunto contínuo sendo então classificada como uma variável aleatória contínua.

Portanto, o sinal apresentado pela Figura 6.2 está modelado estatisticamente, no qual o modelo obtido é caracterizado por pertencer à classe contínua. Em virtude desta caracterização, a classe baseada nos fatores discretos, cujas propriedades e características podem ser obtidas em Larson (1968); Larson (1995), Barnes (1994), será abandonada.

Uma vez que o sinal está modelado estatisticamente, pode-se prosseguir a análise buscando a caracterização deste sinal. Tal caracterização esta fundamentada na distribuição de probabilidade de uma variável aleatória contínua X, sendo descrita por uma função densidade de probabilidade contínua denominada $f(x)$.



6.4 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP): PROPRIEDADES, CARACTERÍSTICAS E MODELOS

Para uma melhor compreensão das propriedades de uma função densidade de probabilidade, optou-se em demonstrá-la segundo um exemplo, no qual esta foi desenvolvida para um sinal determinístico com características senoidais, conforme apresenta a Figura 6.5.

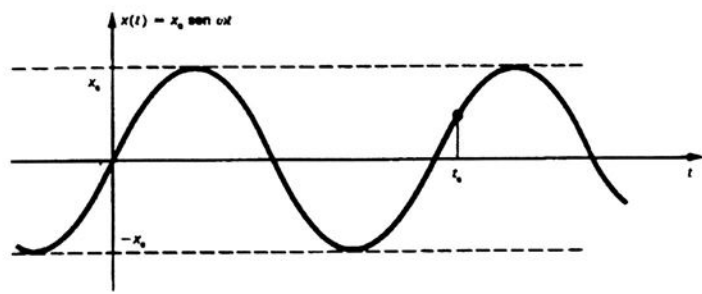


Figura 6.5: Representação de um sinal determinístico exatamente senoidal.

O sinal apresentado pela Figura 6.5, possui características determinísticas, desta maneira, o valor da amplitude x pode ser precisamente conhecida para qualquer valor de tempo t . Assim, pode-se calcular quanto tempo a onda permanece em um intervalo de amplitude qualquer, conforme apresenta a Figura 6.6.

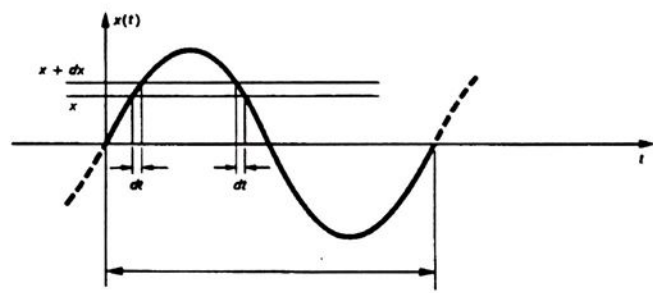


Figura 6.6: Definição da duração temporal durante o intervalo entre x e $(x + dx)$

Com referência a Figura 6.6, pode-se observar que durante um período completo, $x(t)$ permanece no intervalo compreendido entre x e $(x + dx)$ durante dois intervalos de tempo com duração individual dt . Matematicamente, estas considerações podem ser escritas com base no sinal senoidal descrito pela Eq. 6.17, na qual X_0 é a amplitude, ω é a frequência em rad/s e t é o tempo, assim:

$$x(t) = X_o \sin \omega t \quad (6.17)$$

Derivando-se a Eq. 6.17 em função do tempo, temos:

$$\frac{dx}{dt} = X_o \omega \cos \omega t \quad (6.18)$$

Isolando-se dt da Eq. 6.18, obtêm-se:

$$dt = \frac{dx}{X_o \omega \cos \omega t} \quad (6.19)$$

Fazendo algumas substituições trigonométricas, a Eq. 6.19 pode ser reescrita como:

$$dt = \frac{dx}{X_o \omega \sqrt{1 - \frac{x^2}{X_o^2}}} \quad (6.20)$$

Portanto, a proporção de tempo a cada período T na qual $x(t)$ encontra-se no intervalo delimitado por x até $(x + dx)$ é :

$$\frac{2(dt)}{T} = \frac{2dx}{\omega T \sqrt{X_o^2 - x^2}} \quad (6.21)$$

Substituindo o período T por $2\pi/\omega$, temos:

$$\frac{2(dt)}{T} = \frac{dx}{\pi \sqrt{(X_o^2 - x^2)}} \quad (6.22)$$

Portanto, para um número inteiro de ciclos, a Eq. 6.22 fornece a proporção total de tempo decorrido durante o qual $x(t)$ encontra-se no intervalo delimitado por x até $(x + dx)$.

Para uma condição específica na qual escolhe-se um instante de tempo específico, por exemplo $t = t_o$, é perfeitamente possível a obtenção do valor da amplitude x para esse instante, já que existe uma equação matemática exata representativa de $x(t)$, bastando para isso a substituição deste instante de tempo t_o na Eq. 6.17.

Porém, ao admitir-se que o valo de t_0 não está determinado com precisão, e a única informação existente é o fato que, t_0 encontra-se num valor qualquer do eixo temporal. Nesse caso, não sabemos qual será o valor de $x(t_0)$, e a única possibilidade é a de prever qual poderia ser o seu valor. Se t_0 é totalmente arbitrário, e pode estar em qualquer lugar durante um ciclo completo, a probabilidade de que $x(t_0)$ se encontre no intervalo delimitado por x e $(x + dx)$ dependerá de quanto tempo $x(t)$ encontra-se nesse intervalo, a cada ciclo. Assim, a probabilidade de que $x \leq x(t_0) \leq x + dx$ é :

$\text{Prob}(x \leq x(t_0) \leq x + dx) =$ fração de tempo na qual $x(t)$ permanece no intervalo delimitado por x e $x + dx$.

$$\text{Prob}(x \leq x(t_0) \leq x + dx) = \frac{2(dt)}{T}$$

$$\text{Prob}(x \leq x(t_0) \leq x + dx) = \frac{dx}{\pi \sqrt{(X_o^2 - x^2)}}, \text{ para } -X_o \leq x \leq X_o.$$

Desse modo, a função densidade de probabilidade de primeira ordem $f(x)$ é definida como:

$$\text{Prob}(x \leq x(t_0) \leq x + dx) = f(x) \cdot dx$$

Sendo, para esse caso, representada por:

$$f(x) = \frac{1}{\pi \sqrt{(X_o^2 - x^2)}}, \text{ para } -X_o \leq x \leq X_o. \quad (6.23)$$

Graficamente, esta função, que representa a densidade de probabilidade especificamente para uma onda senoidal, é apresentada pela Figura 6.7.

Para que uma função matemática seja caracterizada como uma função densidade de probabilidade $f(x)$, existe duas propriedades básicas que devem ser satisfeitas. A primeira refere-se a inequação matemática, descrita pela Eq. 6.24, que deve ser satisfeita para todos os possíveis valores de x , que por definição, podem estar compreendidos entre $+\infty$ e $-\infty$ ($f(x) = 0$ para qualquer valor de x fora da faixa dos possíveis valores).

$$f(x) \geq 0 \quad (6.24)$$

A segunda condição que deve ser satisfeita é apresentada pela Eq. 6.25. Esta indica que a área total compreendida abaixo da curva, fornecida por $f(x)$, sobre o intervalo dos possíveis valores de x , deve ser unitária.

$$\int_{\text{todos}} f(x) dx = 1 \quad (6.25)$$

Sendo satisfeitas estas duas equações básicas, Eq. 6.24 e Eq. 6.25, pode-se calcular a probabilidade que $x(t_0)$ encontre-se entre x e $(x + dx)$, que é fornecida pela área hachurada da Figura 6.7.

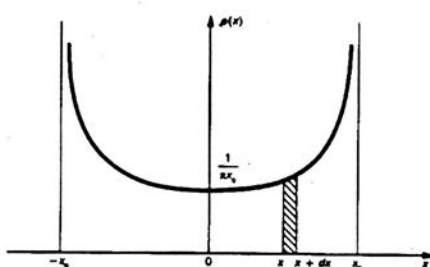


Figura 6.7: Função densidade de probabilidade do sinal senoidal, descrito pela Eq. 6.17.

A equação matemática $f(x)$, representativa da função densidade de probabilidade de uma função senoidal, pode ser obtida matematicamente, já que este é um sinal determinístico, ou seja existe uma equação matemática que descreve o seu comportamento, neste caso a Eq. 6.17.

Os sinais aleatórios, não possuem nenhuma equação matemática que descreva o seu comportamento, desta forma é impossível que seja obtida uma equação matemática representativa da sua função densidade de probabilidade, tal como a Eq. 6.23.

Para melhor descrever este fato, considere que $x(t)$ não represente uma onda senoidal e sim um processo aleatório, ao se concluir que $x(t)$ é aleatório nos concluímos que os valores de $x(t)$ não podem ser conhecidos com exatidão.

Supondo que as características estatísticas de $x(t)$ não variam no decorrer do tempo, então pode-se utilizar o sinal mencionado para calcular a função densidade de probabilidade de $x(t)$ da mesma forma realizada para uma função determinística.

Baseando-se na Figura 6.8, que apresenta parte de um sinal decorrente de um processo aleatório, os tempos nos quais $x \leq x(t) \leq x + dx$ são representados pelas áreas hachuradas.

Durante o intervalo de tempo T , $x(t)$ encontra-se no intervalo de x até $(x + dx)$ durante o tempo total de $(dt_1 + dt_2 + dt_3 + dt_4)$, conforme pode ser observado na Figura 6.8.



Figura 6.8: Cálculo da função densidade de probabilidade $p (x)$ para um processo aleatório.

Conseqüentemente, podemos admitir que, no caso de T ser suficientemente grande, a função densidade de probabilidade $f(x)$, é fornecida pela seguinte equação:

$$f(x) = \frac{(dt_1 + dt_2 + dt_3 + dt_4 + \dots)}{T} = \frac{\sum dt}{T} \tag{ 6.26 }$$

Para que a Eq.6.26 seja matematicamente correta, o intervalo de tempo T deve ser infinito, o que implica que o sinal temporal tem que continuar eternamente sem que ocorra mudanças no seu caráter durante o decorrer do tempo. Pode-se concluir que a Eq. 6.26 é apenas uma definição teórica para o entendimento da função densidade de probabilidade para um sinal aleatório, carecendo de um significado prático e usual.

Baseado no exposto acima, não existe uma forma ou procedimento geral para que um sinal ou mais genericamente uma variável aleatória qualquer, seja manipulada matematicamente para que resultado final seja uma função densidade de probabilidade.

Este fato fez com que a teoria da probabilidade fosse desenvolvida, tomando-se por base variáveis aleatórias específicas, resultando em diversos tipos de funções densidade de probabilidade, na qual cada uma dessas funções descrevesse especificamente o comportamento de uma variável aleatória, também específica, não havendo assim generalidades.

Uma variável aleatória possui uma faixa de valores contínuos, o que pode modelar diversos parâmetros físicos, tais como, tempo, distância, temperatura, pressão, ou outro parâmetro que varie continuamente. Em virtude da ocorrência prática, à essas variáveis aleatórias foram atribuídos nomes especiais, quase sempre referentes aos pesquisadores que as descobriram.

Algumas das principais funções densidade de probabilidade contínuas, referentes à variáveis aleatórias específicas são brevemente descritas a seguir, as quais podem ser estudadas mais profundamente em Larson (1968); Larson (1995), Barnes (1994) e Johnson & Kotz (1970).

Talvez uma das mais importantes, e amplamente utilizada é a função densidade de probabilidade denominada Gaussiana, também conhecida como normal. Esta foi descoberta por Abraham de Moivre em 1733, sendo novamente introduzida no início do século dezenove por Carl Friedrich Gauss em conexão com a teoria dos erros. Matematicamente, esta FDP é descrita pela Eq. 6.27, em que $e = 2,7183$ é base do logaritmo neperiano, $\bar{x}$ é a média amostral e s^2 é a variância amostral.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\bar{x})^2}{2s^2}} \quad \text{para } -\infty < x < \infty \quad (6.27)$$

Outra função densidade de probabilidade importante e com amplas aplicações, é denominada de Uniforme, sendo matematicamente descrita pela Eq. 6.28, na qual a e b são os limites do intervalo de definição.

$$f(x) = \frac{1}{b-a} \quad \text{para } a < x < b \quad (6.28)$$

A função densidade de probabilidade Gama foi inicialmente descrita por Euler em 1729, sendo ainda empregada em muitas finalidades até os dias de hoje. Euler demonstrou que a integral definida pela Eq. 6.29 converge para um número positivo para todo $n > 0$ e o valor desta integral depende apenas de n , sendo então chamada de função Gama com argumento n . O resultado final da integral apresentada pela Eq. 6.29 é demonstrada pela Eq. 6.30.

$$\int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx = \Gamma(n) \quad (6.29)$$

$$\Gamma(n) = (n-1)! \quad (6.30)$$

As funções densidade de probabilidade (FDP) Gaussiana, Uniforme e Gama, são exemplos de algumas das FDP contínuas existentes, existem ainda várias outras FDP contínuas, tais como, a Qui-Quadrado, Exponencial, Weibull, Lognormal, F e Beta. Todas estas podem ser encontradas e descritas com maiores detalhes em Barnes (1994).

Do ponto de vista estatístico, uma FDP caracteriza completamente um espaço amostral composto por uma determinada variável aleatória. Assim, tanto um sinal aleatório quanto determinístico pode ser modelado estatisticamente mediante um espaço amostral contínuo, e posteriormente, ser caracterizado por uma função densidade de probabilidade. A Figura 6.9 demonstra esse processo.

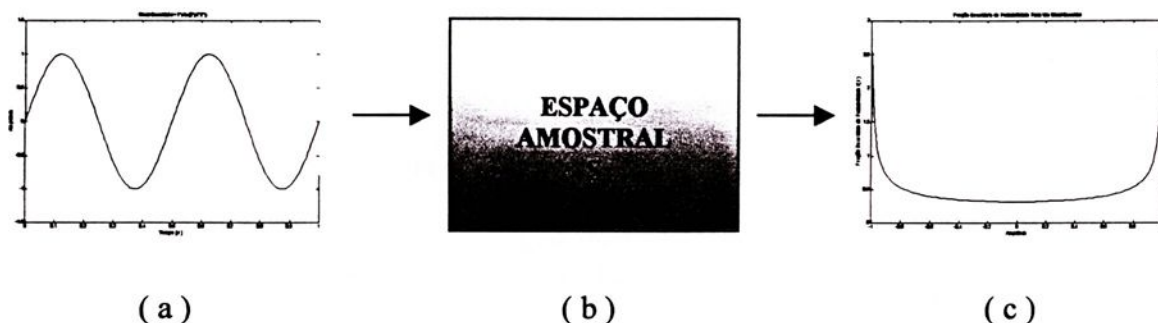


Figura 6.9: Processo de modelagem e caracterização estatística de um sinal: (a) sinal temporal representativo de uma senoide; (b) espaço amostral contendo todos os valores da amplitude deste sinal; (c) função densidade de probabilidade.

Observando o procedimento descrito pela Figura 6.9, pode-se observar que o sinal temporal, no fim do processo, é representado por uma FDP apropriada, que até o presente momento apenas possibilitava o conhecimento da probabilidade de algum valor da variável estatística estar dentro de uma faixa de valores, por exemplo, a probabilidade da amplitude do sinal estar entre 0 e 0.5.

Felizmente, é possível extrair muitas outras informações de uma FDP, tais informações são denominadas medidas da função densidade de probabilidade, sendo descritas por intermédio dos momentos estatísticos e suas normalizações. Uma FDP está completamente caracterizada se forem medidos os seus quatro primeiros momentos estatísticos.

O primeiro momento estatístico, mais conhecido como momento estatístico de primeira ordem, representa uma medida de localização ou centralidade da FDP, em relação a média. Matematicamente, pode ser obtido com base na Eq. 6.31, na qual μ é a média, x são os valores da variável aleatória e $f(x)$ é a função densidade de probabilidade. A concepção da média nada mais é que uma somatória ponderada de todos os possíveis valores da variável aleatória X , Barnes (1994).

$$\mu = \int_{\text{todox}} x f(x) dx \quad (6.31)$$

O momento estatístico de segunda ordem representa uma medida de variabilidade ou dispersão da variável aleatória X , conhecida como variância, que é a mais útil medida de dispersão. Matematicamente, a variância pode ser calculada com base na Eq. 6.32, na qual σ^2 é a variância. A concepção da variância consiste em uma somatória ponderada dos desvios de todos os valores de X em relação à média μ , por esta razão, σ^2 nunca terá valores menores que zero, Barnes (1994).

$$\sigma^2 = \int_{\text{todox}} (x - \mu)^2 f(x) dx \quad (6.32)$$

Antes da definição das outras duas medidas para uma total caracterização de uma FDP, é necessário relatar a média e a variância de uma função densidade de probabilidade em um contexto mais geral, denominado operador do valor esperado. O valor esperado de qualquer função $g(X)$, de uma variável aleatória X é definido como,

$$E\{g(X)\} = \int_{\text{todox}} g(x) f(x) dx \quad (6.33)$$

com base na Eq. 6.33 pode-se notar que, se $g(X) = X$, então $E\{g(X)\} = \mu$ e que, se $g(X) = (X - \mu)$, então $E\{g(X)\} = \sigma^2$. Assim, pode-se escrever o k -ésimo momento em relação a um ponto arbitrário qualquer a da seguinte maneira:

$$E\{(X - a)^k\} = \int_{\text{todox}} (x - a)^k f(x) dx \quad (6.34)$$

Para os propósitos desta pesquisa, nos limitaremos aos momentos em torno da origem (M_o) e em torno da média (M_m), sendo definidos respectivamente pelas Eq. 6.35 e 6.36, Barnes (1994).

$$M_o^k = \int_{\text{todox}} (x)^k f(x) dx \quad (6.35)$$

$$M_m^k = \int_{\text{todox}} (x - \mu)^k f(x) dx \quad (6.36)$$

Uma vez que a formulação genérica para os momentos estatísticos está definida, pode-se definir as outras duas medidas de interesse de uma FDP, M_m^3 e o M_m^4 . A necessidade do conhecimento de mais estes dois fatores se deve ao fato que podem existir varias funções densidade de probabilidade completamente diferentes entre si, tanto no que diz respeito ao tipo de variável aleatória quanto na forma, mas com a mesma média e mesma variância.

Uma maneira de diferenciar as funções densidade de probabilidade é pela comparação do terceiro momento em torno da média. O M_m^3 fornece uma medida do *skewness*, isto é, uma medida sobre a assimetria da FDP em relação à media, sendo zero para qualquer FDP perfeitamente simétrica. Se a distribuição está concentrada na parte mais esquerda, M_m^3 é positivo, caso contrário, M_m^3 é negativo.

Apesar do M_m^3 ser capaz de diferenciar uma FDP de outra, pode ainda ocorrer o caso de duas funções densidade de probabilidade possuírem a mesma média, mesma variância e mesmo *skewness*. Uma maneira de diferenciar tais distribuições é por intermédio do cálculo do quarto momento em torno da média. O M_m^4 fornece uma medida de kurtosis, isto é, a medida do achatamento da FDP.

Assim, um sinal de vibração que pode conter milhares de pontos pode ser satisfatoriamente caracterizado e classificado por intermédio das medidas estatísticas baseadas no cálculo dos quatro primeiros momentos estatísticos, resultando em apenas quatro valores os quais identificam perfeitamente este sinal e podem o distinguir de outros. Mas para isso, é necessário o conhecimento da função densidade de probabilidade que descreve o comportamento da variável aleatória em estudo que, a priori, raramente é conhecida.

No próximo item, será abordado exatamente este problema, ou seja, como obter uma função densidade de probabilidade que seja representativa de um sinal vibratório específico.

6.5 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE BETA

Dentre as diversas funções densidade de probabilidade contínuas existentes, encontra-se a função densidade de probabilidade Beta. Esta FDP baseia-se na função densidade de probabilidade Gama e possui uma importante e marcante característica, que é a de assumir uma grande variedade de formas diferentes, sobre o intervalo (0,1). Dentre as diversas formas

assumidas pela FDP Beta, encontram-se a Gaussiana e a Uniforme, conforme apresentam as Figura 6.10 e Figura 6.11.

A grande variedade de formas que pode ser assumida pela FDP Beta, deve-se ao fato desta distribuição ser função de outros dois parâmetros, além dos valores da variável aleatória, denominados α e β , sendo formalmente definida pela seguinte equação, (Larson, 1995):

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, \quad \text{para } 0 < x < 1 \text{ e } \alpha > 0, \beta > 0 \quad (6.37)$$

Para valores iguais de α e β , a FDP Beta distribui-se de forma simétrica, ou seja, com skewness nulo. A Figura 6.10 apresenta diversas formas para a FDP Beta, nestas condições.

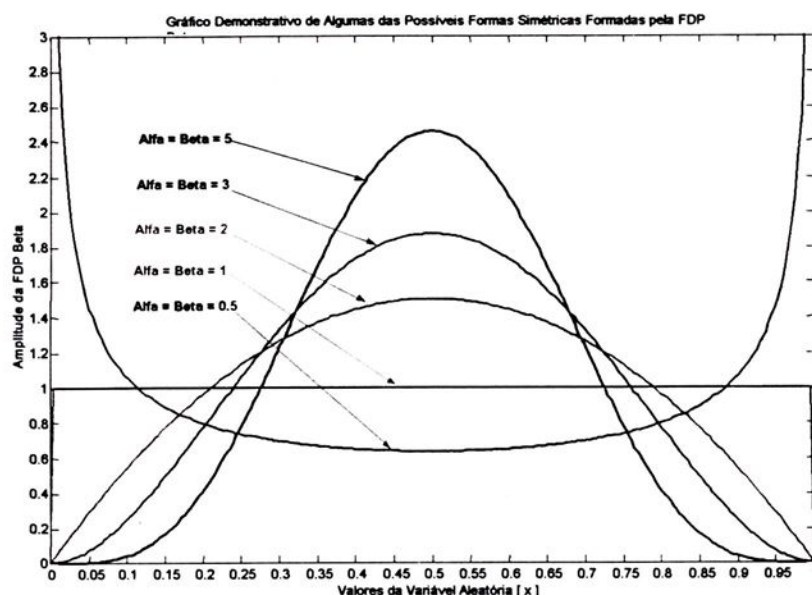


Figura 6.10: Algumas das possíveis formas simétricas obtidas com a variação de α e β para a FDP Beta. Pode-se notar, para α e $\beta = 1$, a FDP Beta representa uma distribuição Uniforme e para α e $\beta = 5$, a representação é de uma distribuição Gaussiana.

Quando os valores de α e β diferem-se entre si, a função densidade de probabilidade assume formas assimétricas (skewness diferente de zero), conforme é apresentado na Figura 6.11.

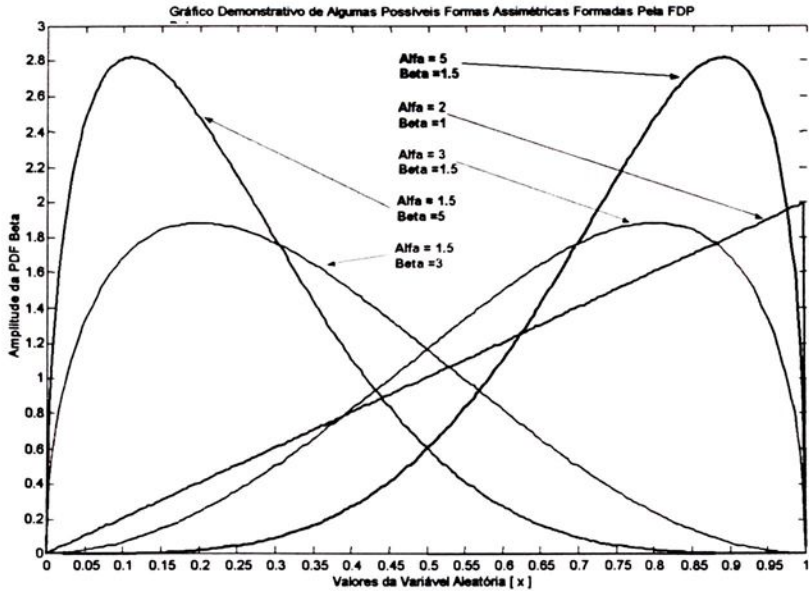


Figura 6.11: Algumas das possíveis formas assimétricas obtidas com a variação de α e β para a FDP Beta.

Para possibilitar que a FDP Beta seja medida, torna-se necessário o desenvolvimento das expressões representativas dos momentos estatísticos especificamente para esta distribuição. Tomando-se por base as Eq. 6.35 e Eq. 6.37, pode-se obter a expressão do k-ésimo momento em torno da origem, descrito pela seguinte expressão:

$$M_o^k = \int_0^1 x^k \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx \tag{ 6.38 }$$

Com base na resolução da integral descrita pela Eq. 6.38, obtém-se a expressão genérica para o k-ésimo momento em torno da origem, (Larson, 1995):

$$M_o^k = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)\Gamma(\alpha + k)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\alpha + \beta + k)} \tag{ 6.39 }$$

Assim, mediante a substituição de $k = 1$ na Eq. 6.39, e desenvolvendo a equação utilizando as propriedades da FDP Gama, obtém-se o momento estatístico de primeira ordem em relação a origem, a média, cujo resultado é apresentado pela Eq. 6.40.

$$\mu = M_o^1 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (6.40)$$

Analogamente, substituindo-se $k = 2$ na Eq. 6.39, obtêm-se o momento estatístico de segunda ordem em relação à origem, cujo resultado é apresentado pela Eq. 6.41.

$$M_o^2 = \frac{\alpha(\alpha+1)}{(\alpha+\beta)(\alpha+\beta+1)} \quad (6.41)$$

Para a obtenção da variância, que é o momento de segunda ordem em relação a média, torna-se necessário o uso do teorema binomial (Larson, 1995), que fornece o seguinte resultado:

$$(X - \mu)^2 \equiv X^2 - 2X\mu + \mu^2 \quad (6.42)$$

Assim, a variância pode ser obtida por intermédio do cálculo do valor esperado E , sobre o lado direito da Eq. 6.42, desta forma:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &\equiv E[X^2 - 2X\mu + \mu^2] \\ \sigma^2 &\equiv E[X^2] - 2\mu E[X] + \mu^2 \end{aligned} \quad (6.43)$$

Lembrando que $E[X] = \mu$, os últimos dois termos da Eq. 6.43 podem ser combinados resultando na equação final para a variância, conforme apresenta a Eq. 6.44.

$$\sigma^2 \equiv E[X^2] - \mu^2 \quad (6.44)$$

Assim, substituindo-se as equações 6.40 e 6.41 na 6.44, obtêm-se a expressão para a variância, conforme apresenta a Eq. 6.45.

$$\sigma^2 = \frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)^2(\alpha+\beta+1)} \quad (6.45)$$

O quarto momento estatístico em relação à origem, que será muito utilizado neste trabalho, pode ser obtido substituindo $k = 4$ na Eq. 6.39, cujo resultado final é apresentado pela Eq. 6.46.

$$M_o^4 = \frac{\alpha(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)}{(\alpha+\beta)(\alpha+\beta+1)(\alpha+\beta+2)(\alpha+\beta+3)} \quad (6.46)$$



As equações 6.37, 6.39, 6.40, 6.41, 6.44 e 6.46, em conjunto com as Figura 6.10 e Figura 6.11 caracterizam e apresentam algumas das principais propriedades relativas à função densidade de probabilidade Beta.

Para que a FDP Beta possa descrever um sinal vibratório, ou outro tipo de sinal, torna-se necessário à obtenção de valores adequados aos parâmetros α e β . Para isso, é necessário que sejam estimados duas características particulares de um dado sinal vibratório: a média e a variância. A estimativa destes dois parâmetros estatísticos está baseada numa classe de métodos estatísticos denominada métodos estatísticos baseados em números.

Como o próprio nome sugere, esses métodos buscam estimar as propriedades estatísticas mediante um conjunto de valores obtidos do experimento em análise, tais estimativas são denominadas de estimativas amostrais.

Genericamente, suponha que é conhecido um conjunto de dados amostrais, referentes a um experimento, contendo n pontos com valores observados $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ referentes a uma certa variável aleatória X . Assim, a média amostral (ou média aritmética) deste conjunto de dados pode ser obtido pela seguinte equação:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6.47)$$

portanto, variável amostral $\bar{x}$ é uma estimativa para o momento de primeira ordem em torno da origem.

Analogamente, a variância amostral s^2 para este conjunto de dados pode ser obtida pela seguinte equação:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (6.48)$$

na qual s^2 é a melhor estimativa para σ^2 . Pode-se notar que, para um sinal vibratório, as estimativas amostrais $\bar{x}$ e s^2 podem ser facilmente calculadas.

Sendo $\bar{x}$ uma estimativa amostral para μ e s^2 para σ^2 , pode-se rescrever as equações 6.45 e 6.40 em função de $\bar{x}$ e s^2 , cujo resultado é apresentado pelas equações 6.49 e 6.50. Estas duas expressões possibilitam que valores adequados de α e β possam ser calculados.

$$\alpha = \frac{\bar{x}}{s^2} [(1 - \bar{x})\bar{x} - s^2] \quad (6.49)$$

$$\beta = \frac{(1 - \bar{x})}{s^2} [(1 - \bar{x})\bar{x} - s^2] \quad (6.50)$$

Para exemplificar o procedimento para a obtenção de uma FDP específica, foi calculado numericamente um sinal puramente senoidal contendo 1024 pontos, segundo a Eq. 6.51, na qual f é a frequência (cujo valor é de 2 Hz) e t é o tempo.

$$s(t) = 0.5 + 0.45 \sin(2\pi f t) \quad (6.51)$$

Inicialmente, por intermédio das equações 6.47 e 6.48 foram obtidos os valores estimados para a média $\bar{x}$ e variância s^2 , cujos valores são 0.5 e 0.10 respectivamente. A seguir por intermédio das equações 6.49 e 6.50 são calculados os valores de α e β , sendo ambos iguais a 0.74, por último, com base na Eq. 6.37, foi obtida a equação da FDP Beta específica deste sinal.

Graficamente, a Eq. 6.51 é apresentada na Figura 6.12a, seguida da FDP Beta correspondente à este sinal (Figura 6.12b), cuja forma é exatamente àquela apresentada anteriormente pela Figura 6.7. Esta FDP satisfaz a Eq. 6.24, pois $f(x)$ possui todos os valores maiores ou iguais a zero e a área abaixo desta curva possui valor unitário (calculado, área igual a 0.994), satisfazendo assim a Eq. 6.25.

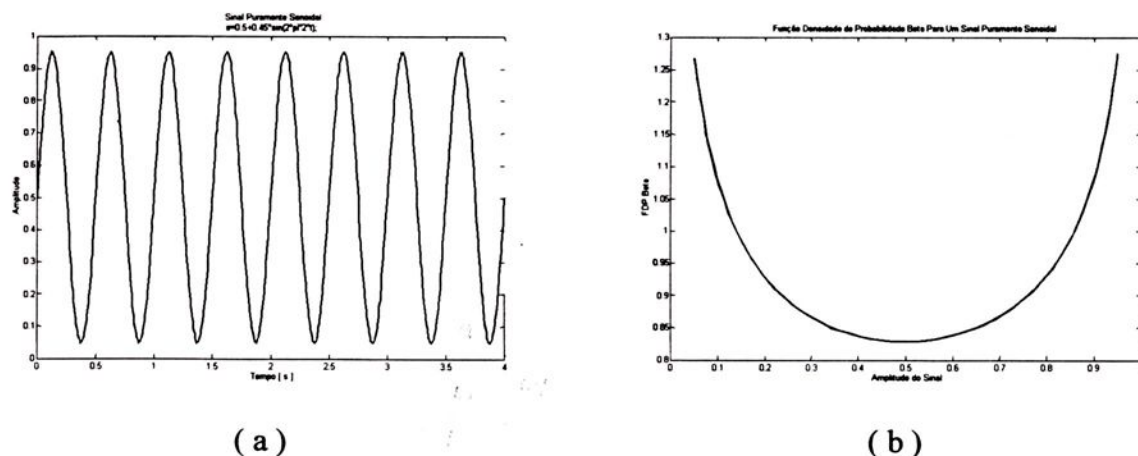


Figura 6.12: Figuras descritivas da obtenção de uma função densidade de probabilidade específica: (a) sinal puramente senoidal com 1024 pontos; (b) fdp Beta específica deste sinal, com $\alpha = \beta = 0.74$.

Assim, tomando-se por base um sinal de vibração, pode-se obter valores estimados para μ e para σ^2 , denominados $\bar{x}$ e s^2 , dos quais podem ser estimados os parâmetros α e β , que por sua vez podem ser utilizados na Eq. 6.37 obtendo-se assim uma função densidade de probabilidade específica para este sinal.

Com base no conhecimento desta função densidade de probabilidade Beta específica de um sinal, pode-se utilizar suas propriedades ou medidas para analisar e caracterizar um sinal de vibração, buscando principalmente detectar o surgimento e posteriormente o diagnóstico de alguma falha.

O item a seguir descreve detalhadamente todo o procedimento adotado nesta pesquisa para a análise, caracterização e diagnóstico de falhas em redutores de velocidade, que fundamentalmente utiliza as propriedades ou medidas de uma função densidade de probabilidade Beta.

6.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE SINAIS VIBRATÓRIOS, BASEADA NA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE BETA

Nos itens 6.2 e 6.3 foi demonstrado que um sinal pode ser inicialmente modelado como um espaço amostral contínuo, e posteriormente, pode ser caracterizado mediante uma função densidade de probabilidade específica, esta por sua vez pode ser medida por intermédio dos momentos estatísticos. Desta forma um sinal pode ser completamente descrito pelos momentos estatísticos. A Figura 6.13 apresenta as etapas descritas acima.

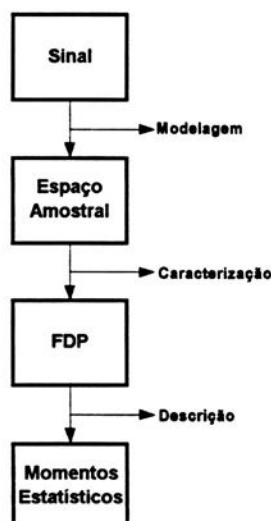


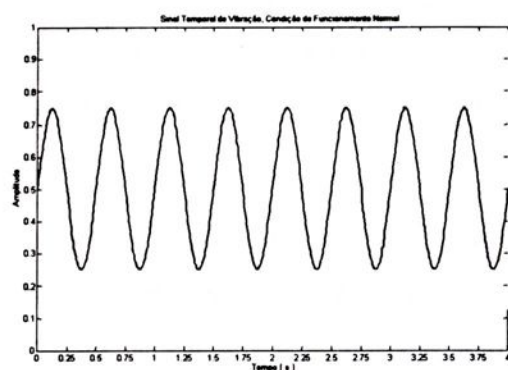
Figura 6.13: Etapas do Processo que envolve a descrição de um sinal.

Sinais vibratórios, após serem devidamente obtidos, condicionados, amplificados e gravados, o que pode ser feito tanto na forma analógica quanto na discreta, são processados para que suas principais características sejam obtidas. Na forma discreta o sinal apresenta-se como um conjunto de números devidamente ordenados, no qual o valor da propriedade física medida, amplitude, é conhecida em pontos específicos.

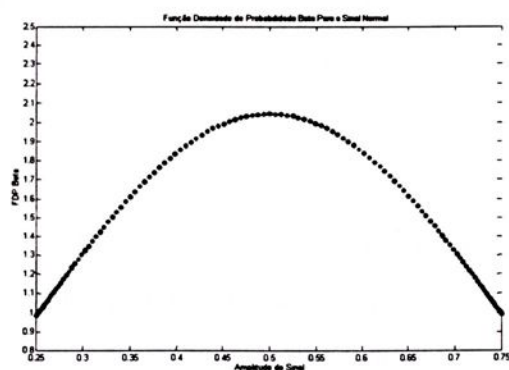
Desta forma, os sinais vibratórios resultantes de alguma máquina, são resumidos em um conjunto de números, e a variabilidade destes sinais vibratórios é representada pela distribuição do conjunto de números que o representa. Desta importante característica surgiu a análise estatística de sinais, que fundamentalmente está baseada no princípio que, a degradação de uma máquina irá alterar suas características vibratórias, que por sua vez irá alterar as características do conjunto de números que o representa, sendo que esta alteração é identificada pela análise estatística.

Como exemplo ilustrativo será considerado que a resposta vibratória de um determinado equipamento, quando em perfeito estado, seja o apresentado pela Figura 6.14a, o mesmo equipamento na presença de uma determinada falha, responde conforme apresenta a Figura 6.14c. Observando os dois sinais vibratório descritos, pode-se notar claramente que a presença da falha introduziu uma nova componente no sinal. Já as Figura 6.14b e Figura 6.14d, apresentam as FDP Beta para ambos os casos, sem defeito e com defeito, respectivamente. Comparando-se as duas funções densidade de probabilidade, pode-se notar visualmente a ocorrência de uma diminuição na amplitude da FDP quando o defeito está presente. Este exemplo demonstra que uma alteração causada no sinal vibratório é claramente refletida na FDP Beta correspondente.

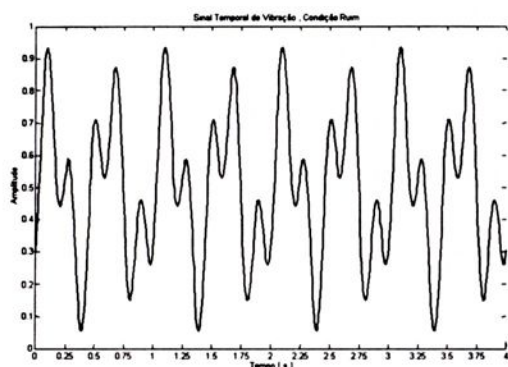




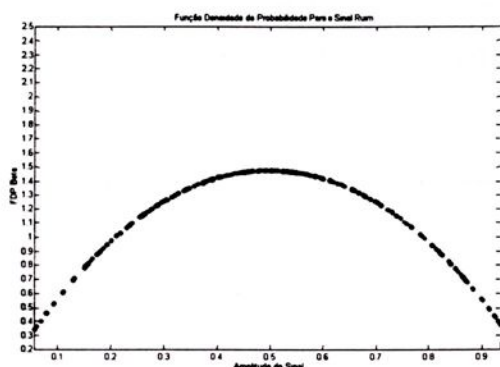
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.14: Figuras representativas de dois sinais vibratórios relativos ao mesmo equipamento: (a) sinal vibratório obtido sob condições normais; (b) FDP Beta representativa deste sinal; (c) sinal vibratório obtido sob condições com falha; (d) FDP Beta representativa deste sinal com falha.

Basicamente, existem três possibilidades de analisar um sinal vibratório estatisticamente. Neste trabalho de pesquisa, foram definidos nomes a cada um dos três tipos, o primeiro tipo foi denominado de Análise Histórica Global, o segundo de Análise Individual Histórica e o terceiro de Análise Individual Independente. Todos estes três tipos de análise têm como objetivo identificar o surgimento de uma anomalia no sinal, falha, e se possível realizar o diagnóstico desta anomalia. A seguir, as possibilidades de análise descritas são apresentadas individualmente.

Análise Histórica Global

Esta análise é caracterizada por ser a mais simples e trivial das três. Apesar disso, pode fornecer boas e precisas informações sobre o surgimento de alguma anomalia no sinal.

Fundamentalmente, está baseada no acompanhamento periódico do sinal vibratório proveniente do equipamento sob monitoramento, em que para cada inspeção é obtida uma FDP Beta representativa deste sinal que é posteriormente comparada com a FDP obtida anteriormente objetivando de observar alterações significativas na sua forma.

Felizmente, conforme descrito anteriormente, uma FDP pode ser medida e descrita por intermédio dos momentos estatísticos, assim, a comparação da condição do sinal deve ser realizada utilizando-se algum momento estatístico como parâmetro descritivo. Dentre estes, podem fornecer bons resultados o terceiro e quarto momentos tanto em relação à média quanto à origem. Este tipo de análise demonstra bem a capacidade de uma análise estatística, que é descrição e caracterização de um sinal por meio de um único número: momento estatístico.

O fluxograma descrito a seguir apresenta este procedimento, no qual foi inserida a fase de pré-processamento, freqüentemente necessária em um sinal de vibração.

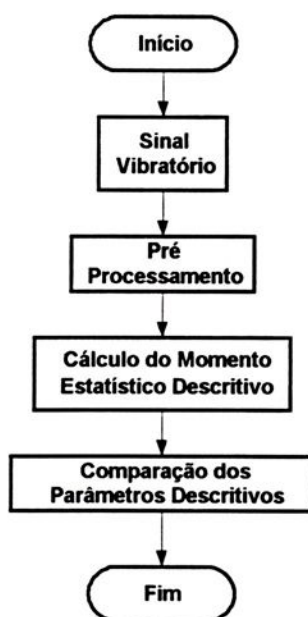


Figura 6.15: Etapas fundamentais da análise histórica global.

Análise Individual Histórica

Na análise histórica global, a obtenção do momento estatístico descritivo da condição do sinal é realizada tomando-se todos os pontos contidos no espaço amostral representativo deste sinal.

A análise individual histórica, fundamentalmente, difere-se da análise histórica global devido ao fato de ao invés de todo o espaço amostral de uma única vez, utilizar fatias devidamente divididas deste espaço amostral, em que cada fatia representa formalmente um subespaço amostral.

Uma vez que, cada sub-espaço amostral está formalmente definido, pode-se proceder a análise, que consiste na obtenção, para cada um dos sub-espacos amostrais, de um momento estatístico descritivo da sua condição. Posteriormente, é necessário que estes momentos sejam individualmente comparados a uma referência.

Tal referência, também é um momento estatístico e de mesma ordem, mas obtido de forma distinta. Para a sua obtenção, deve-se utilizar um espaço amostral completo, e mais, este deve ser representativo de um sinal de vibração obtido sob condições perfeitas de operação, ou seja, sem que o equipamento possua qualquer falha. Na prática esta referência deve ser obtida tomando-se por base o equipamento nos estágios iniciais de operação.

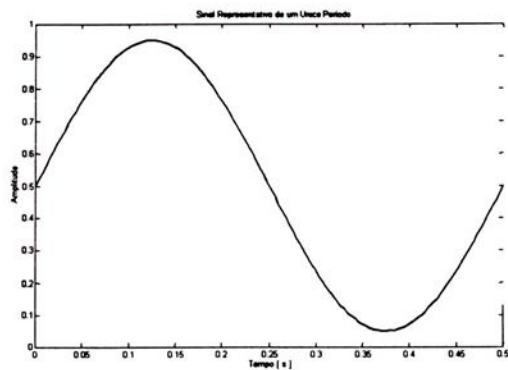
Deste modo, a análise individual histórica possui um objetivo bastante específico, que é, identificar ao longo de um sinal defeituoso, a presença de fenômenos transientes, e caso estes ocorram, indicar qual é a sua localização.

A análise estatística histórica está matematicamente fundamentada em uma característica relativa à função densidade de probabilidade, especificamente quando esta representa um sinal periódico^{**}. Neste caso, a função densidade de probabilidade obtida tomando-se por base um sinal periódico contendo vários períodos fundamentais, é a mesma que aquela obtida individualmente a um único período fundamental.

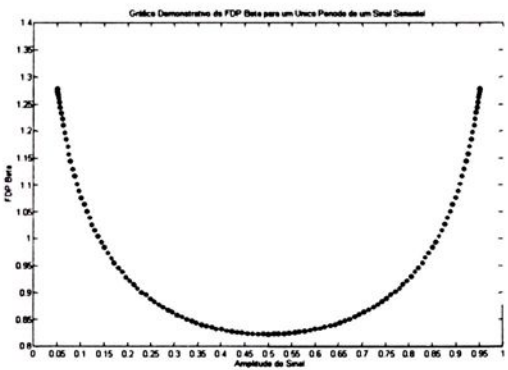
Para exemplificar esta importante característica, será considerado um sinal periódico senoidal, inicialmente contendo um único período $T = 0.5$ s, conforme apresenta a Figura 6.16a, sendo posteriormente obtida a FDP Beta representativa deste sinal, conforme apresenta a Figura 6.16b. A seguir, um novo sinal senoidal é gerado, sendo composto por quatro períodos $T = 0.5$ s idênticos, conforme apresenta a Figura 6.16c, seguido de sua FDP Beta Figura 6.16d.

^{**} Esta característica foi observada em varias simulações numéricas realizadas com vários tipos de sinais da classe periódico senoidal e periódico complexo.

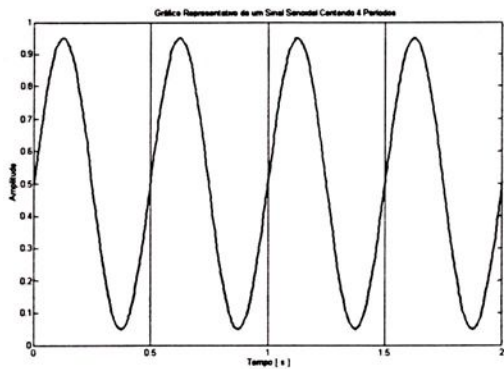




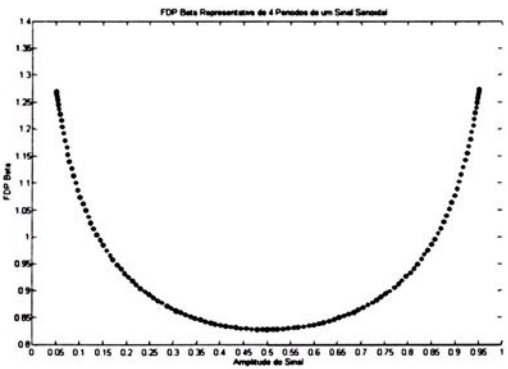
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.16: Demonstração do comportamento da FDP aplicada a sinais periódicos: (a) sinal senoidal periódico formado por um único período fundamental $T = 0.5$ s; (b) FDP Beta deste sinal; (c) sinal senoidal periódico formado por quatro períodos fundamentais $T = 0.5$ s, as linhas tracejadas separam os períodos; (d) FDP Beta deste sinal.

A Figura 6.17 apresenta as funções densidade de probabilidade sobrepostas, referentes a ambos os sinais descritos, na qual pode-se observar que praticamente não há distinção entre elas, o que demonstra a referida característica.

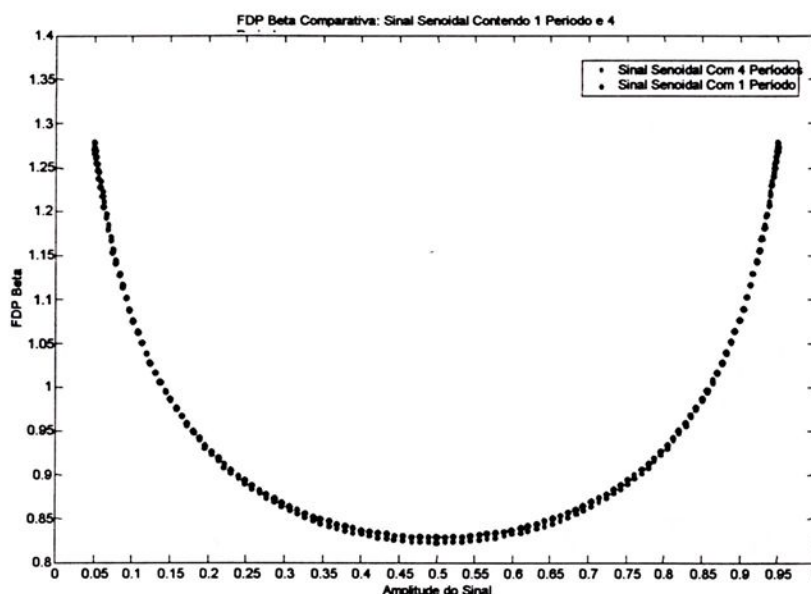


Figura 6.17: Etapas fundamentais da análise histórica global.

Assim, conforme demonstrado pelo exemplo acima, se um sinal com características periódicas, seja ela senoidal ou complexa, contendo vários períodos fundamentais de repetição for dividido de forma que, cada período fundamental forme um subespaço amostral, a função densidade de probabilidade de cada um desses subespaços amostrais, serão iguais entre si e entre a FDP obtida utilizando, de uma só vez, todo o período fundamental.

Portanto, se ocorrer alguma alteração em um ou mais destes subespaços, esta alteração será refletida na forma da FDP Beta, e conseqüentemente identificada pela comparação entre esta FDP e a FDP de referência. A Figura 6.18 descreve as etapas envolvidas neste procedimento.

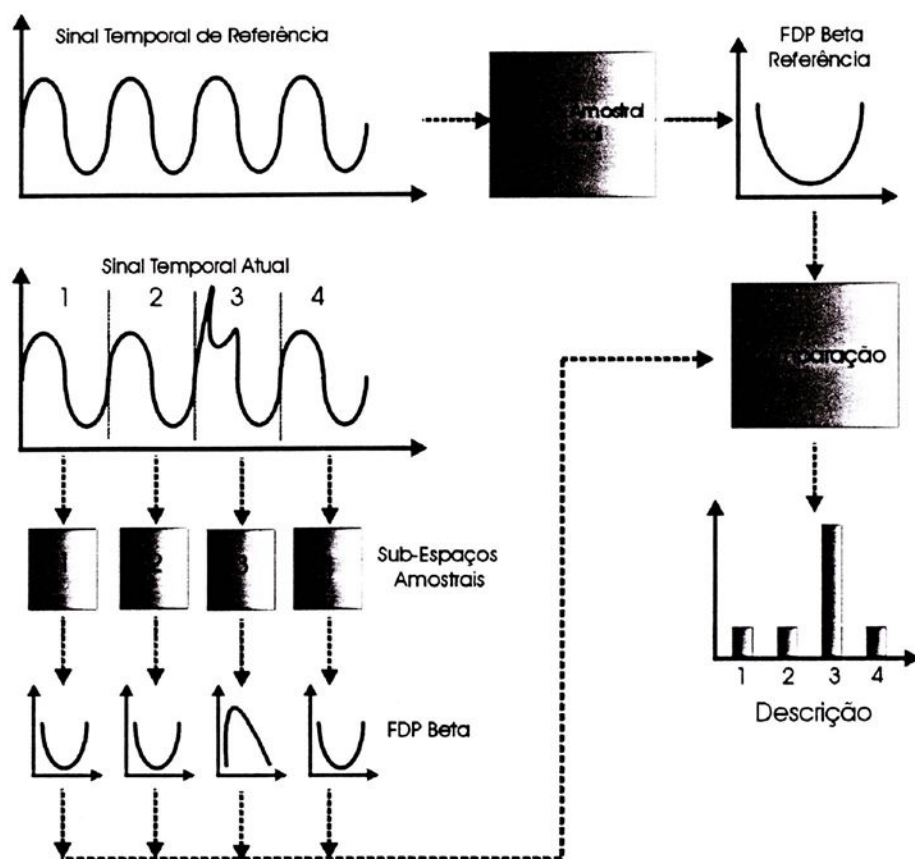


Figura 6.18: Descrição do procedimento utilizado na análise individual histórica.

6.7 Análise Individual Independente

Na análise histórica individual, a detecção de uma anomalia é realizada pela comparação, entre a FDP Beta representativa de um período fundamental do sinal atual e aquela representativa de todo o sinal de referência.

Mas, em algumas condições reais pode não ser possível a obtenção a priori da FDP de referência, por exemplo, quando o equipamento já está em operação a muitas horas antes de se iniciar o processo de monitoramento.

Buscando uma forma alternativa para a análise individual histórica, com o intuito de adequar às situações nas quais não há possibilidade de obter uma referência descritiva das condições presentes no equipamento quando novo, surge a análise individual independente.

Fundamentalmente, a análise individual independente, difere-se da análise individual histórica devido ao fato de utilizar, ao invés de uma FDP de referência, obtida tomando-se por base o sinal proveniente do equipamento novo, utiliza todo o espaço amostral do sinal a ser

analisado para gerar esta FDP de referência. O maior problema presente na FDP de referência obtida sob estas condições é a influência, de uma eventual anomalia, na sua forma, o que causaria uma atenuação na capacidade de identificação de fenômenos transientes. A Figura 6.19 descreve as principais etapas do procedimento para a realização desta análise.

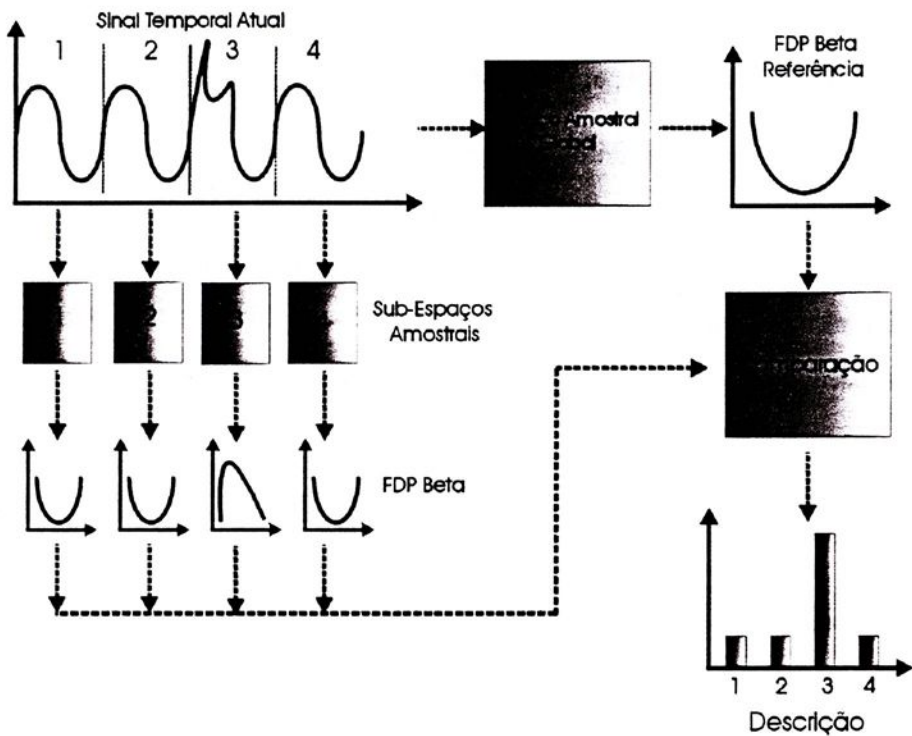


Figura 6.19: Descrição do procedimento utilizado na análise individual independente.

Neste item foram genericamente apresentadas, e detalhadamente descritas, três técnicas de análise de sinais vibratórios, baseadas nas características estatísticas da função densidade de probabilidade Beta.

No item a seguir, estas três técnicas de análise serão especificamente aplicadas na detecção e diagnóstico de falhas de redutores de velocidade que, em conjunto com um pré-processamento diferenciado do sinal, possibilitam que a detecção e diagnóstico de falhas deste equipamento seja possível, independentemente das condições de operação, ou seja, da rotação e torque demandado em cada momento de aquisição do sinal.

6.8 ANÁLISE HISTÓRICA GLOBAL, INDIVIDUAL HISTÓRICA E INDIVIDUAL INDEPENDENTE: APLICAÇÃO NA DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS

O objetivo final desta pesquisa consiste em desenvolver um procedimento ótimo para o diagnóstico e seguimento de um defeito importante em redutores de engrenagens, tal como, *pitting*, desgaste nos dentes, empenamento de eixo, desalinhamento ou danos pontuais no dentado, quando estes redutores estão sujeitos a variação de torque e/ou rotação entre os momentos de aquisição dos sinais para monitoramento.

Cada um dos possíveis defeitos que podem atingir um redutor de engrenagens, citados acima, possuem características individuais definidas, que foram detalhadamente descritas no capítulo 2. Por estas falhas se apresentarem de forma tão distinta, torna-se muito difícil que uma determinada técnica tenha capacidade de detectar e diagnosticar todos estes possíveis defeitos, assim uma técnica de análise pode identificar e diagnosticar melhor ou pior um determinado defeito.

Penter & Lewis (1990), desenvolveram um trabalho científico cujo objetivo foi a identificação da incidência destes possíveis defeitos nos redutores industrialmente ativos. O resultado obtido descreve que as falhas em redutores mecânicos ocorrem principalmente nas engrenagens com 60% das incidências, seguido pelas falhas nos rolamentos com 19%, nos eixos com 10%, caixas com 7%, fixações com 3% e nos retentores com 1%. Com base nestes resultados, optou-se em identificar falhas relativas ao engrenamento, pois é neste elemento mecânico que surge a maior incidência de falhas.

Conforme descrito no capítulo 2, os danos que podem ocorrer em uma engrenagem são basicamente relativos ao corpo da engrenagem, tais como, desalinhamento e excentricidade, e os danos pontuais no dentado, tais como, *pitting*, trincas ou quebra do dente. Os danos referentes ao dentado são muito mais sérios e podem desencadear consequências catastróficas, principalmente se algum dente vier a quebrar, o que poderia levar o redutor a parar de transmitir movimento e conseqüentemente parar o processo acoplado a ele. Por esses motivos, optou-se em identificar os danos presentes no dentado.

Para que o objetivo final desta pesquisa fosse alcançado, o tipo de defeito pontual a ser estudado teria que permanecer constante, ou seja, este não poderia evoluir no decorrer dos ensaios, pois caso isso viesse a ocorrer, não haveria como identificar se as mudanças do sinal vibratório foram decorrentes da variação da potência ou da evolução do defeito. Assim, o único



tipo de dano pontual que satisfaz esse requisito é a quebra total do dente, já que este defeito encontra-se totalmente evoluído. Portanto, o tipo de defeito a ser identificado será a quebra total de um dos dentes que compõe o dentado.

Redutores mecânicos de engrenagens, em razão da sua própria concepção mecânica que inclui eixos, rolamentos, engrenagens, dentre outros elementos mecânicos, produz um sinal de vibração bastante rico em número de componentes. Essa diversidade adicionada de um certo nível de ruído aleatório dificulta consideravelmente o seu monitoramento e análise. Por este motivo, a primeira fase do procedimento, que busca atingir o objetivo final proposto por este trabalho, consiste no pré-processamento do sinal vibratório proveniente de um redutor de engrenagem.

Pré-Processamento do Sinal de Vibração

Com o objetivo de simplificar o sinal vibratório proveniente de seu funcionamento, vários pesquisadores (Mcfadden, 1987a; Mcfadden, 1987b; SKF, 1996) utilizaram técnicas de processamento para a obtenção de um sinal vibratório com pouco ruído aleatório e sem a presença de componentes não síncronas com o giro da engrenagem, tais técnicas são denominadas pré-processamento.

A técnica de pré-processamento mais utilizada e provavelmente a que apresenta melhores resultados é a média temporal síncrona, descrita no item 3.1 (*Time Synchronous Average TSA*), pois possibilita que a assinatura de qualquer engrenagem que compõe o redutor seja extraída precisamente tomando-se por base, o sinal vibratório total do redutor, além de reduzir fortemente o nível de ruído aleatório.

Muitas vezes a média temporal síncrona ainda apresenta componentes que eventualmente não trazem informações importantes sobre o tipo de análise a ser desenvolvida. No caso desta pesquisa, as componentes de baixa frequência não trazem informações importantes sobre a condição do engrenamento. A maneira clássica de eliminar tais componentes indesejáveis de um sinal é mediante o emprego de filtros digitais, tais como os da classe IIR (*Infinite Impulse Response*) Butterworth, Chebyshev tipo I e II e Elípticos, bastantes eficazes é amplamente utilizados.



Como resultado final da média temporal síncrona e posterior filtragem específica, o sinal resultante contém apenas as componentes vibratórias referentes à apenas uma engrenagem.

Para finalizar o procedimento, deve ser obtido o sinal vibratório referente a um giro desta engrenagem, o que é facilmente extraído do sinal total, com base no sinal de referência, proveniente do *trigger*. A Figura 6.20 apresenta as etapas envolvidas no processo de pré-processamento.

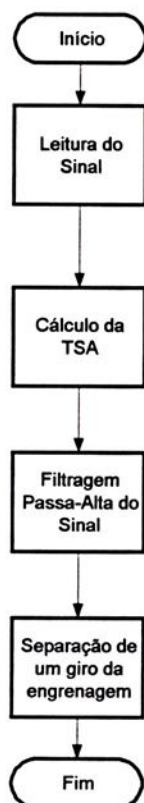


Figura 6.20: Descrição do procedimento de pré-processamento do sinal vibratório.

No capítulo 8, é apresentada cada uma das fases envolvidas no pré-processamento do sinal, exemplificadas segundo sinais de vibração reais.

A segunda fase do procedimento, que busca atingir o objetivo final proposto por este trabalho consiste na normalização do sinal de vibração pré-processado para minimizar a influência da variação de potência sobre o sinal e possibilitar que a função densidade de probabilidade Beta seja utilizada, pois esta FDP é definida no intervalo de amplitudes entre 0 e 1, conforme indica a Eq. 6.37.

Normalização do Sinal de Vibração Pré-Processado

É conhecido que as estruturas das máquinas, excitadas pelos esforços dinâmicos decorrentes de seu funcionamento, respondem com sinais vibratórios cuja frequência é idêntica àquela dos esforços que as provocam, e cuja amplitude é função da intensidade destes esforços.

Portanto, as condições dinâmicas de operação influenciam na resposta vibratória de um redutor de velocidade, além disso, essas respostas vibratórias podem ser classificadas em:

- **Linear:** este tipo de resposta vibratória respeita o princípio da superposição, que pode ser compreendido quando duas excitações são aplicadas simultaneamente ao sistema. Dado que o sistema responde a uma excitação $x_1(t)$ com uma saída $y_1(t)$, e para $x_2(t)$ com $y_2(t)$, a superposição se mantém quando é aplicado uma excitação $ax_1(t) + bx_2(t)$ e é obtido uma resposta $ay_1(t) + by_2(t)$ para todo valor constante a, b .
- **Não-Linear:** quando o princípio da superposição não for satisfeito, a resposta é dita por definição, não-linear.

Vários pesquisadores (Theodossiades et al., 1999; Parker et al., 2000) estudaram o comportamento e desenvolveram modelos matemáticos para diversas condições de não linearidades, principalmente às não linearidades relativas a rigidez de engrenamento, objetivando prever o comportamento dinâmico de redutores com tais características.

Em virtude dos fatos, sucintamente descritos acima, o monitoramento de redutores de velocidade submetido a condições de operação variáveis é extremamente difícil, pois a cada condição de operação diferente, a resposta vibratória também será diferente. A Figura 6.21 fornece uma pequena amostra desse comportamento, sendo no capítulo 8 mais detalhadamente apresentado.

Os sinais vibratórios reais descritos na Figura 6.21, foram obtidos absolutamente sob as mesmas condições e utilizando os mesmos equipamentos, a exceção da potência envolvida, e demonstra claramente as alterações sofridas no comportamento dinâmico do redutor devido à variação de potência, tal como, um considerável aumento da amplitude do sinal.



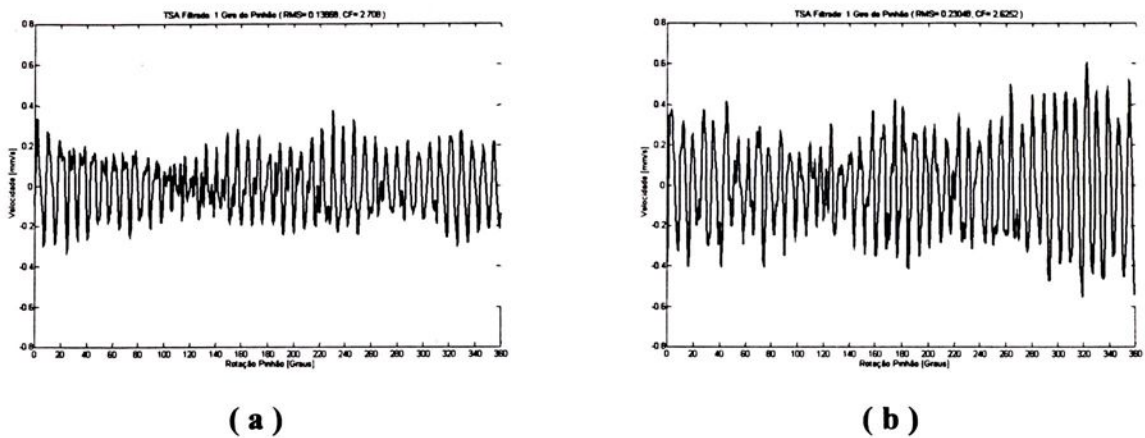


Figura 6.21 - Resposta vibratória real de um redutor de velocidade em perfeitas condições após as fases de pré-processamento: (a) potência operacional de 166 W; (b) potência operacional de 254 W

Uma forma de tratar os sinais vibratórios, obtidos de um redutor de velocidade submetido à variações de potência, com o objetivo de minimizar as consequências desta alteração, pode ser obtida com base na normalização do sinal mediante algum parâmetro adequado.

Após varias simulações e análises, o parâmetro encontrado, que satisfaz as condições necessárias foi o valor RMS. Além de mundialmente reconhecido e empregado como indicador de severidade, sua unidade é expressa na mesma unidade do sinal, como por exemplo, mm/s ou m/s², assim, a razão entre o sinal é o parâmetro RMS resulta em um sinal adimensional.

Para exemplificar o resultado obtido quando um sinal qualquer é dividido pelo seu valor RMS, considere um sinal simples puramente senoidal, conforme apresenta a Eq. 6.52, na qual A representa a amplitude do sinal, f a frequência e t o tempo.

$$s(t) = A \sin(2\pi f t) \tag{6.52}$$

É conhecido que, para um sinal simples puramente senoidal, seu valor RMS é igual a 0.707 vezes o valor de sua amplitude (McConnell, 1995), assim, para o sinal descrito pela Eq. 6.52 temos:

$$RMS = 0.707 A \tag{6.53}$$

Se dividirmos o sinal descrito pela Eq. 6.52 pelo seu valor RMS, Eq. 6.53, obten-se o seguinte resultado

$$\frac{s(t)}{RMS} = \frac{A \sin(2\pi f t)}{0.707 A} = \sqrt{2} \sin(2\pi f t) \tag{ 6.54 }$$

A Eq. 6.54 apresenta um importante resultado obtido quando se divide um sinal senoidal simples pelo seu valor RMS, que é a total independencia da amplitude do sinal, ou seja, qualquer que seja o valor da amplitude do sinal A o resultado da amplitude final será sempre igual a $\sqrt{2}$. A Figura 6.23 apresenta graficamente este resultado.

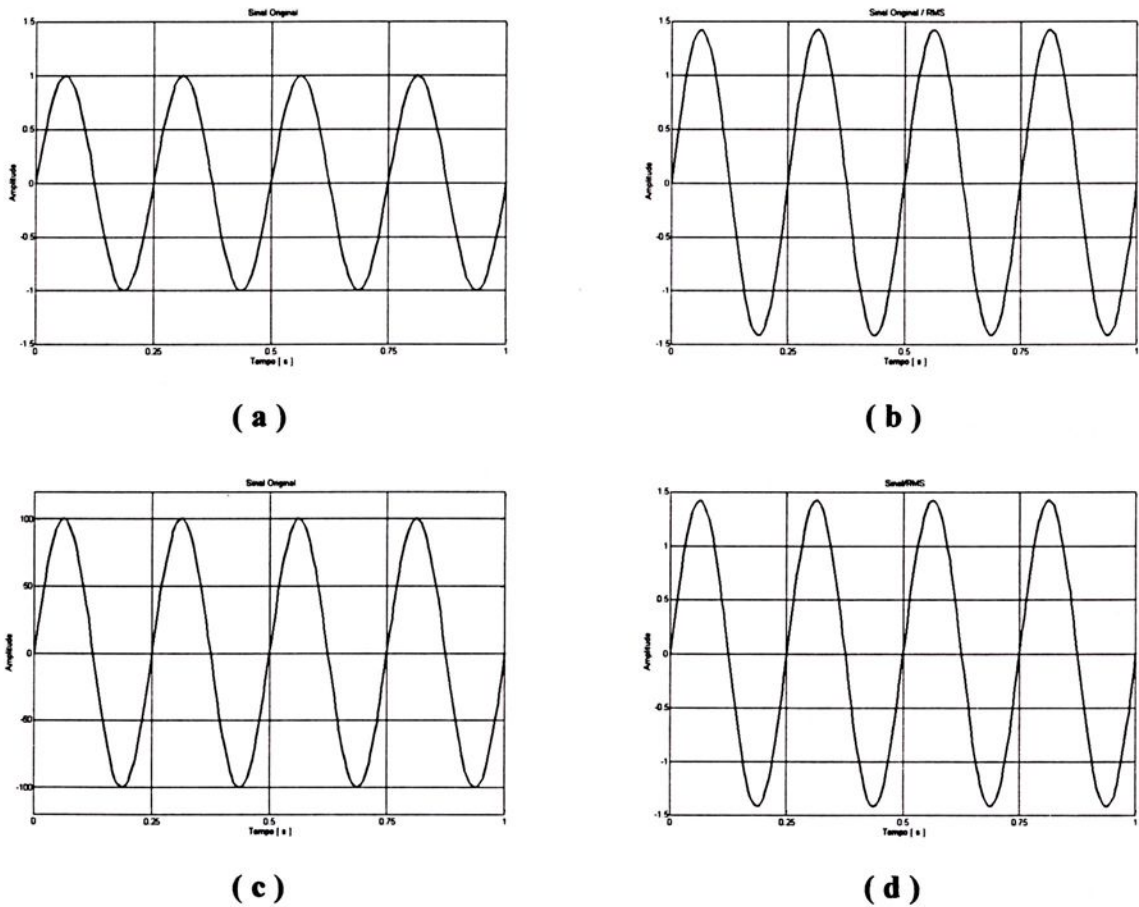


Figura 6.22 - Sinal puramente senoidal: (a) sinal senoidal com amplitude unitária; (b) sinal senoidal com amplitude unitária dividido por seu valor RMS (0.704); (c) sinal senoidal com amplitude igual a cem; (b) sinal senoidal com amplitude igual à cem dividido por seu valor RMS (70.4). Pode-se notar que as figuras (b) e (d) são exatamente iguais.

Supondo-se que o sinal $s(t)$ é composto por três componentes senoidais, tal como apresenta a Eq. 6.55, na qual B_1, B_2, B_3 são as amplitudes individuais de cada componente, f_1, f_2, f_3 as frequencias em Hz e A é um amplificador/atenuador global de amplitude.

$$s(t) = A [B_1 \sin(2\pi f_1 t) + B_2 \sin(2\pi f_2 t) + B_3 \sin(2\pi f_3 t)] \tag{ 6.55 }$$

Para o sinal descrito pela Eq. 6.55, seu valor RMS é igual a uma constante c vezes o valor de A , assim temos:

$$RMS = cA \quad (6.56)$$

Realizando o mesmo procedimento, temos:

$$\frac{s(t)}{RMS} = c [B_1 \sin(2\pi f_1 t) + B_2 \sin(2\pi f_2 t) + B_3 \sin(2\pi f_3 t)] \quad (6.57)$$

Que analogamente, elimina o fator de amplificação/atenuação A do sinal. Numericamente, atribuindo os seguintes valores para as variáveis descritas pela Eq. 6.55,

▪ $f_1 = 2 \text{ Hz}$	▪ $B_1 = 5$
▪ $f_2 = 5 \text{ Hz}$	▪ $B_2 = 3$
▪ $f_3 = 7 \text{ Hz}$	▪ $B_3 = 1$

atribuindo inicialmente, $A = 1$, temos que o valor $RMS = 4.167$ e consequentemente $c = 4.167$. Para $A = 100$, $RMS = 416.7$. Graficamente, estas duas condições são apresentadas na Figura 6.23.

Importando os fundamentos obtidos no exemplo descrito acima para o caso de um redutor de velocidade, pode-se realizar a seguinte analogia: sabemos que o sinal de vibração total proveniente de um redutor é formado por varias componentes e também é conhecido, e demonstrado pela Figura 6.21, que a resposta vibratória depende das condições de potência envolvidas. Desta forma, a resposta vibratória poderia ser descrita analogamente como a Eq. 6.55 (com mais ou menos componentes) na qual o fator de amplificação/atenuação A , representa a variação da potência.

Assim, para um comportamento linear, um aumento da potência seria refletido igualmente na amplitude de cada uma das componentes vibratórias, sendo descrito pelo aumento do fator A , analogamente o mesmo aconteceria para uma diminuição da potência. Portanto, a divisão do sinal pelo seu valor RMS eliminaria a variação em amplitude causada pela variação da potência e dessa forma seria alcançada a independencia da potência, que é o alvo da normalização.

Outra característica importante da normalização por intermédio do valor RMS consiste em não afetar individualmente cada uma das componentes do sinal, assim havendo uma variação relativa entre elas, tal como ocorre na evolução de um defeito, este efeito estará preservado.

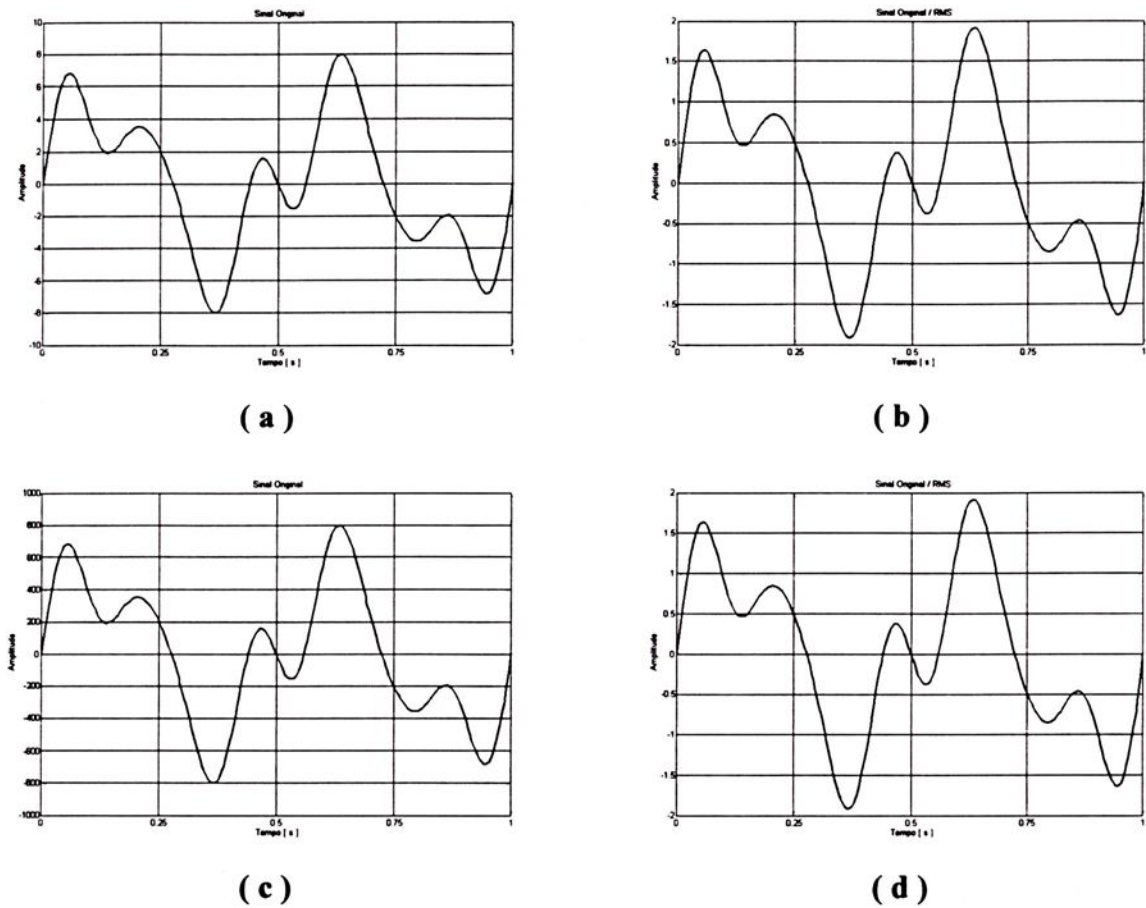


Figura 6.23 - Sinal senoidal composto por três componentes: (a) sinal com fator de ampliação A unitário; (b) sinal senoidal com amplitude unitária dividido por seu valor RMS (4.167); (c) sinal senoidal com fator de amplificação A igual a cem; (d) sinal senoidal com fator de amplificação A igual a cem dividido por seu valor RMS (416.7). Pode-se notar que as figuras (b) e (d) são exatamente iguais.

A segunda normalização necessária deve-se à função densidade de probabilidade Beta. Por definição, a FDP Beta está definida apenas para os valores da variável aleatória entre 0 e 1. Portanto para que esta FDP seja obtida, é necessário que a amplitude do sinal vibratório esteja contido no intervalo (0,1).

Essa normalização pode ser facilmente realizada da seguinte maneira: inicialmente é calculado o valor absoluto do sinal vibratório, obtendo-se assim apenas valores maiores ou iguais a zero, a seguir soma-se 3% do valor da maior amplitude do sinal à todos os pontos do sinal, obtendo assim somente valores maiores que zero, por último divide-se o sinal resultante por uma constante varias vezes maior que a maior das amplitudes presentes no sinal.

A Figura 6.24 apresenta todas as etapas envolvidas na normalização do sinal vibratório.

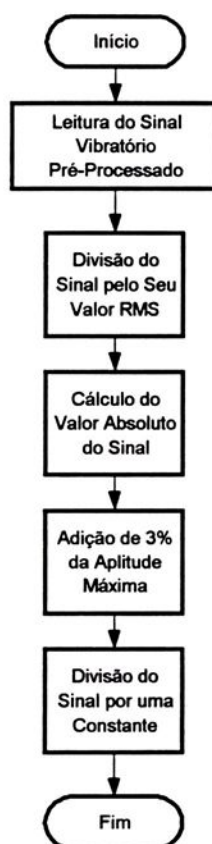


Figura 6.24: Descrição do procedimento de normalização do sinal vibratório.

Desta forma, após as etapas descritas, o sinal vibratório está pronto para ser analisado estatisticamente, conforme será apresentado a seguir.

6.9 DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS NO DENTADO: APLICAÇÃO DA ANÁLISE HISTÓRICA GLOBAL, INDIVIDUAL HISTÓRICA E INDIVIDUAL INDEPENDENTE

Antes que as análises estatísticas, sejam efetivamente aplicadas aos sinais de vibração, pré-processados e normalizados, cujo o objetivo é detectar e diagnosticar uma falha no dentado, é necessário primeiramente a compreensão do processo dinâmico envolvido na transmissão do movimento entre um par engrenado, que resulta na formação da principal e mais importante componente presente no sinal vibratório, denominada frequência de engrenamento, que traz consigo informações vitais sobre a qualidade do engrenamento.

Dinâmica do Acoplamento: Formação da Frequência de Engrenamento

Engrenagens rígidas, compostas por dentes envólutos perfeitamente espaçados uns aos outros, transmitem o movimento angular de maneira uniforme. A perda de uniformidade na transmissão do movimento angular, presente nas engrenagens reais, resulta em uma excitação dinâmica ou fonte de ruído, denominada frequência de engrenamento.

A frequência de engrenamento é causada por diversos fatores, dentre os quais, destacam-se a variação temporal da rigidez total do engrenamento em razão da alteração do número de dentes elásticos simultaneamente em contato e os erros geométricos, geralmente originários do processo de fabricação da engrenagem, que normalmente se apresentam como erros no espaçamento entre os dentes, no perfil envólucro e no ângulo de hélice. Todos esses erros são genericamente denominados erros de transmissão.

Durante o processo de engrenamento entre duas engrenagens denominadas i e j , a força total transmitida $Q^{ij}(t)$ apresentada pela Eq. 6.58 é formada por duas componentes, uma componente estática $\bar{Q}^{ij}$ em razão do carregamento médio transmitido e uma componente dinâmica, $Q_m^{ij}(t)$ devido à perda de uniformidade de transmissão do movimento angular (Blankenship, 1995).

$$Q^{ij}(t) = \bar{Q}^{ij} + Q_m^{ij}(t) \quad (6.58)$$

A componente dinâmica $Q_m^{ij}(t)$ é por sua vez formada por outras duas componentes, a componente conservativa ou elástica $Q_{me}^{ij}(t)$ e a componente dissipativa $Q_{md}^{ij}(t)$ que representa as forças não conservativas originadas de vários fatores, tais como, efeitos de lubrificação, atrito entre outros, sendo seus mecanismos até hoje pouco entendidos, conforme apresenta a Eq. 6.59.

$$Q_m^{ij}(t) = Q_{me}^{ij}(t) + Q_{md}^{ij}(t) \quad (6.59)$$

A componente elástica $Q_{me}^{ij}(t)$, por sua vez, é descrita segundo a lei de Hook, sendo apresentada pela Eq. 6.60, na qual $K^{ij}(t)$ é a rigidez do engrenamento e $e^{ij}(t)$ representa os erros de transmissão (Blankenship, 1995).



$$Q_{me}^{ij}(t) = K^{ij}(t) e^{ij}(t) \quad (6.60)$$

Assim, um modelo vibratório bastante simplificado para um par de engrenagens helicoidais é apresentado pela Figura 6.25, na qual as engrenagens são denominadas i e j , T é o torque, R é o raio, θ é o ângulo, $K(t)$ rigidez do engrenamento, $e(t)$ são os erros de transmissão e $C(t)$ o amortecimento.

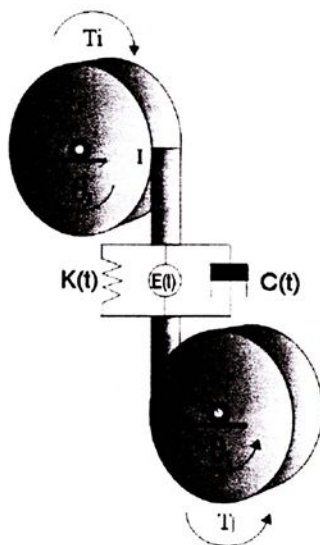


Figura 6.25: Modelo dinâmico simplificado de um par engrenado.

Tomando-se por base modelo dinâmico descrito acima e a Eq. 6.58, pode-se escrever a equação diferencial que rege o movimento, Eq. 6.61, na qual m (Kg) é a massa equivalente do par de engrenagens i e j , $K^{ij}(t)$ é a rigidez do engrenamento, $C^{ij}(t)$ é o amortecimento do engrenamento, $\bar{Q}^{ij}$ é o carregamento médio transmitido e $e^{ij}(t)$ representa os erros de transmissão.

$$m\ddot{x} + C^{ij}(t)\dot{x} + K^{ij}(t)x = \bar{Q}^{ij} + K^{ij}(t)e^{ij}(t) \quad (6.61)$$

Também, com base no modelo dinâmico, podem ser obtidas as relações descrita pela Eq. 6.62, na qual R é o raio da engrenagem, θ deslocamento angular e I é o momento de inércia.

$$x = R_i\theta_i - R_j\theta_j$$

$$m = \frac{I_i I_j}{(I_i R_j^2 + I_j R_i^2)} \quad (6.62)$$

$$\overline{Q}^{ij} = \frac{T_i}{R_i} = \frac{T_j}{R_j}$$

Conforme citado acima, $e^{ij}(t)$ representa os erros de transmissão os quais são periódicos com o tempo e cuja frequência é dada pela multiplicação do número de dentes pela frequência de rotação da engrenagem, denominada f_m . Sendo A_e a amplitude da excitação causada pelos erros de transmissão, a Eq. 6.61 pode ser reescrita, de maneira simplificada, como:

$$m\ddot{x} + C^{ij}(t)\dot{x} + K^{ij}(t)x = \overline{Q}^{ij} + K^{ij}(t) A_e \sin(2\pi f_m t) \tag{6.63}$$

Outro parâmetro de extrema importância é a rigidez do engrenamento, cuja forma pode ser descrita, para um par engrenado helicoidal, em função da razão de contato ϵ_c e pela razão de sobreposição ϵ_o . A Figura 6.26 apresenta a forma da rigidez para um único par de dentes.

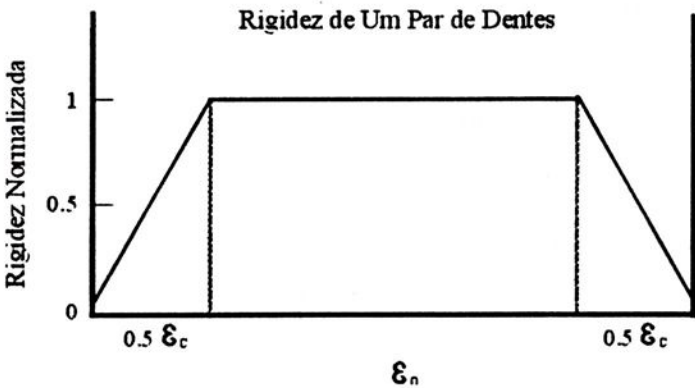


Figura 6.26: Rigidez de um par de dentes.

Para a obtenção da resposta do sistema descrito na Figura 6.25 foi utilizado um método numérico para resolução de equações diferenciais baseado no algoritmo de Adams-Bashforth-Moulton por se tratar de um algoritmo de passo variável, podendo assim se tornar mais eficiente.

O equipamento utilizado pelo Laboratório de Vibrações do DEM/FEIS possui uma frequência de amostragem f_a máxima de 30kHz e sendo esse o valor adotado nessa simulação. Com base na frequência de amostragem, os demais parâmetros necessários podem ser obtidos.

O intervalo de tempo dt é descrito pela seguinte equação:

$$dt = \frac{1}{fa} \tag{6.64}$$



Para um único giro [rpm] da engrenagem a ser simulada (coroa), o tempo total de amostragem tt é dado por:

$$tt = \frac{60}{\text{giro}} \quad (6.65)$$

Conseqüentemente, sendo conhecido o tempo total de aquisição e o intervalo de tempo, dt , pode-se obter o número de pontos np presentes no sinal.

$$np = \frac{tt}{dt} + 1 \quad (6.66)$$

Estando definido os parâmetros relativos à aquisição, foram definidas as seguintes características ao par engrenado apresentado pela Figura 6.25.

- Número de dentes da engrenagem i : 10
- Número de dentes da engrenagem j : 20
- Rotação nominal da engrenagem i : 1800 rpm (30 Hz)
- Rotação nominal da engrenagem j : 900 rpm (15 Hz)
- Fator de Redução: 2:1
- Massa (m): 2.8 Kg
- Rigidez do Engrenamento (K) Máxima: 7.29e7 N/m
- Fator de Amortecimento (C): 5.15e4 N/(m.s)

Tomando-se por base as equações 6.64, 6.65 e 6.66, foram obtidos os fatores necessários para a realização da simulação, os quais estão apresentados abaixo:

- Tempo Total (tt) = 0.0666 s
- Intervalo de Tempo (dt) = 0.0000333333 s
- Número de Pontos (np) = 2048 pontos
- Frequência de Amostragem (fa) = 30 kHz

A Figura 6.27 apresenta o resultado obtido, utilizando os valores acima citados.

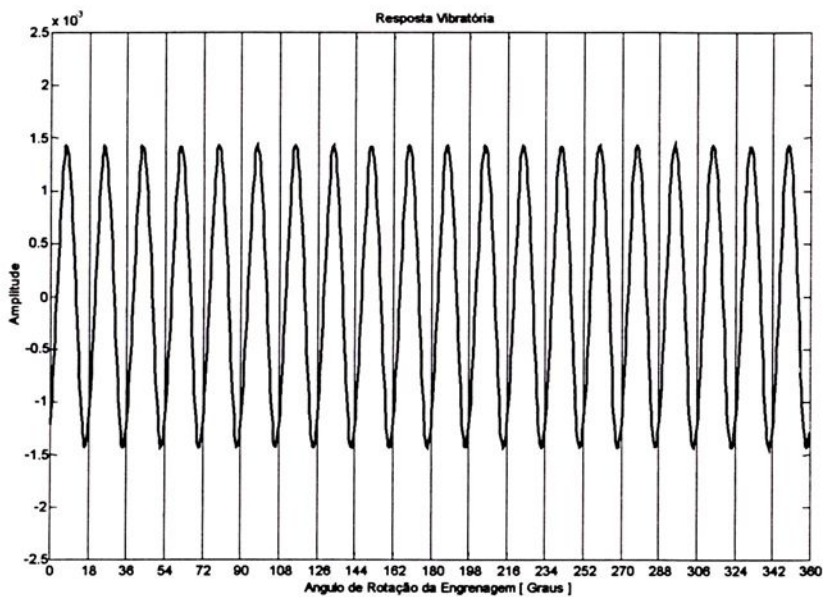


Figura 6.27: Resposta vibratório do par engrenado, em perfeito estado, apresentado pela Figura 6.25. As linhas tracejadas separam o período de engrenamento individual de cada um dos 20 dentes.

É bem estabelecido que as alterações provocadas devidos a danos pontuais afetam a rigidez do engrenamento $K_{ij}(t)$ relativa ao dente contendo a falha. Tais alterações podem ocorrer de duas maneiras: por modificações em fase e em amplitude da rigidez. A consequencia de tais alterações, é a mudança, tanto em fase quanto em amplitude do padrão de vibração, durante o período de operação do dente defeituoso. A Figura 6.28 apresenta este comportamento, na qual a rigidez relativa ao dente 10 foi reduzida em 30%.

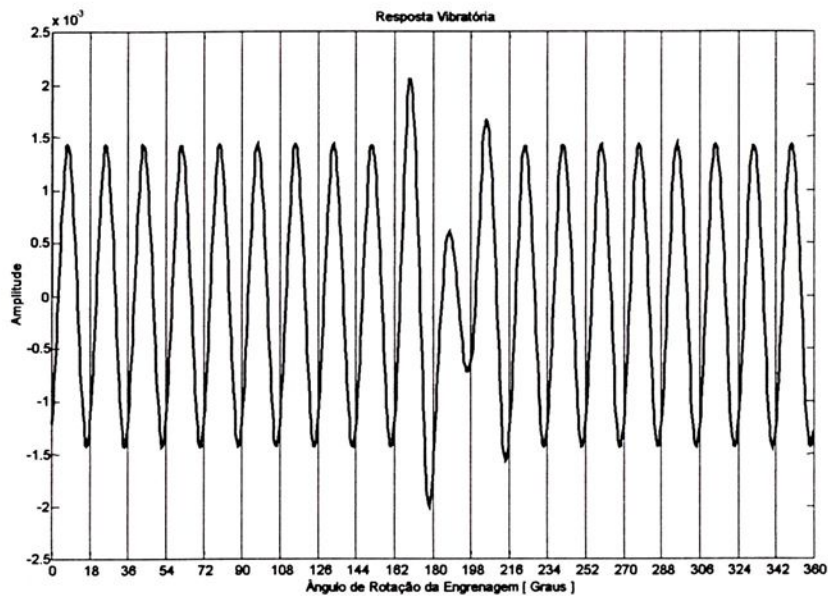


Figura 6.28: Resposta vibratório do par engrenado, com uma falha pontual no dente 10. As linhas tracejadas separam o período de engrenamento individual de cada um dos 20 dentes.

A compreensão dos mecanismos envolvidas na dinâmica do acoplamento são de vital importância no entendimento do comportamento da resposta vibratória de um redutor de engrenagens.

Assim, com base no conhecimento da resposta fornecida pelo redutor, devido à excitação provocada pela perda de uniformidade da transmissão do movimento angular e, a alteração causada pela variação da rigidez de engrenamento de um único dente, as análises estatísticas podem ser devidamente aplicadas e entendidas.

Análise Histórica Global

Após a realização da etapa de pré-processamento de um sinal vibratório real, o resultado obtido contém apenas as componentes relativas ao engrenamento. Uma importante qualidade do pré-processamento é que independentemente das condições operacionais, condições de defeito ou qualquer outro fator, o sinal sempre irá formar, da mesma maneira, um espaço amostral representante do processo de engrenamento ao longo de um único giro da engrenagem em análise, assim formando sempre um mesmo espaço amostral, mas cada um possui seus próprios elementos.

Já foi apresentado e detalhadamente exemplificado, que alterações sofridas pelos elementos que constituem um espaço amostral irá causar uma modificação na forma da sua função densidade de probabilidade.

Para identificar tais alterações, será utilizado como parâmetro descritor o quarto momento em relação à origem, o qual será simplesmente denominado de M4GLOBAL, sendo obtido pela Eq. 6.46.

Análise Histórica Individual

Conforme observado acima, na figura Figura 6.27, a resposta vibratória em virtude do processo de engrenamento é formado por varias respostas individuais de forma sequencial, que totalizam a resposta. Cada uma dessas respostas individuais são referênte a cada um dos pares de dentes engrenados, sendo que frequentemente pode ocorrer mais de dois dentes em participando do engrenamento.

Graças a esta característica, a análise histórica individual pode ser desenvolvida, bastando para isso que o período correspondente ao engrenamento de um par engrenado seja tomado individualmente, assim formando um sub-espaço amostral.

Da mesma maneira que a utilizada na análise histórica global, o quarto momento em torno da origem será utilizado como parâmetro descritor da forma da função densidade de probabilidade, sendo que, neste caso será denominado de HMM4.

Análise Individual Independente

Esta análise segue a mesma filosofia que a análise histórica independente, na qual a única diferença é a função densidade de referência. Também para esse caso, o quarto momento em torno da origem será utilizado como parâmetro descritor da forma da função densidade de probabilidade, sendo que, neste caso será denominado de IMM4.





RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de se verificar o comportamento da técnica proposta na identificação de uma falha no dentado quando a potência demandada de um redutor mecânico for diferente em cada instante de aquisição de dados, foi construída uma bancada experimental na qual é possível se variar a potência demandada ao redutor mantendo a rotação constante, ou manter o torque demandado constante e se variar a rotação. Em adição, após a realização de ensaios com o par engrenado em boas condições, se pode introduzir um defeito no dentado e ensaiá-lo para as mesmas condições de potência feitas anteriormente.

7.1 BANCADA EXPERIMENTAL

O sistema mecânico utilizado na realização dos experimentos foi projetado e construído especialmente para este trabalho, visando garantir uma boa flexibilidade, repetibilidade e representatibilidade de suas condições operacionais. As condições operacionais requeridas para a investigação proposta implicam que o sistema mecânico tenha capacidade de variar univocamente tanto a rotação quanto o torque atuante no sistema. Para garantir que estas condições operacionais fossem satisfeitas, adotou-se a configuração modular representada pela Figura 7.1.

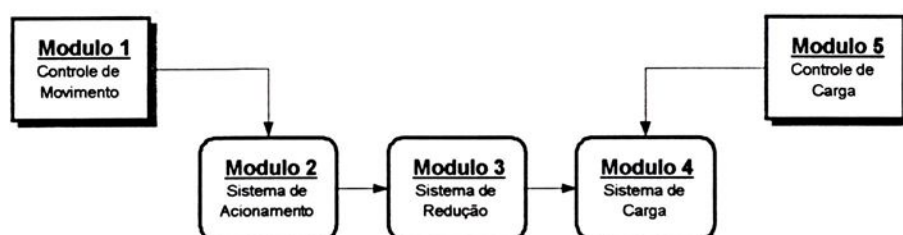


Figura 7.1 - Configuração modular adotada na bancada experimental.

- **Módulo 1:** responsável pelo controle do movimento, é composto por um inversor de frequência trifásico modelo CFW-07 de fabricação WEG, com faixa de atuação de 0 à 65 Hz. Este módulo possibilita que a rotação (síncrona) atuante no sistema global oscile entre 0 à 1950 rpm.
- **Módulo 2:** responsável pela geração do movimento, é composto por um motor elétrico de indução trifásico (220/380 V), de fabricação WEG, modelo FH 64470, rendimento 79.3%, cuja rotação e potência nominal são respectivamente, 1710 rpm e 2.2 KW (3.0 cv).
- **Módulo 3:** composto por um redutor mecânico de engrenagens helicoidais, de fabricação Cestari, modelo HS 0, contendo um único par engrenado, cujo pinhão e coroa possuem respectivamente 44 e 95 dentes, fator de redução de 2.16 e potência máxima admissível de 5.5 cv.
- **Módulo 4:** responsável pelo fornecimento de carga ao sistema global, é composto por uma bomba hidráulica de deslocamento positivo.
- **Módulo 5:** responsável pelo controle do torque exercido no sistema global, é composto por um conjunto de registros reguladores do fluxo de óleo bombeado, responsáveis por variar a demanda de potência da bomba e diversos elementos complementares tais como, manômetros, tubulações hidráulicas, reservatório e filtros.

Para evitar que possíveis vibrações provenientes de fontes externas assim como, evitar que o comportamento dinâmico da estrutura que serviria de base a esses equipamentos interferisse nos resultados obtidos, os módulos 1, 2, 3 e 4 foram colocados sobre uma mesa inercial existente no Laboratório de Vibrações da FEIS/Unesp. Para minimizar a influencia da vibração proveniente dos módulos 2 e 4 sobre o módulo 3, foram utilizados acoplamentos do tipo Falk os

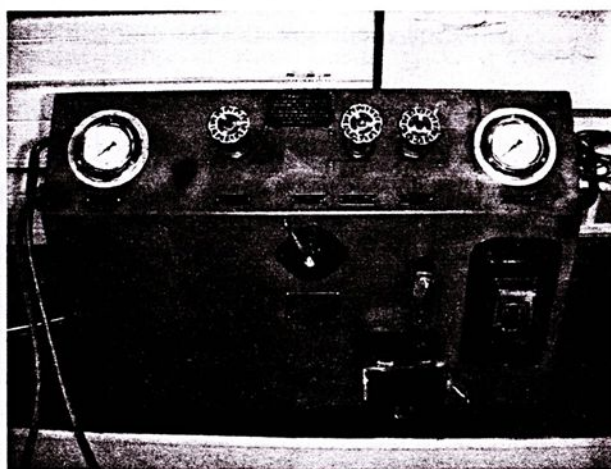
quais minimizam a transmissão de vibração via eixo. A Figura 7.2 apresenta uma vista geral da bancada experimental, assim como aproximações dos principais componentes, na qual pode-se observar os módulos descritos na Figura 7.1 e itens complementares. Outras vistas e detalhes da bancada experimental podem ser encontradas no apêndice 1.



(a)



(b)



(c)

Figura 7.2 - Bancada experimental: (a) Vista geral; (b) Zoom dos módulos 1, 2, 3 e 4, pode-se observar os acoplamentos tipo Falk; (c) Zoom do módulo 5, pode-se observar os manômetros e registros de regulagem e restrição do fluxo hidráulico.

A bancada experimental satisfaz as premissas básicas necessárias para a execução dos ensaios, ou seja, é flexível em relação às condições operacionais, pois é possível, dentro dos limites mecânicos dos elementos que a constitui, realizar a variação unívoca tanto do torque quanto da rotação. A variação unívoca da rotação para um valor de torque constante, é realizada ajustando-se a frequência de saída da alimentação elétrica do módulo 1 para um valor requerido, em seguida ajusta-se por intermédio dos registros do módulo 5, o valor da pressão existente na linha de alta pressão (saída da bomba) indicado pelo manômetro de alta pressão para um requerido valor fixo.

7.2 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

Em virtude dos parâmetros envolvidos nesta pesquisa estarem relacionados com potência, rotação, torque e vibração, tornou-se necessário o emprego de equipamentos que possibilitassem o conhecimento de tais grandezas. A potência de um sistema mecânico é função do torque e da rotação, portanto, é necessário o conhecimento de dois destes três fatores para que o terceiro possa ser calculado matematicamente. Assim optou-se, por questões de viabilidade e facilidade, medir os parâmetros potência, rotação e vibração.

A potência mecânica disponível no eixo do redutor (módulo 3) é a mesma disponível no eixo do motor elétrico (módulo 2), sendo conhecida como potência útil. O motor elétrico transforma a energia elétrica absorvida da rede em energia mecânica, portanto, conhecendo-se a potência absorvida da rede elétrica e o fator de rendimento do motor, é possível se calcular matematicamente a potência útil. Para a medição da potência elétrica absorvida da rede, foram colocados potenciômetros na linha elétrica, possibilitando assim que a potência útil seja conhecida. A Figura 7.3 apresenta o esquema elétrico montado para a medição da potência elétrica absorvida.



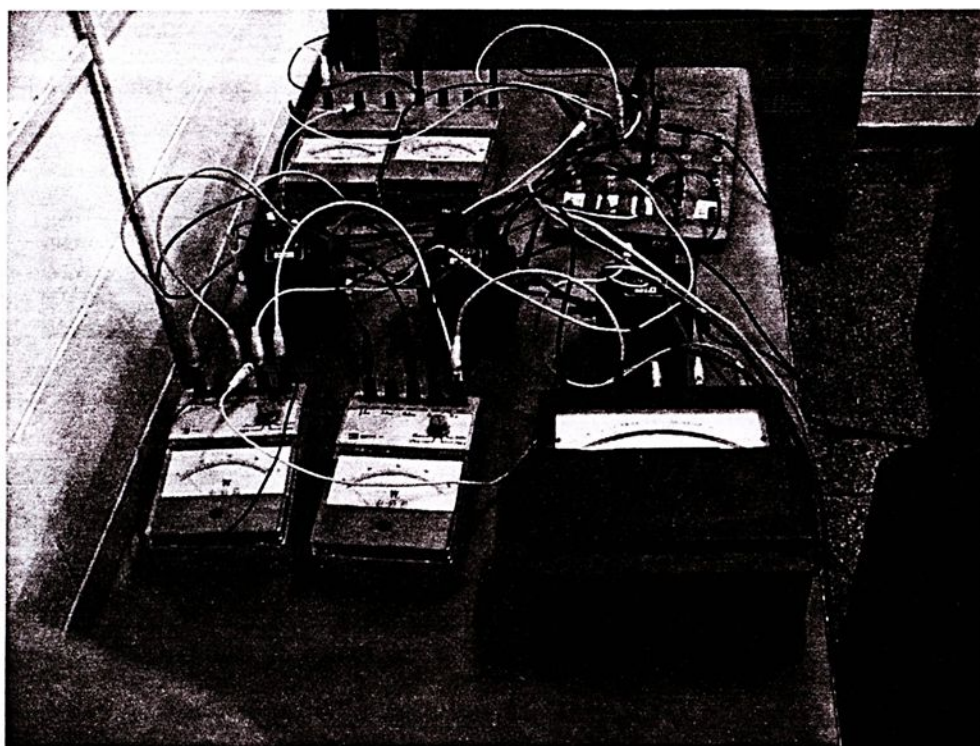


Figura 7.3 - Equipamentos elétricos utilizados na medição da potência elétrica absorvida da rede.

A rotação presente no sistema foi medida utilizando-se um *trigger* o qual utiliza um fotodiodo que possui a capacidade de reconhece variações de luminosidade. O *trigger* foi posicionado próximo ao eixo em análise, que por ser fabricado em aço e ter um bom acabamento superficial, reflete satisfatoriamente a luminosidade emitida. A posição de disparo do *trigger* é marcada por uma fina tarja preta colada diretamente sobre o eixo, deste modo a reflexão luminosa do eixo é fortemente reduzida e conseqüentemente cria uma diferença da incidência luminosa sobre o *trigger* que por sua vez, faz com que seu sistema eletrônico crie um sinal elétrico de saída.

No decorrer do tempo, cada vez que o *trigger* se depara com a tarja negra de marcação é gerado um pulso elétrico, criando assim, ao longo do tempo, um trem de pulsos elétricos. O período entre um pulso e outro indica o tempo decorrido para que o eixo completasse um giro completo, desta maneira pode-se medir com precisão a rotação presente no eixo em análise. O sinal elétrico produzido pelo *trigger* possui duas funções importantíssimas, uma é a medição da velocidade de rotação, a outra, é sincronismo da aquisição do sinal de vibração.

O último é mais importante parâmetro a ser medido é a vibração proveniente do redutor mecânico (módulo 3). Para isso, foi adotada uma cadeia de medição básica, composta por

transdutores, amplificador/condicionador, sistema de conversão A/D, microcomputador e software. A Figura 7.4 apresenta esquematicamente a cadeia de medição adotada.

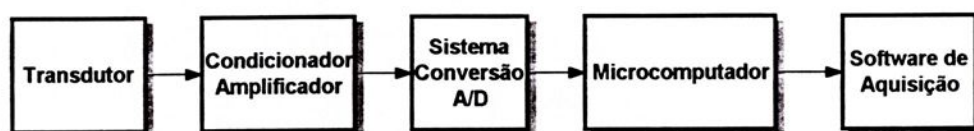


Figura 7.4 - Esquema da cadeia de medição adotada para a aquisição dos sinais de vibração provenientes do redutor em estudo.

Os elementos que compõem a cadeia de medição, assim como algumas características importantes de cada um deles, são apresentados na Tabela 7.1.

A calibração do sistema de medição foi realizada com o auxílio de um calibrador portátil PCB cuja vibração de saída, expressa em unidade de aceleração, é constante e possui o valor de 1,0 g. Deste modo, foram calibradas as escalas tanto do amplificador/condicionador quanto do software de aquisição para que o resultado final do sinal fosse dado em unidades de velocidade de vibração, neste caso mm/s.

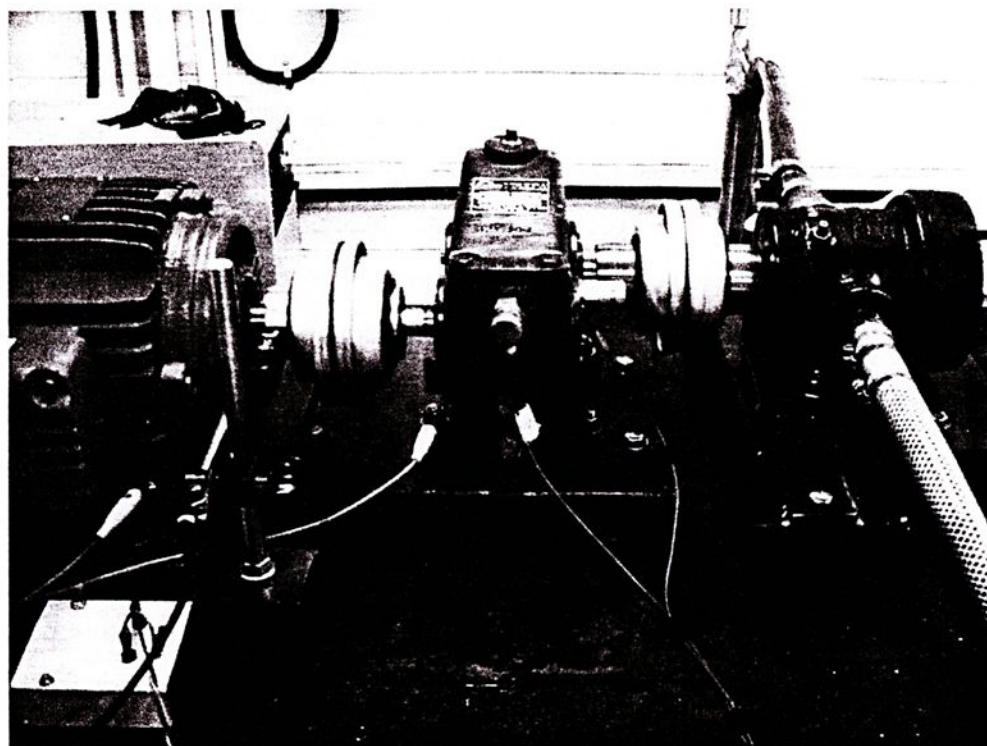


Figura 7.5 - Vista geral do redutor devidamente instrumentado. Pode ser observado os acelerômetros, um posicionado axialmente e o outro radialmente ao eixo de entrada. Também nota-se o *trigger* posicionado no eixo de entrada com o auxílio de uma base magnética. Pode-se notar os cabos utilizados no aterramento do redutor e motor (coloração vermelha).

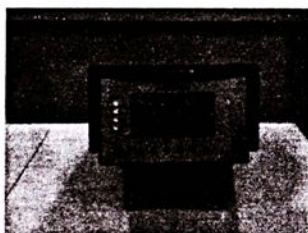
Tabela 7.1: Apresentação e especificações técnicas dos equipamentos que compõem a cadeia de medição dos sinais de vibração.

COMPONENTES



Transdutor

- **Fabricante:** PCB Piezotronics, Inc
- **Tipo:** Acelerometro Piezoeletrico
- **Modelo:** ICP 308C
- **Sensibilidade:** 99 mV/g
- **Freq. Ressonância:** 38 KHz
- **Resolução:** 0.002 g



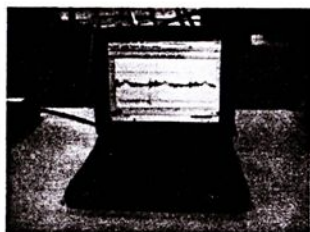
Condicionador/Amplificador

- **Fabricante:** Bruel&Kjaer Sound and Vibration A/S
- **Modelo:** Nexus 2693
- **Canais:** 4 canais com simples e dupla integração



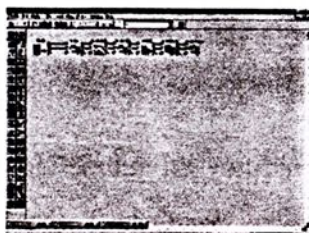
Sistema Conversão A/D

- **Fabricante:** IOTech, Inc
- **Modelo:** Conjunto DaqBook/112
- **Componentes:** 1 módulo DaqBook/112 e duas placas DBK 4.
- **Características DaqBook/112:** capacidade para até 16 canais *single-ended*, resolução de 12 bits e tempo de conversão de 8 μ s
- **Características DBK 4:** entrada de 2 canais para sinais dinâmicos, contendo filtro ant-aliasing de 141.6 Hz à 18 KHz



Microcomputador

- **Fabricante:** Toshiba, Inc
- **Modelo:** Notebook Satellite 2180 CDT
- **Processador:** AMD K6 de 450 MHz
- **Memória RAM:** 64 Mb
- **Disco Rígido:** 6.4 Gb
- **Sistema Operacional:** MS Windows 98



Software de Aquisição

- **Fabricante:** IOTech, Inc
 - **Tipo:** DasyLab V4.0 (*Data Acquisition System Laboratory*)
-

Sendo conhecida à arquitetura da bancada experimental, os módulos que a compõem, assim como a cadeia de medição utilizada, no item a seguir serão descritos os ensaios realizados para a obtenção dos sinais necessários à investigação proposta.

7.3 ENSAIOS DE CURTA DURAÇÃO

Critérios e Condições Gerais Adotadas

O redutor em estudo é composto por um único par engrenado, ou seja, possui dois eixos, um de entrada e um de saída, e duas engrenagens, uma acoplada no eixo de entrada, denominada pinhão, e outra acoplada no eixo de saída, denominada coroa. Tal configuração permite duas possibilidades de investigação em relação ao engrenamento, sobre a coroa ou sobre o pinhão. O pinhão é mais susceptível a falhas, pois seu engrenamento é mais vezes submetido aos esforços decorrentes do funcionamento do que a o engrenamento da coroa. Este fato se deve ao número de giros realizados pelo pinhão ser sempre maior que os realizados pela coroa, no caso do presente redutor, o pinhão realiza 2.16 giros para cada giro da coroa. Assim, em virtude dos fatos descritos acima, optou-se em utilizar o pinhão como engrenagem de estudo.

Com o objetivo de investigar o comportamento do método estatístico proposto, foram realizados ensaios de curta duração sob diversas condições de operação do redutor em estudo, totalizando oito condições diferentes, que foram agrupadas em duas classes distintas: classe 1, composta por quatro condições de operação, é caracterizada por conter as condições sujeitas à variação unívoca de torque, mantendo a rotação constante; classe 2, também composta por quatro condições distintas de operação, é caracterizada por conter as condições sujeitas à variação unívoca da rotação, permanecendo o torque constante.

Com base nestas duas classes, é possível investigar a influência exercida pelas variações tanto de torque quanto de rotação, conseqüentemente de potência, sobre o comportamento dinâmico do redutor de engrenagens.

Cada uma das oito condições operacionais do redutor foi submetida a duas condições de falha: condição 1, com o redutor novo sem nenhuma falha; condição 2, com apenas um tipo falha pontual ocorrendo em um único dente. A Figura 7.6 apresenta um esquema dos ensaios realizados.



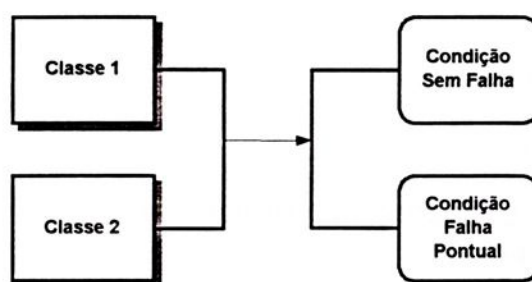


Figura 7.6 - Esquema dos ensaio realizados.

A condição de falha 1, foi considerada com o redutor sem nenhuma falha e após um período de amaciamento visando ajustar o engrenamento do pinhão.

Conforme descrito no capítulo 2, os danos pontuais que podem estar presentes no dentado são: *pitting*, trincas ou quebra do dente e, portanto existem três tipos de danos pontuais que poderiam ser introduzidos. O defeito a ser introduzido no pinhão deveria permanecer constante, ou seja, não poderia evoluir no decorrer do ensaio, pois caso isso viesse a ocorrer, não haveria como identificar se a mudança do sinal vibratório foi decorrente da variação da potência ou da evolução do defeito. Assim, o único tipo de dano pontual que satisfaz esse requisito é o quebra total do dente, pois este defeito encontra-se totalmente evoluído. Essa foi a opção para a condição de falha 2: pela quebra total do dente número 17 do pinhão. A Figura 7.7 apresenta o redutor com as duas condições de falha analisadas. O apêndice 2 apresenta outras figuras.

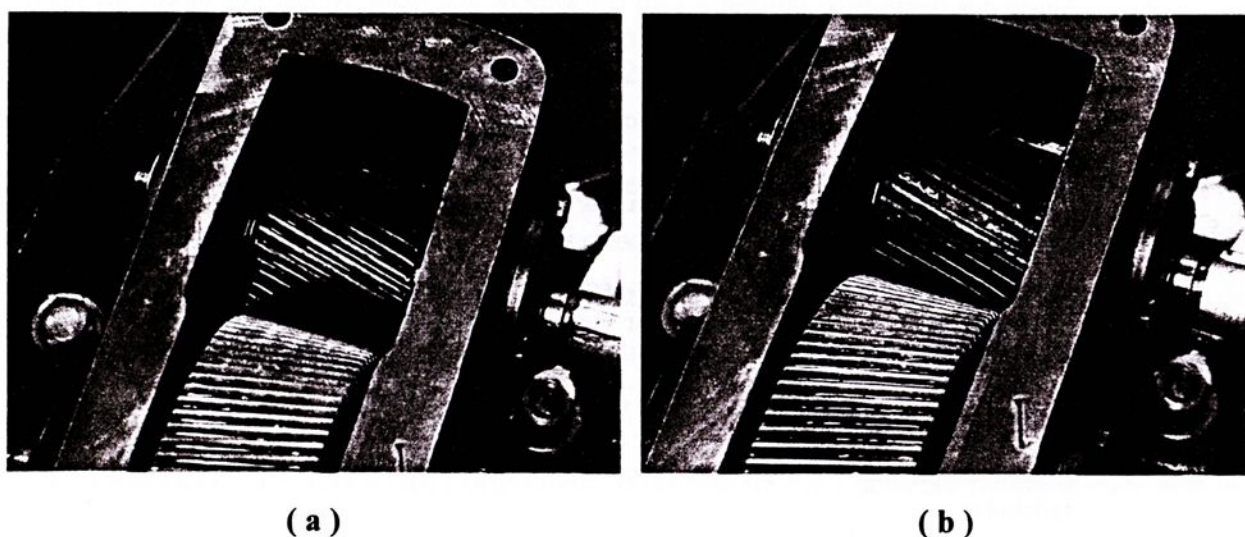


Figura 7.7 - Vistas do redutor mecânico em estudo: (a) condição de falha 1, pinhão sem nenhuma falha; (b) condição de falha 2, pinhão com o dente número 17 totalmente quebrado.

Sendo conhecidas as condições de operação a serem estudadas e os tipos de falha a serem analisadas, a seguir serão descritos os procedimentos adotados para a obtenção dos parâmetros de estudo: rotação, torque e vibração.

Procedimentos Utilizados na Aquisição dos Parâmetros de Estudo: Rotação, Torque e Vibração

A arquitetura de controle adotada na bancada experimental permite que ocorram variações unívocas tanto de torque quanto de rotação. A rotação do sistema é controlada via inversor de frequência mediante alteração do valor da frequência de alimentação do motor elétrico. O torque do sistema é controlado via carga da bomba hidráulica, que por sua vez, é controlada pela pressão existente na saída da bomba (linha de alta pressão). Assim, os parâmetros de controle são frequência do inversor e pressão de saída da bomba.

O inversor de frequência pode variar a frequência da rede elétrica de 0 à 65 Hz com incremento de 0.1 Hz. Adotou-se uma faixa de trabalho de 30 a 55 Hz.

A linha de alta pressão do sistema hidráulico, suporta pressões de no máximo 350 Psi (2.4 MPa), portanto, por questões de segurança, adotou-se uma faixa de trabalho de 0 à 300 Psi.

Sendo conhecidos os limites da bancada, adotou-se o seguinte procedimento para a realização de todos os oito primeiros ensaios, realizados sob a condição de defeito 1:

- 1) Ajuste dos parâmetros utilizados pelo software de aquisição: Número de blocos da amostra (N_B), número de pontos por bloco (N_p) e frequência de amostragem (F_a) segundo os critérios descritos no capítulo 6.
- 2) Ajuste da frequência de alimentação do motor elétrico, realizada diretamente no inversor de frequência.
- 3) Ajuste da carga na bomba, realizada por intermédio do registro da linha de alta pressão que é monitorada pelo manômetro de alta.
- 4) Verificação se a rotação, após a aplicação da carga, está no valor requerido, caso contrario reajustar a frequência de alimentação do motor elétrico. Esta verificação é feita mediante a leitura do sinal do trigger.
- 5) Verificar se a carga na bomba está no valor requerido, caso contrario, repetir o passo 3.
- 6) Repetir os passos 4 e 5 até que as condições requeridas de rotação e pressão (torque) estejam satisfeitas.
- 7) Realizar a leitura da potência absorvida da rede elétrica.
- 8) Realizar a aquisição dos sinais dinâmicos.

Aplicando-se este procedimento, foram obtidos os sinais de vibração axial e radial síncronos com a rotação do eixo de entrada e o sinal do *trigger*. Estes foram obtidos para a condição de defeito 1, e valores operacionais da bancada, conforme apresentam a Tabela 7.2 e Tabela 7.3.

Tabela 7.2: Condições de aquisição utilizada nos ensaios.

	Condição de Operação- CO	Frequência Amostragem F _a [KHz]	Número de Blocos N _B	Pontos por Bloco N _p
CLASSE 1	1	25	216	4096
	2	25	216	4096
	3	25	216	4096
	4	25	216	4096
CLASSE 2	5	25	216	4096
	6	25	216	4096
	7	25	216	4096
	8	25	216	4096

Tabela 7.3: Condições operacionais utilizadas nos ensaios. As frequências ajustadas no inversor para as CO da classe 1 já estão devidamente corrigidas devido à variação do escorregamento do motor, resultante da variação de carga aplicada.

	Condição de Operação- CO	Frequência Inversor [Hz]	Pressão Linha de Alta [Psi]	Potência Absorvida [W]
CLASSE 1	1	33	200	210
	2	32	100	160
	3	32.5	150	190
	4	34	300	300
CLASSE 2	5	37	200	240
	6	47	200	310
	7	51	200	320
	8	55.5	200	380

Os parâmetros contidos nas Tabela 7.2 e Tabela 7.3 descrevem completamente as condições do ensaio realizado sob a condição de defeito 1. Para a realização dos 8 ensaios restantes, sob a condição de defeito 2 não é necessário a realização do procedimento descrito acima, sendo necessário apenas o ajuste das condições de operação e de aquisição descritas pela Tabela 7.2 e Tabela 7.3, desta forma reproduzindo fielmente as mesmas condições, tanto de operação como de aquisição, que é uma importante característica da bancada experimental pois possibilita a repetibilidade dos ensaios.

A avaliação da potência útil (disponível no eixo do motor) pode ser realizada com base no conhecimento do rendimento do motor, fornecido pelo fabricante, e da potência absorvida da rede. O motor que compõe a bancada experimental possui um fator de rendimento máximo de 79.3% (pois este fator possui uma pequena variação em função da potência nominal) e a

potência absorvida da rede foi medida. Aplicando-se da Eq 7.1 pode-se obter o valor da potência útil P_u , na qual $\eta\%$ é o rendimento do motor, expresso em percentagem, e P_a é a potência absorvida, (WEG, 1998).

$$P_u = \frac{\eta\%}{100} P_a$$

Eq. 7.1

A rotação do motor é obtida mediante a análise do sinal adquirido do trigger medindo-se o tempo percorrido entre um pulso e outro do sinal, o que resulta em um período completo de rotação do eixo, conforme pode ser observado na Figura 7.9(a). A Eq.8.2 relaciona o período $T_{pinhão}$ com sua rotação $R_{pinhão}$.

$$R_{pinhão}[Rpm] = \frac{60}{T_{pinhão}[s]}$$

Eq. 7.2

Sendo conhecidos a potência útil P_u e a rotação $R_{pinhão}$, o torque $M_{pinhão}$ pode ser calculado por intermédio da Eq. 7.3, (WEG, 1998).

$$M_{pinhão}[Nm] = \frac{9555 P_u[KW]}{R_{pinhão}[Rpm]}$$

Eq. 7.3

A Tabela 7.4 apresenta as condições de operação, em termos do torque, rotação e potência do redutor em estudo, utilizados nos ensaios.

Tabela 7.4: Condições operacionais utilizadas nos ensaios relativas ao eixo de entrada do redutor.

	Condição de Operação- CO	Rotação [Rpm]	Torque [N.m]	Potência Útil [W]
CLASSE CLASSE 1	1	917	1,73	166,53
	2	918	1,32	126,88
	3	916	1,57	150,67
	4	917	2,47	237,90
CLASSE CLASSE 2	5	1037	1,75	190,32
	6	1339	1,75	245,83
	7	1461	1,65	253,76
	8	1595	1,80	301,34

Desta maneira, tanto os sinais de vibração quantos os parâmetros relacionados à potência necessários ao desenvolvimento da pesquisa foram obtidos. No item a seguir, é apresentado o



pré-processamento dos sinais de vibração em que se procura retirar do sinal as componentes sem importância para esta pesquisa.

7.4 PRÉ-PROCESSAMENTO DO SINAL DE VIBRAÇÃO

Para a realização do pré-processamento dos sinais de vibração, foram construídas, sobre a plataforma Matlab®, três rotinas computacionais. A primeira, denominada PreLoad, é responsável pela leitura e separação dos 3 canais contidos no sinais de vibração, representados pelo sinal do *trigger* (canal 1), vibração axial (canal 2) e vibração radial (canal 3) distribuindo-os em arquivos independentes, posteriormente é realizada a separação dos blocos de cada um dos canais em colunas independentes. A segunda rotina, denominada PreTSA, é responsável pela realização da média temporal síncrona estável para cada um dos três canais. A terceira e última rotina, denominada HighFilter, é a responsável por duas funções, a primeira consiste na filtragem passa-alta da média temporal síncrona, a segunda é a retirar da TSA uma fatia representativa de um único giro da engrenagem em estudo. A Figura 7.8 apresenta o esquema utilizado no pré-processamento dos sinais de vibração. O apêndice 3 apresenta tais rotinas mais detalhadamente.

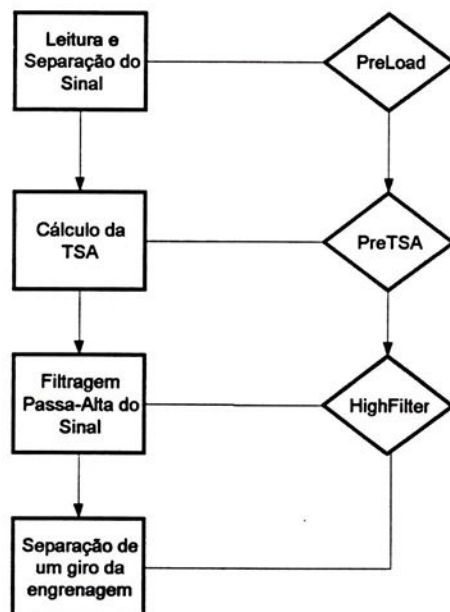
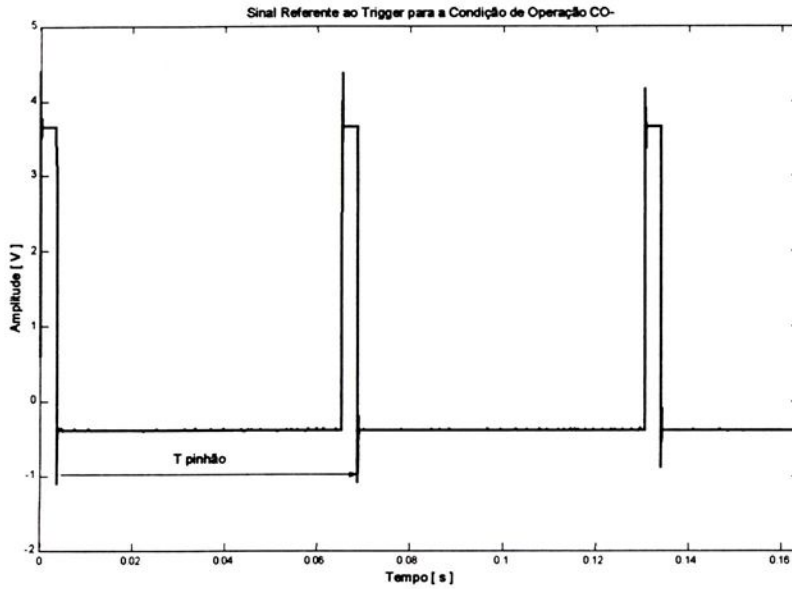
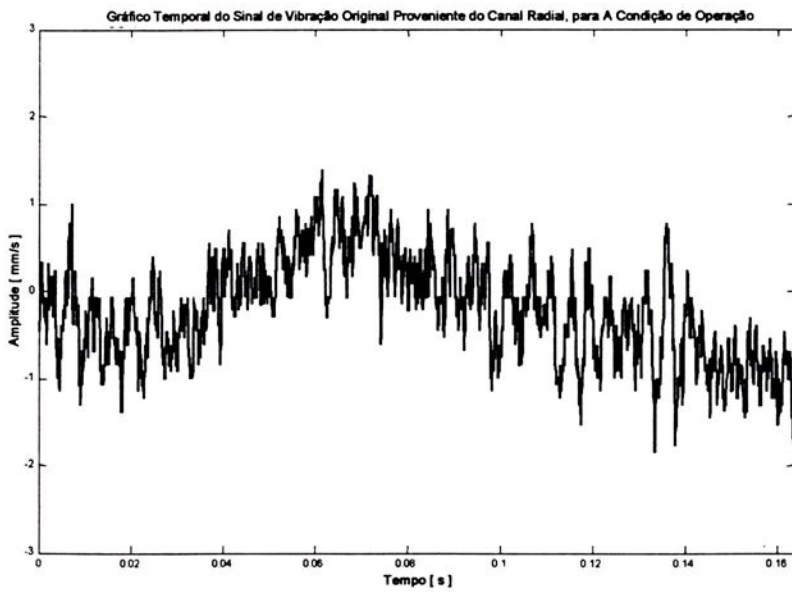


Figura 7.8 - Esquema utilizado no pré-processamento dos sinais de vibração.

Para exemplificar o procedimento utilizado no pré-processamento, será utilizado o sinal de vibração obtido sob a condição de operação CO-1 radial, utilizando inicialmente a rotina PreLoad, conforme apresenta a Figura 7.9



(a)



(b)

Figura 7.9 - Sinal temporal original, obtido na condição de operação CO-1. (a) sinal referente ao trigger, (b) sinal de vibração radial.

Na aquisição dos sinais de vibração, para cada condição de operação CO, foram obtidos 216 blocos, cada um contendo 4096 pontos. Este número de blocos, representativo do número de giros do pinhão, foi escolhido, pois corresponde a um número inteiro de rotação da coroa, desta forma minimizando os efeitos decorrentes de qualquer não uniformidade existente entre cada um dos dentes da coroa (Mcfadden, 2000). É sempre aconselhável que a média temporal síncrona (TSA), seja realizada sobre um número inteiro de rotações da outra engrenagem que forma, com a que está em análise, o par engrenado. Este fato deve-se, pois a cada rotação do pinhão, um dos seus dentes (d1) irá engrenar com um dos dentes da coroa (c1) que não é o mesmo dente que d1 engrenou no giro anterior, sendo que os mesmos dentes d1 e c1 só irão engrenar novamente quando o número de rotações do pinhão e da coroa for um número inteiro. Para o redutor em estudo, este caso ocorre para 216 rotações do pinhão que corresponde a 100 rotações da coroa.

Neste caso a média temporal síncrona foi realizada utilizando-se a rotina PreTSA, cujo resultado deste processamento é apresentado na Figura 7.10.

Realizando uma comparação entre o sinal original, Figura 7.9, e o sinal processado por intermédio da TSA, Figura 7.10, pode-se notar uma grande diferença entre os sinais, principalmente em relação aos picos de amplitudes que se apresentam bem menores no caso da Figura 7.10 atribuídas a eliminação de componentes instáveis e não síncronas do sinal.

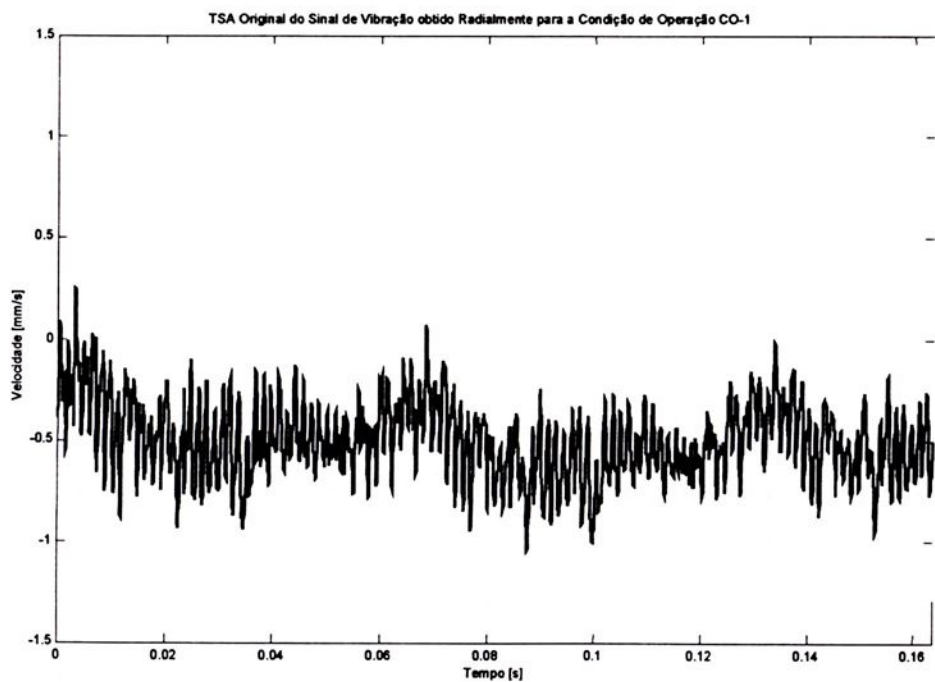


Figura 7.10 - Média Temporal Síncrona (TSA) do sinal temporal original, obtido radialmente na condição de operação CO-1.

A penúltima etapa do pré-processamento consiste na eliminação das componentes de baixa frequência. A rotina HighFilter, a qual utiliza um filtro classe IIR padrão Chebyshev tipo II de ordem 7, com atenuação de -50dB na faixa de filtragem que é de 0 a 300Hz, é a responsável pelo processamento. As demais características podem ser observadas na Figura 7.11 e Figura 7.12.

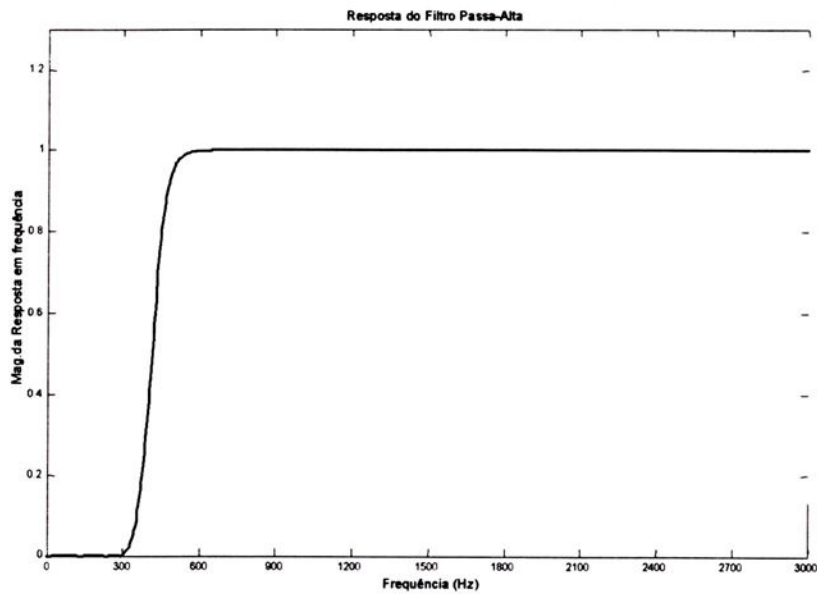


Figura 7.11 - Magnitude da resposta do filtro utilizado.

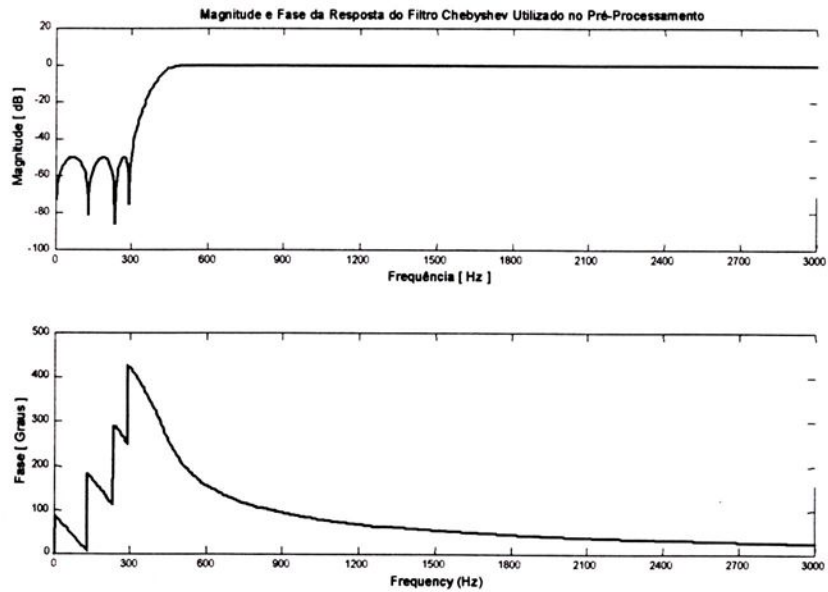


Figura 7.12 - Magnitude (escala dB) e fase da resposta do filtro utilizado.

O resultado final da filtragem é apresentado pela Figura 7.13, na qual pode-se notar a grande simplificação sofrida em relação ao sinal original, apresentado na Figura 7.9(b).

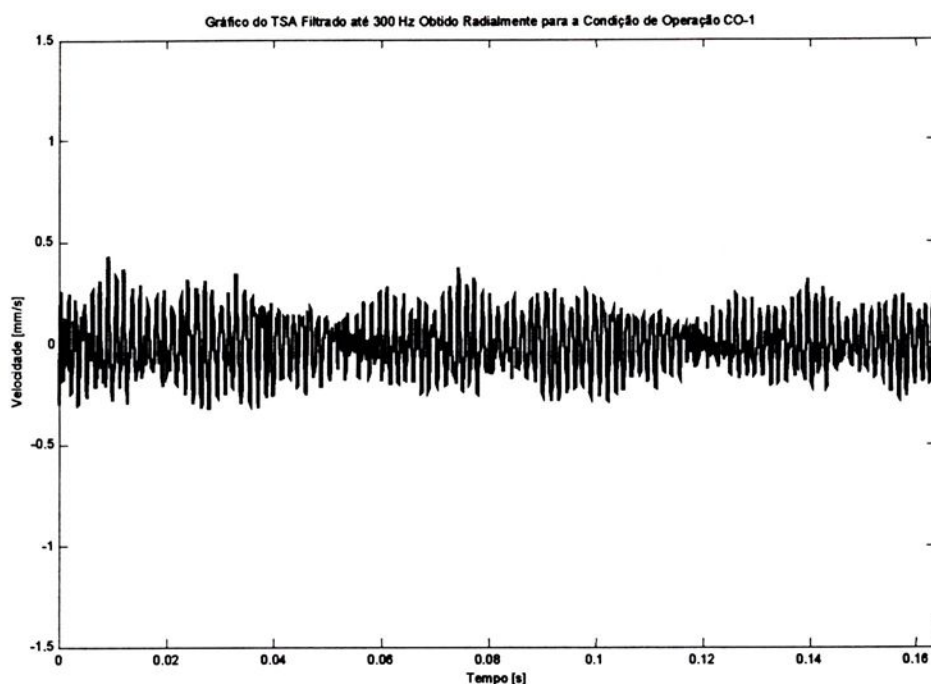


Figura 7.13 - Média Temporal Síncrona filtrada até 300 Hz utilizando filtro Chebyshev, apresentando o sinal referente ao canal radial, obtido na condição de operação CO-1.

O último passo do pré-processamento é a extração do sinal vibratório pertencente a um único giro do pinhão, a Figura 7.14 apresenta o resultado final.

O sinal apresentado pela Figura 7.14 representa, quase que unicamente, a resposta do redutor à excitação decorrente do processo de engrenamento, deste modo, este sinal contém informações vitais sobre as condições de engrenamento.

O procedimento descrito pela Figura 7.8 exemplificado neste item, foi realizado para todas as oito condições de operação (CO) aplicadas às duas condições de falha estudadas, assim, obteve-se um conjunto de dezesseis sinais representativos da condição do engrenamento do pinhão para diversas condições de operação e duas condições de falha. Estes sinais serão apresentados oportunamente no item a seguir, no qual será analisada a influência exercida pela variação de torque e rotação no comportamento dinâmico do redutor.

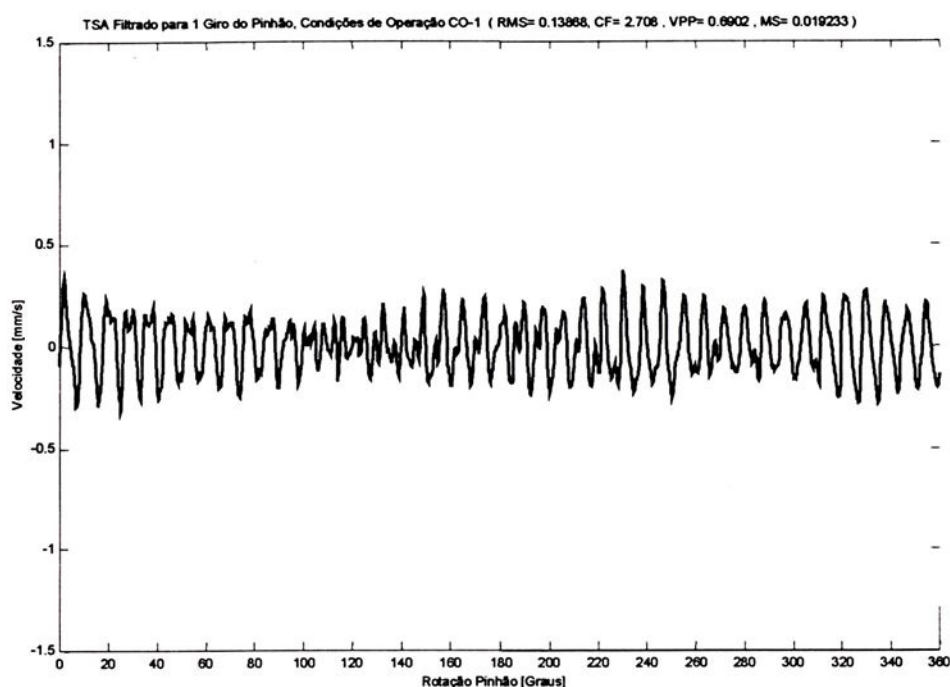


Figura 7.14 - Média Temporal Síncrona filtrada para um único giro do pinhão, apresentando o sinal referente ao canal radial, obtido na condição de operação CO-1.

7.5 INFLUÊNCIA DO TORQUE, ROTAÇÃO E POTÊNCIA SOBRE OS SINAIS DE VIBRAÇÃO

O objetivo deste tópico é observar o comportamento dinâmico do redutor, em perfeito estado, quando submetido a diversas condições de operação.

A investigação realizada neste item utiliza os sinais de vibração, obtidos na posição radial, sujeitos a condição de falha 1. Estes sinais foram submetidos ao processo de pré-processamento que inicialmente, por intermédio da média temporal síncrona (TSA), resulta num sinal composto apenas pela componente relativa a frequência de giro do eixo de entrada e suas possíveis harmônicas, da frequência de engrenamento, suas harmônicas e bandas laterais, conforme apresenta a Figura 7.15.

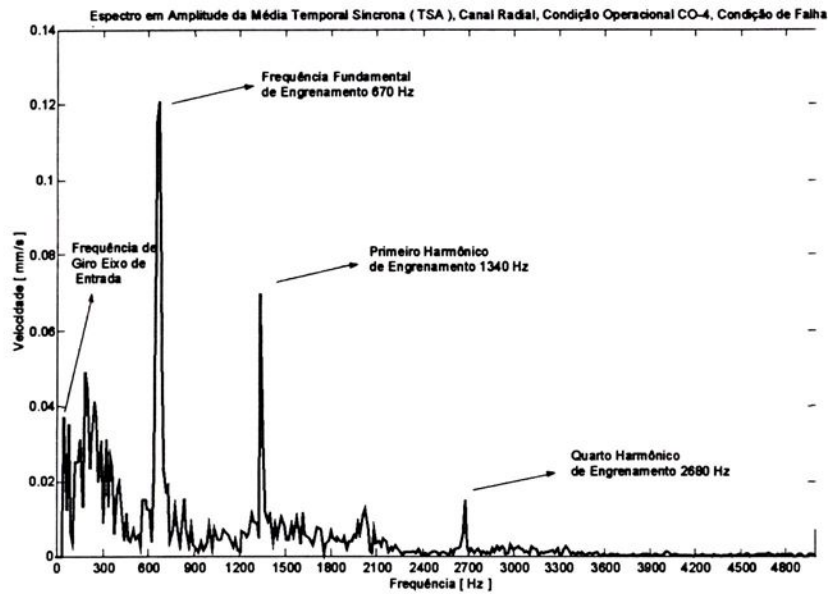


Figura 7.15 - Espectro em amplitude da média temporal síncrona (TSA) em escala linear, obtido radialmente para a condição operacional CO-9 e condição de falha 1. Pode-se notar as componentes presentes, giro do eixo de entrada, frequência fundamental de engrenamento, seguido por seu primeiro e quarto harmônicos.

As componentes presentes na faixa de baixa frequência não trazem informações sobre a condição de engrenamento, assim, esta faixa pode ser eliminada do sinal sem que informações importantes sobre a condição mecânica do dentado sejam perdidas. Esta eliminação é realizada pela última fase do pré-processamento segundo o processo de filtragem. A Figura 7.16 apresenta o resultado, no domínio da frequência, desta filtragem.

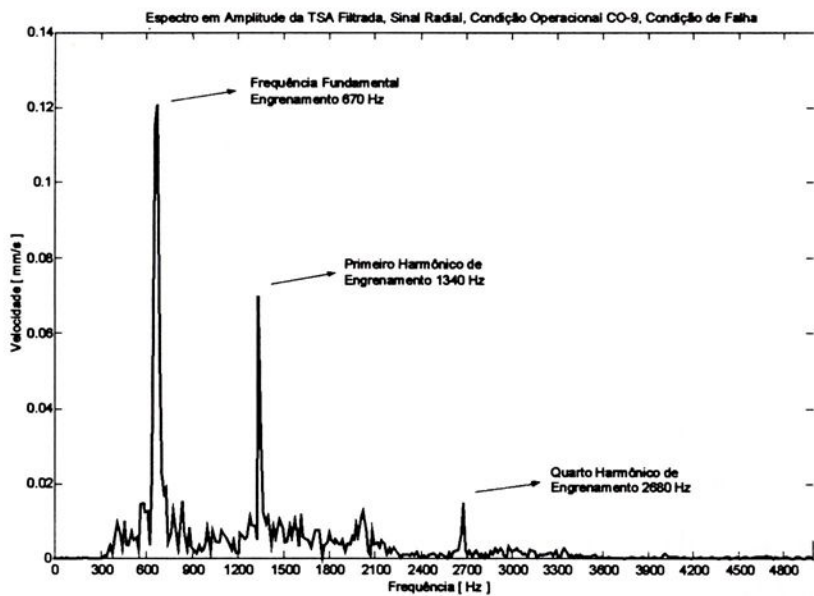


Figura 7.16 - Espectro em amplitude da média temporal síncrona (TSA) filtrada, em escala linear, obtido radialmente para a condição operacional CO-9 e condição de falha 1. Pode-se notar a completa eliminação das componentes de baixa frequência.

Com base na observação da Figura 7.16 nota-se que este sinal apresenta a resposta do redutor unicamente à excitação decorrente do processo de engrenamento. Esta excitação é decorrente dos esforços dinâmicos envolvidos no processo de transmissão do movimento entre o pinhão e a coroa é periódica com a frequência de engrenamento e sua amplitude é função do torque útil presente no eixo. Maiores detalhes sobre a dinâmica de um par engrenado podem ser obtidos em Blankenship, 1992; 1995a, 1995b.

Alterações nas condições de operação irão influenciar a dinâmica do acoplamento que por sua vez será refletida na resposta do redutor. Como objetivo principal é obter indícios sobre o comportamento da resposta do redutor submetido a diversas condições dinâmicas, podem ser empregadas técnicas de análise no domínio do tempo. Por serem bem estabelecidas e amplamente conhecidas, foram utilizadas: o valor RMS, escolhido para caracterizar o valor de amplitude ao longo de todo o sinal e o fator de crista, que fornece a razão entre o valor de pico máximo e o RMS, responsável pela indicação da presença de transientes no sinal.

Foram analisadas as oito condições de operação, sujeitas a condição de defeito 1, as quais são apresentas abaixo, juntamente com seus respectivos valores RMS e do fator de crista. Os valores numéricos dos parâmetros RMS e FC obtidos foram agrupados conforme demonstra a Tabela 7.5

Tabela 7.5: Fatores obtidos na caracterização dinâmica seguido pelas condições operacionais utilizadas nos ensaios.

	Condição de Operação- CO	Fator RMS [mm/s]	Fator Crista [adm]	Rotação [Rpm]	Torque [N.m]	Potência Útil [W]
CLASSE 1	1	0.138	2.708	917	1,73	166,53
	2	0.111	3.037	918	1,32	126,88
	3	0.145	2.998	916	1,57	150,67
	4	0.147	3.025	917	2,47	237,90
CLASSE 2	5	0.193	2.637	1037	1,75	190,32
	6	0.152	3.147	1339	1,75	245,83
	7	0.230	2.625	1461	1,65	253,76
	8	0.238	2.651	1595	1,80	301,34

As Figura 8.17, Figura 7.18 e Figura 7.19 apresentam o comportamento do parâmetro RMS em razão da variação unívoca do torque, rotação e da potência, para a condição de referência CO-2.



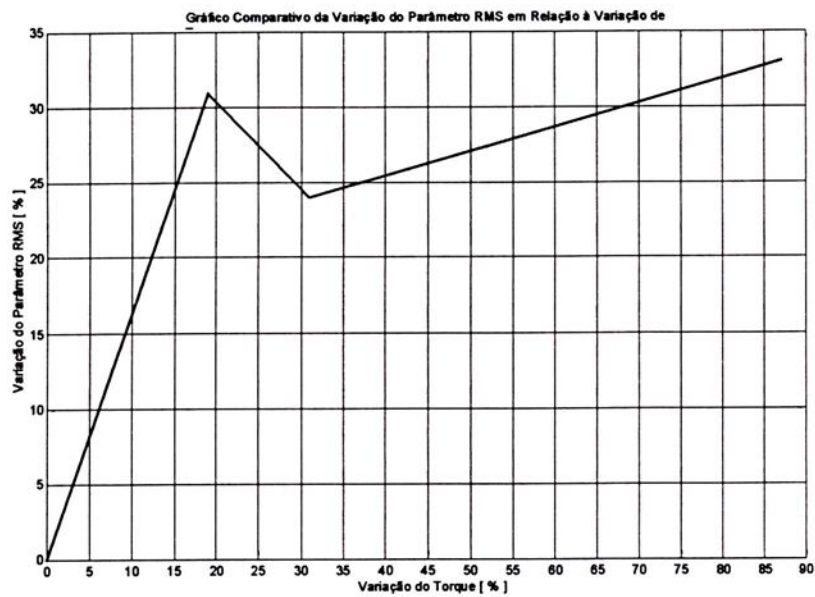


Figura 8.17 - Gráfico comparativo da variação do parâmetro RMS em relação à variação de torque.

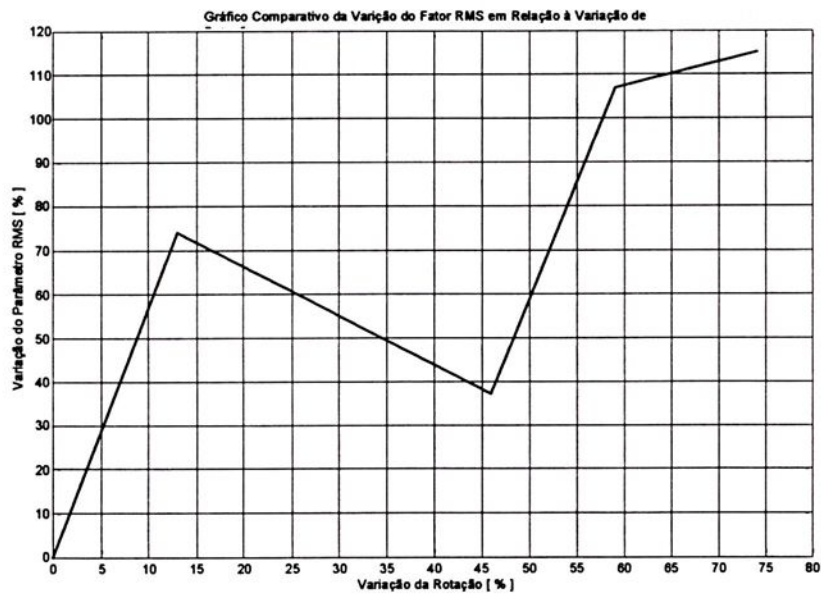


Figura 7.18 - Gráfico comparativo da variação do parâmetro RMS em relação à variação de rotação.

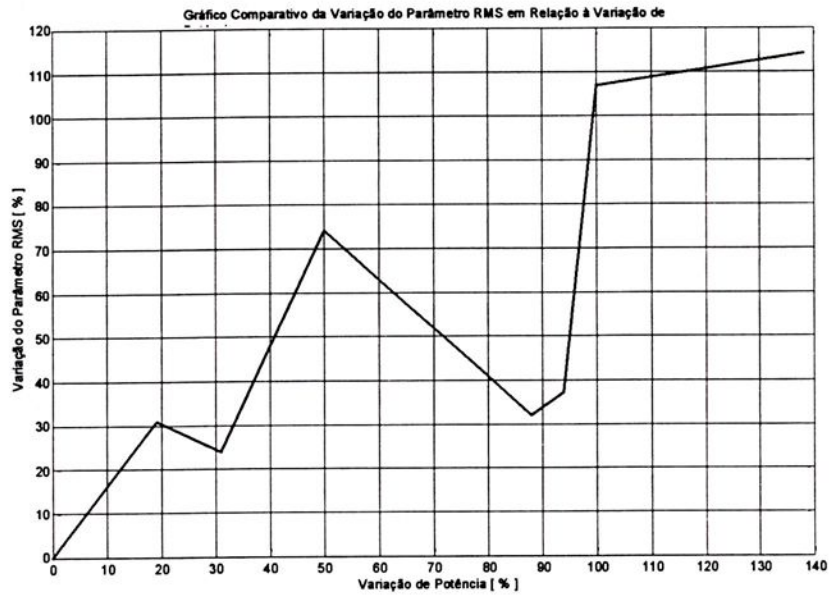


Figura 7.19 - Gráfico comparativo da variação do parâmetro RMS em relação à variação de potência.

As Figura 7.20, Figura 7.21 e Figura 7.22 apresentam o comportamento do parâmetro Fator de Crista (FC) em razão da variação unívoca do torque, rotação e da potência, para a condição de referência CO-2.

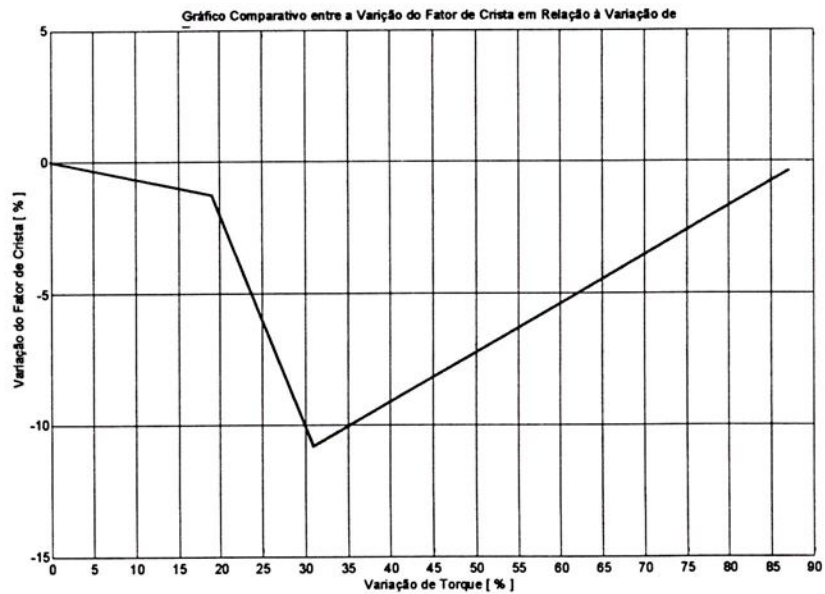


Figura 7.20 - Gráfico comparativo da variação do parâmetro Fator de Crista em relação à variação de torque.

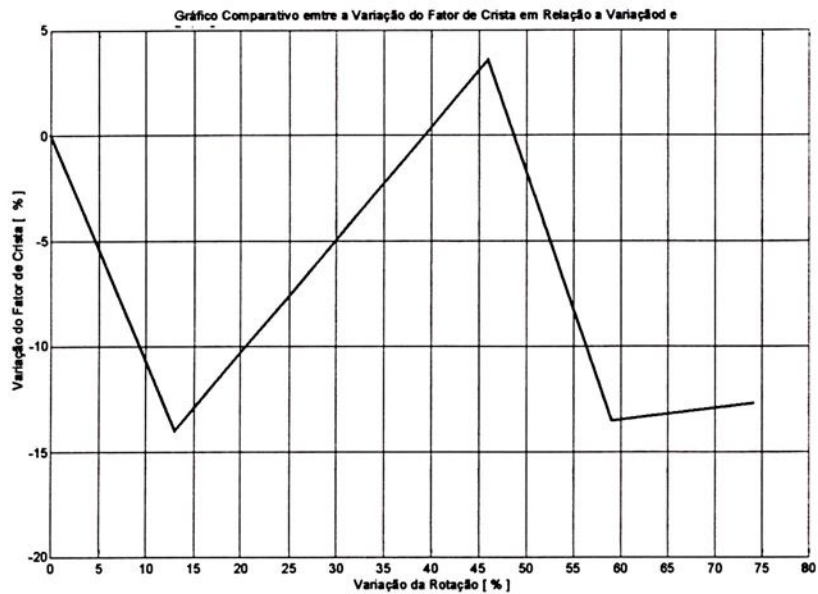


Figura 7.21 - Gráfico comparativo da variação do parâmetro Fator de Crista em relação à variação de rotação.

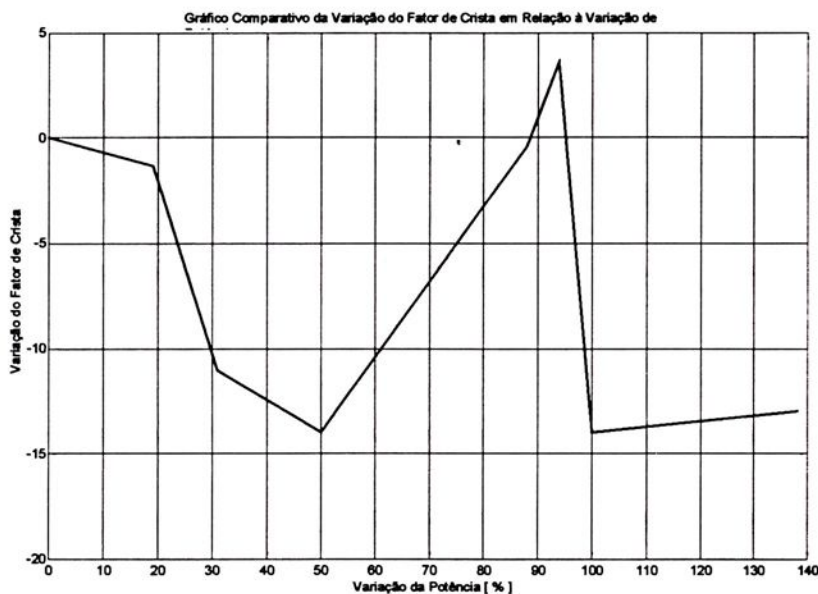


Figura 7.22 - Gráfico comparativo da variação do parâmetro Fator de Crista em relação à variação de potência.

Neste item, foi apresentada a influência exercida pelas condições dinâmicas de operação, onde se pôde notar que estas influenciam na resposta vibratória do redutor. No próximo item, será apresentado o processamento realizado sobre os sinais pré-processados, para a geração do MapM4, responsável pela caracterização da condição do engrenamento.

7.6 PROCESSAMENTO DOS SINAIS VIBRATÓRIOS: GERAÇÃO DO MAPM4

Conforme visto anteriormente, o sinal vibratório proveniente de um redutor é formado por diversas componentes. Com a finalidade de evidenciar apenas a resposta referente a um componente específico, no caso o par engrenado, foi aplicado o procedimento apresentado no item 7.4, em que os sinais resultantes desse pré-processamento serão empregados para a obtenção do MapM4.

A Figura 7.23 demonstra, de uma forma geral, as etapas envolvidas na obtenção do MapM4 apresentando. Quando se utiliza uma como referência uma FDP obtida para um sinal considerado em boas condições, denominada FDP de base, o denominamos o MapM4 resultante de HMM4. Quando a FDP utilizada como referência é a obtida para cada sinal independente, denominamos o MapM4 de IMM4.



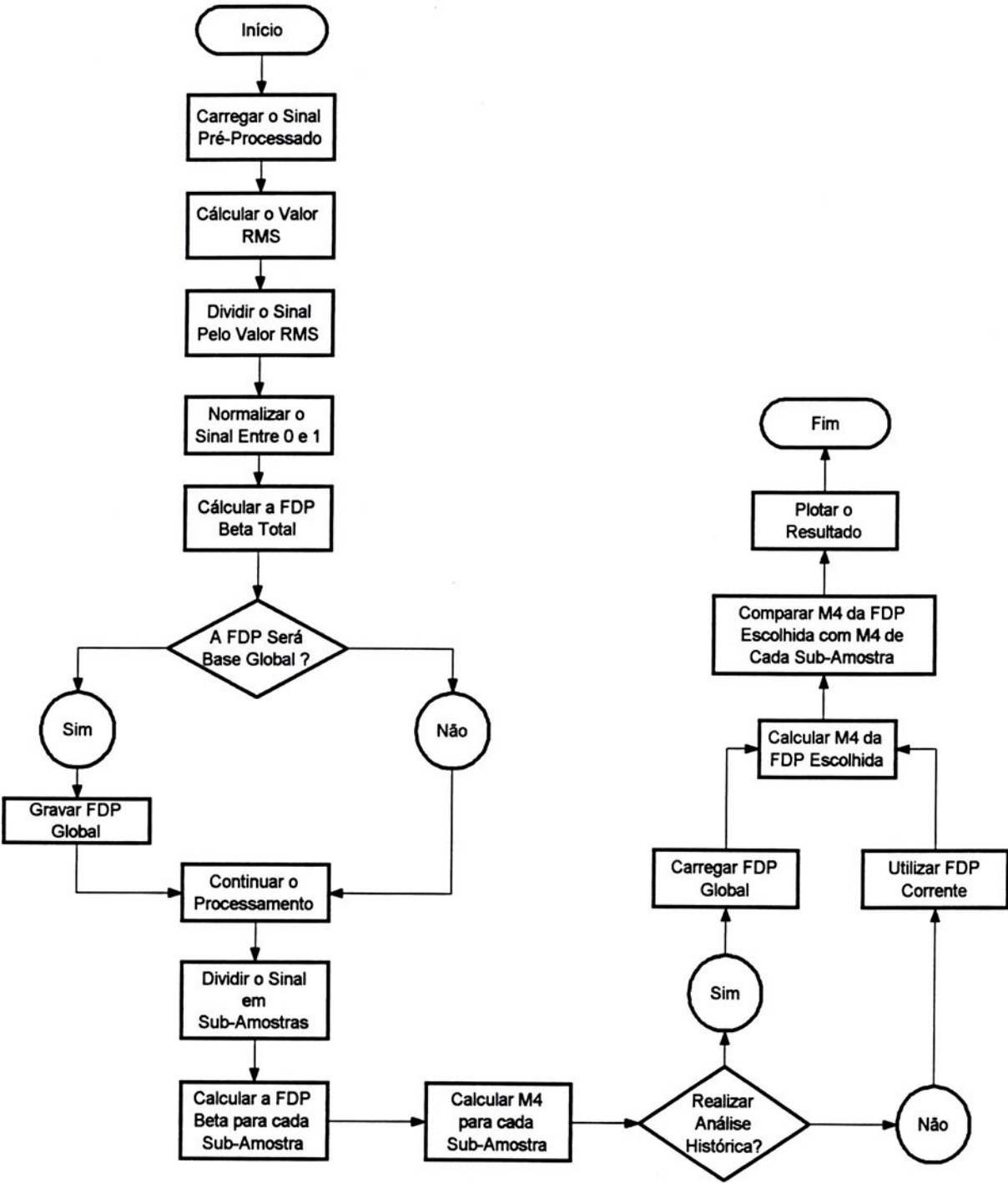


Figura 7.23 - Fluxograma representativo do processamento para obtenção do MapM4.

Para exemplificar o procedimento descrito pela Figura 7.23, utilizou-se o sinal referente ao canal radial, obtido na condição de operação CO-1, para a condição de falha 1.

▪ **1ª Etapa: Leitura do Sinal Pré-Processado**

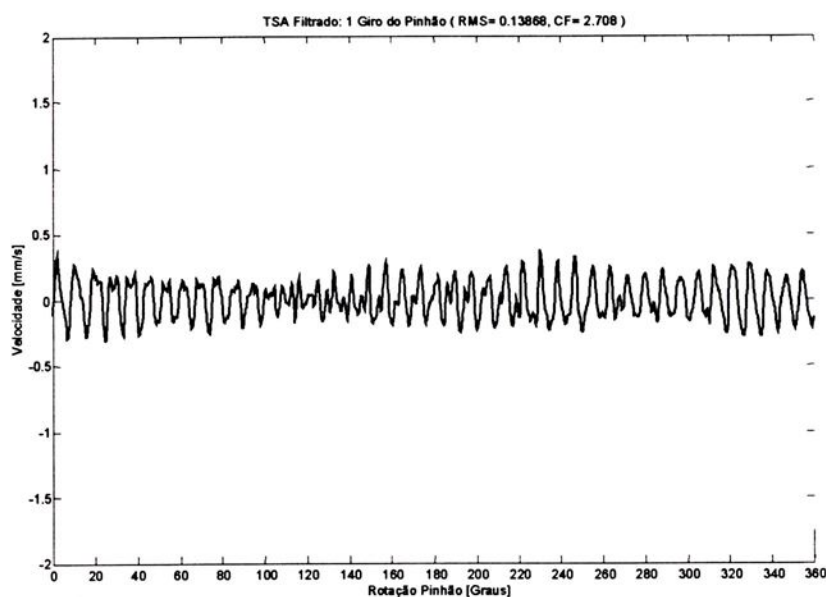


Figura 7.24 - Média temporal síncrona (TSA) filtrada, obtido radialmente para a condição operacional CO-1, condição de falha 1.

▪ **2ª Etapa: Cálculo do Valor RMS**

Valor RMS = 0.138

▪ **3ª Etapa: Congelar o Sinal: Divisão pelo RMS**

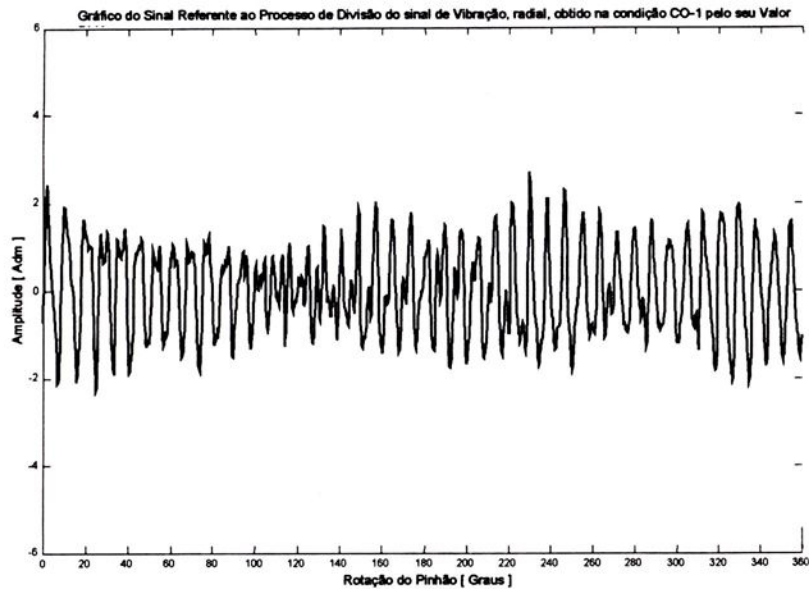


Figura 7.25 - Média Temporal Síncrona filtrada para um único giro do pinhão, apresentando o sinal referente ao canal radial, condição de falha I e condição de operação CO-1, dividido pelo seu valor RMS.

4ª Etapa: Normalizar as Amplitudes: Faixa de 0 à 1

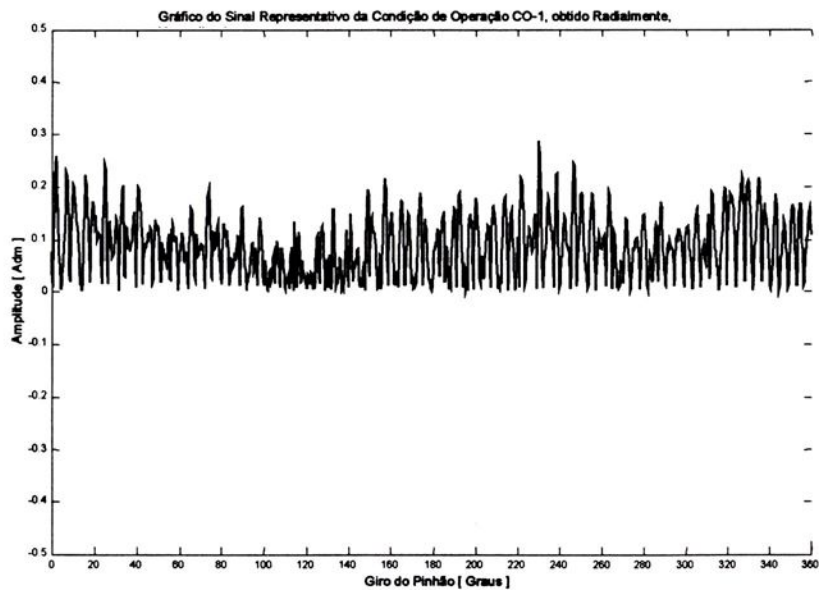


Figura 7.26 - Média Temporal Síncrona filtrada para um único giro do pinhão, apresentando o sinal referente ao canal radial, obtido na condição de operação CO-1 dividido pelo seu valor RMS e normalizado (/ por 3*PI).

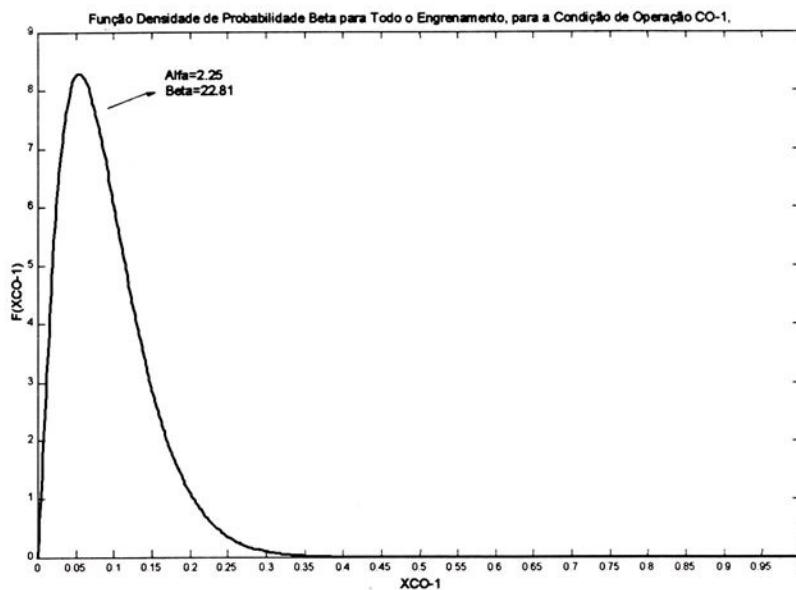
5ª Etapa: Calcular a FDP Beta para Todo o Sinal

Figura 7.27 - Função densidade de probabilidade Beta, representativa de todo o engrenamento, para o caso CO-1.

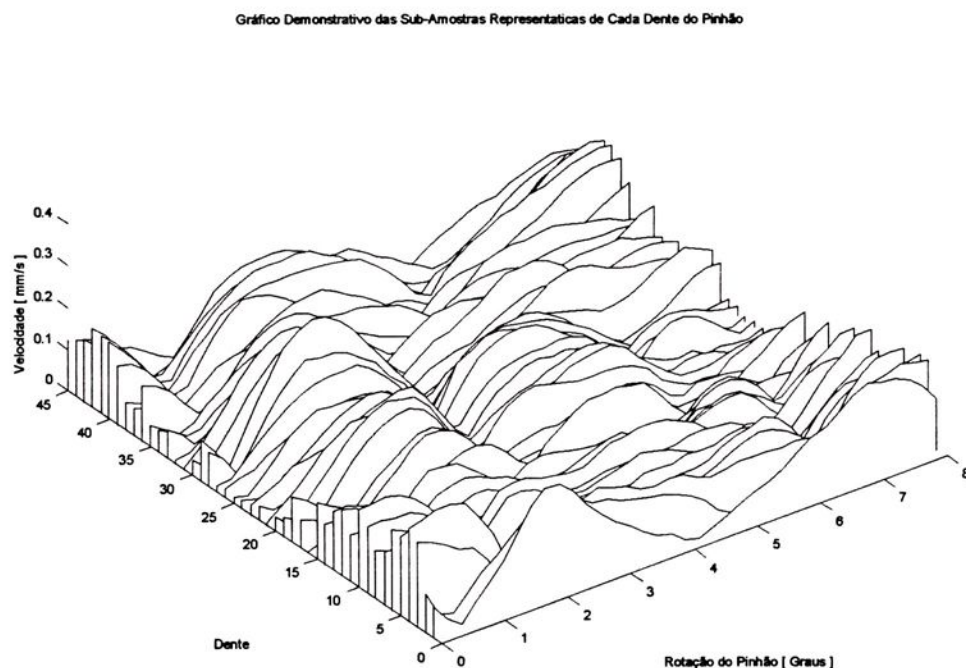
6ª Etapa: Dividir o Sinal Temporal em Subamostras, Representativas de Cada Dente

Figura 7.28 - Sinal temporal normalizado, representativo de cada um dos dentes que compõe o pinhão, condição de operação CO-1 e condição de falha 1.

7ª Etapa: Calcular a FDP Beta para Cada Subamostra

Gráfico Demonstrativo das Funções Densidade de Probabilidade para Cada um dos Dentes Que Compõem o Pinhão

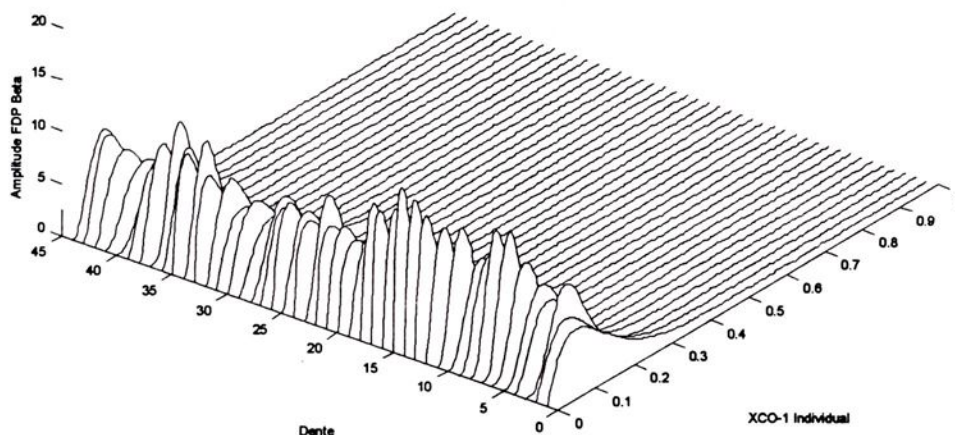


Figura 7.29 - Função densidade de probabilidade Beta, representativa de cada um dos dentes que compõe o pinhão, condição de operação CO-1.

8ª Etapa: Calcular o Quarto Momento da FDP Beta para Cada Subamostra

O resultado é apresentado na Tabela 8.6.

9ª Etapa: Calcular o Quarto Momento da FDP Beta para Todo o Engrenamento

$$M_o^4 \text{ total} = 0.000331807 \text{ (Referência)}$$

10ª Etapa: Comparação dos Resultados

Para a comparação dos resultados, é utilizada a diferença relativa entre o M_o^4 calculado para cada uma das subamostras (8ª etapa) e o M_o^4 total, utilizando-se a seguinte expressão:

$$DRM4 = \left| \frac{M_4^{o}subamostra - M_4^{o}total}{M_4^{o}total} \right| \quad \text{Eq. 7.4}$$

Os resultados numéricos são apresentados na Tabela 8.6.

Tabela 8.6: Valores de Beta M4 para cada um dos dentes, seguido pela diferença relativa em relação ao Beta M4 Global.

Número do Dente	M4 Individual (BM4Ind)	M4 Total	Diferença Relativa DRM4
1	0.0011467	0.000331807	2.456
2	0.0008427		1.540
3	0.0004776		0.439
4	0.0006431		0.938
5	0.0005033		0.517
6	0.0002350		0.292
7	0.0001021		0.692
8	0.0000893		0.731
9	0.0002140		0.355
10	0.0003066		0.076
11	0.0000963		0.710
12	0.0000769		0.768
13	0.0000586		0.823
14	0.0000414		0.875
15	0.0000374		0.887
16	0.0000661		0.801
17	0.0001043		0.686
18	0.0000714		0.785
19	0.0002980		0.102
20	0.0004435		0.337
21	0.0002694		0.188
22	0.0003195		0.037
23	0.0001346		0.594
24	0.0003641		0.097
25	0.0002979		0.102
26	0.0002190		0.340
27	0.0003488		0.051
28	0.0004192		0.264
29	0.0011931		2.596
30	0.0004989		0.504
31	0.0008435		1.542
32	0.0002527		0.238
33	0.0002301		0.307
34	0.0000914		0.725
35	0.0001251		0.623
36	0.0001634		0.508
37	0.0001254		0.622
38	0.0001578		0.524
39	0.0004652		0.402
40	0.0008199		1.471
41	0.0008945		1.696
42	0.0004497		0.355
43	0.0002367		0.287
44	0.0003001		0.096

A Figura 7.30 apresenta o resultado gráfico obtido utilizando os valores de DRM4 da Tabela 8.6.

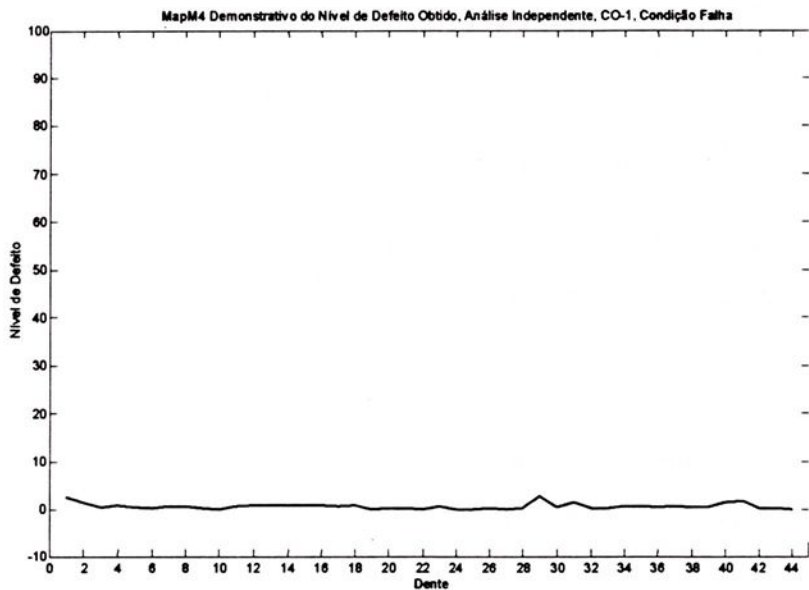


Figura 7.30 - MapM4 representando o nível do defeito no pinhão. Condição de operação CO-1 e condição de falha 1.

Neste item, foi apresentado o processamento utilizado para a obtenção do MapM4, sendo para isso utilizado a condição operacional CO-1 na condição de falha 1. Este procedimento foi realizado para todas as dezesseis condições estudadas, oito sob condição de falha 1 e oito sob a condição de falha 2. Os resultados numéricos de todas as condições estudadas são apresentadas nos apêndices 5 e 6.

O item a seguir apresenta os resultados finais obtidos para duas classes distintas de análise: análise histórica do redutor e análise de diagnóstico independente.

7.7 RESULTADOS FINAIS: ANÁLISE HISTÓRICA E ANÁLISE DE DIAGNÓSTICO INDEPENDENTE

O procedimento geralmente recomendado para a implementação de uma metodologia para o seguimento e diagnóstico de defeitos em equipamentos por análise de vibrações consiste no monitoramento periódico do equipamento, aplicando alguma técnica que permita, inicialmente, identificar o surgimento de algum defeito, denominada análise histórica, posteriormente é

realizado o diagnóstico desta falha buscando identificar qual é o elemento mecânico responsável pelo defeito, denominada análise de diagnóstico.

Geralmente, para máquinas rotativas em geral, o parâmetro mais utilizado para a análise histórica é o valor eficaz da velocidade de vibração (velocidade RMS do sinal), que foi objeto de normalização pela ISO, VDI, e no Brasil, pela ABNT. Para a análise de diagnóstico existem varias ferramentas, algumas delas foram apresentadas capítulo 3.

Neste item, serão inicialmente apresentados os sinais pré-processados relativos as condições operacionais investigadas sujeitos a ambas condições de falha 1 e 2. Posteriormente, os resultados obtidos segundo a análise estatística proposta será apresentado sobre três enfoques: capacidade do quarto momento da distribuição beta obtido sobre todo o engrenamento, denominado M4Global, como indicador do surgimento do defeito, visando a análise histórica; segundo enfoque, análise histórica descritiva da intensidade e posição da falha; terceiro enfoque, capacidade de diagnóstico independente da presença e posição da falha.

Sinais Vibratórios Pré-Processados

Os sinais vibratórios pré-processados, representativos das dezesseis condições totais estudadas, são apresentados pelas Figura 7.31 à Figura 7.46.

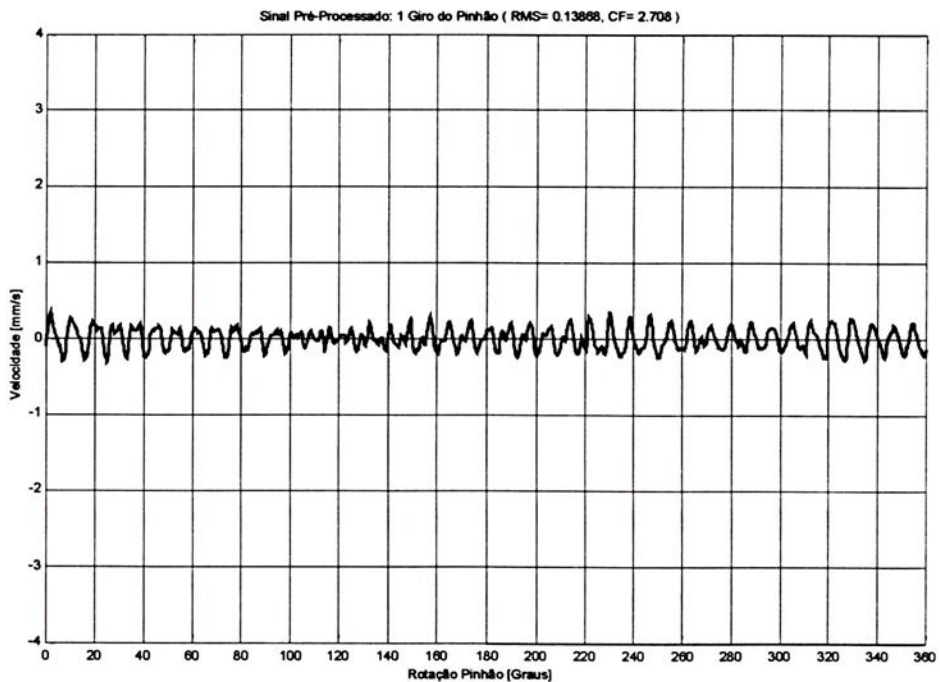


Figura 7.31 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-1 e condição de falha 1.

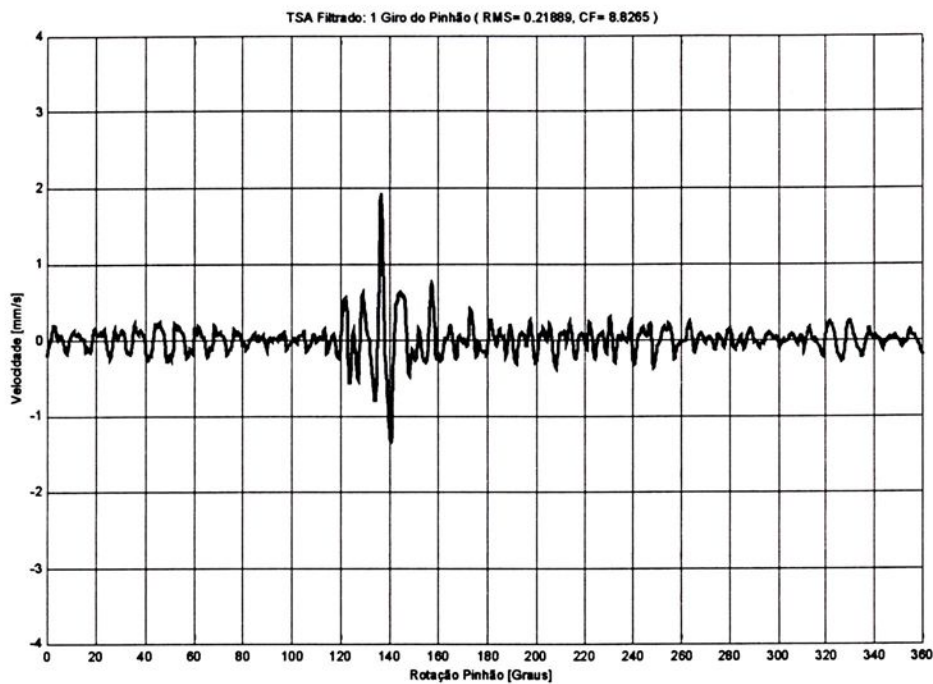


Figura 7.32 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-1 e condição de falha 2.

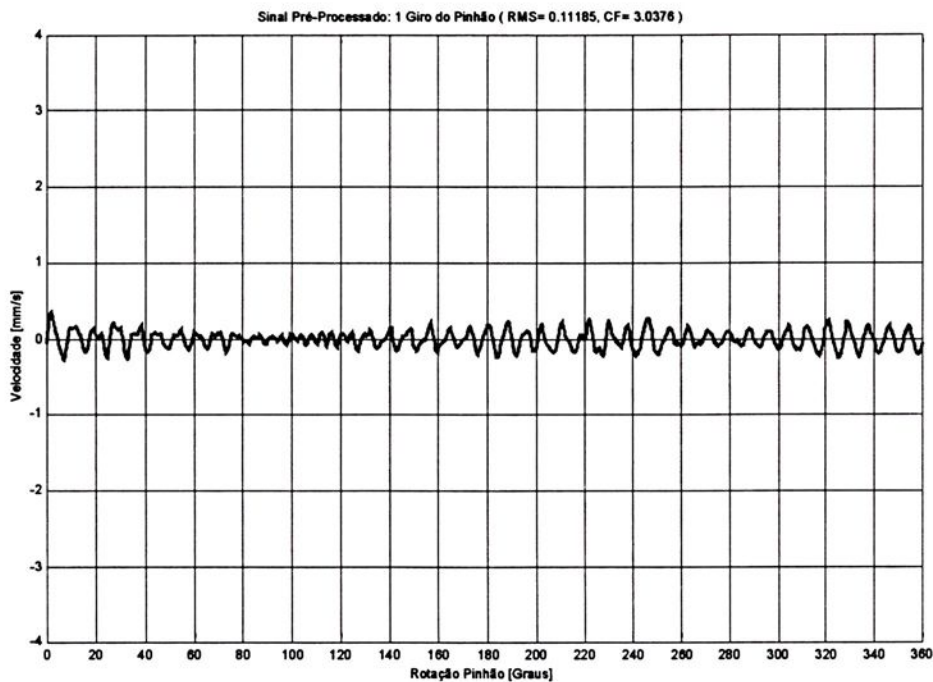


Figura 7.33 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-2 e condição de falha 1.

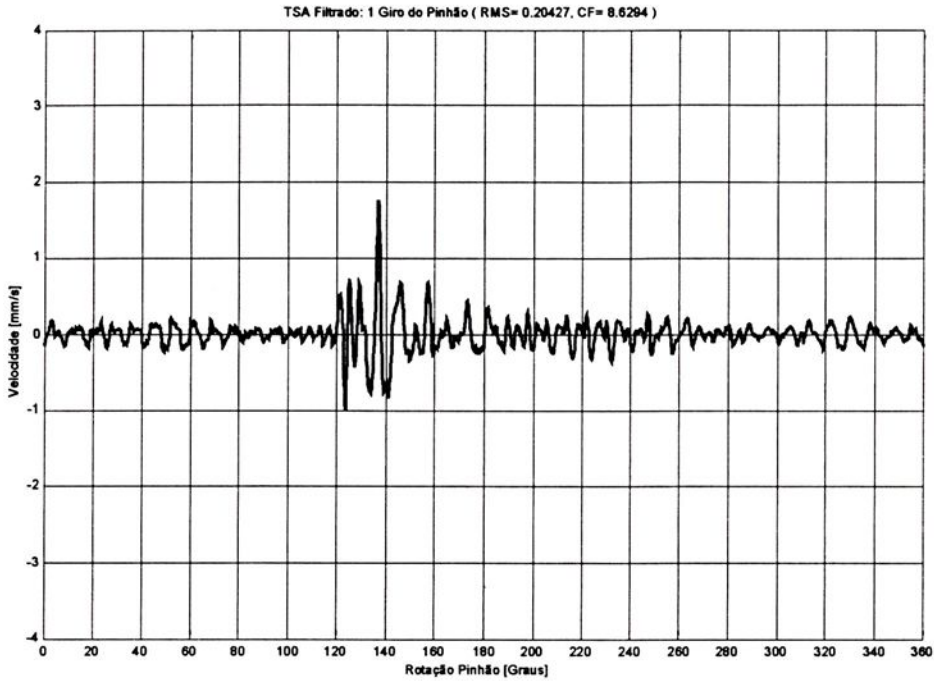


Figura 7.34 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-2 e condição de falha 2.

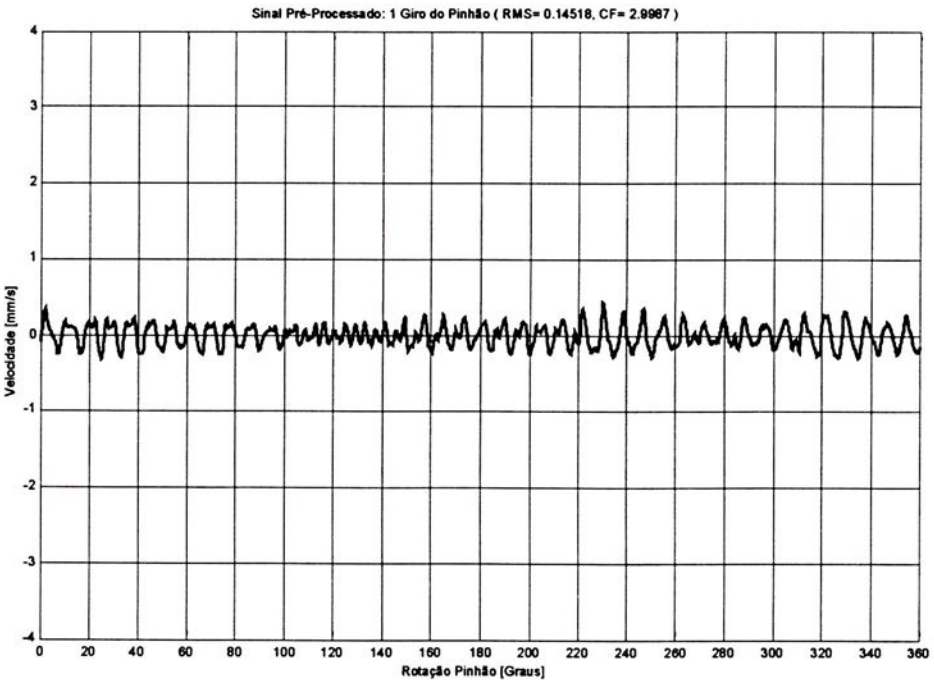


Figura 7.35 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-3 e condição de falha 1.

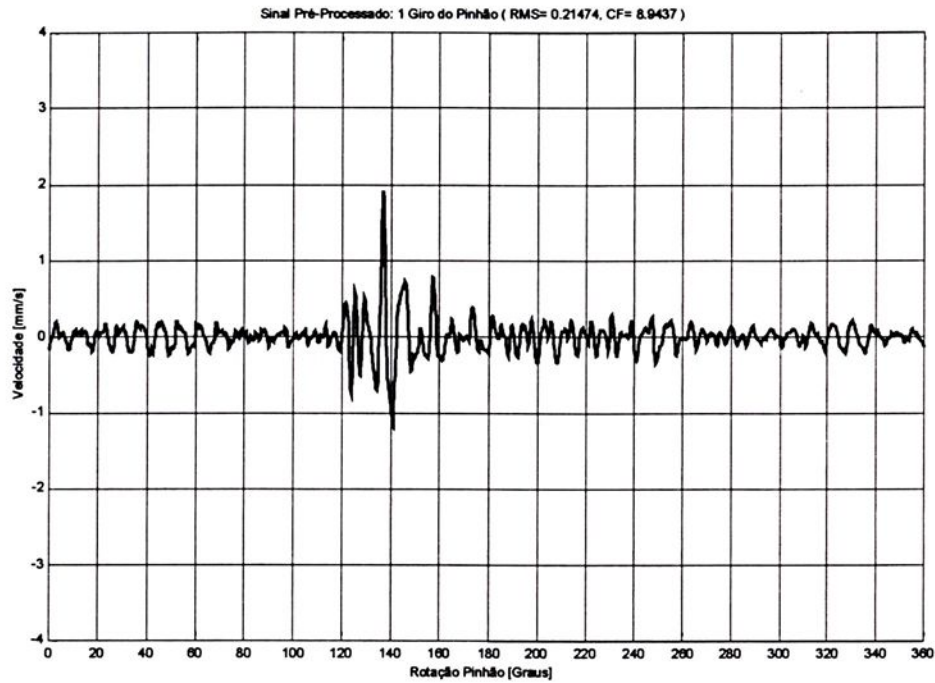


Figura 7.36 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-3 e condição de falha 2.

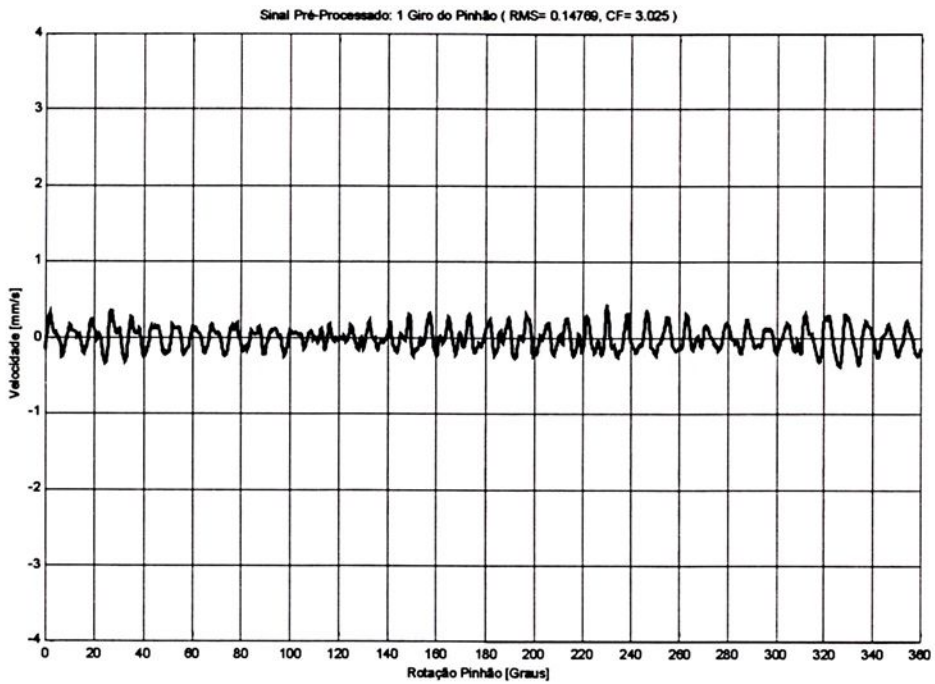


Figura 7.37 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-4 e condição de falha 1.

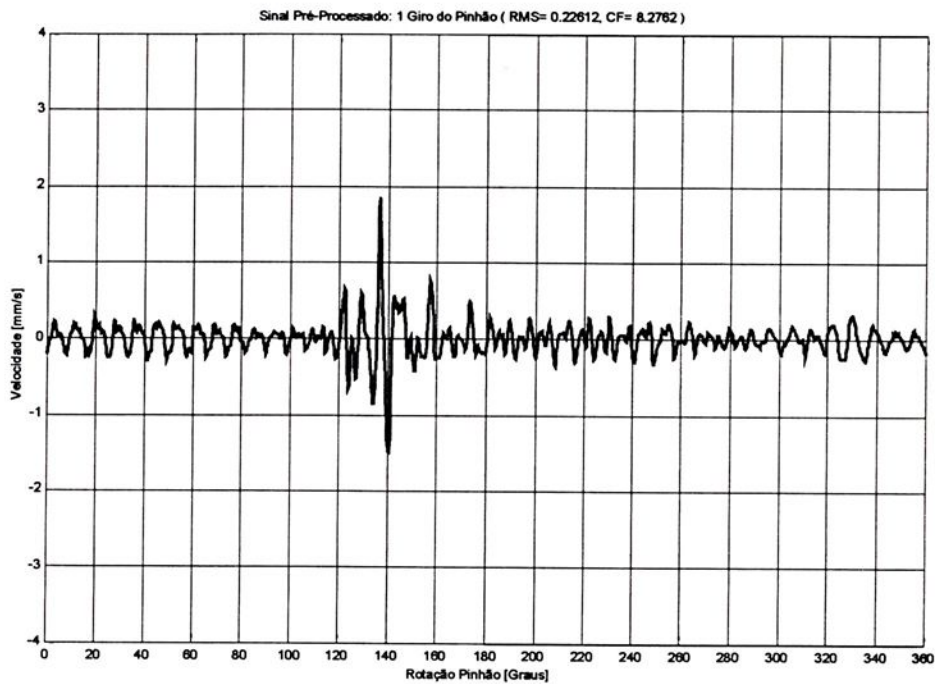


Figura 7.38 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-4 e condição de falha 2.

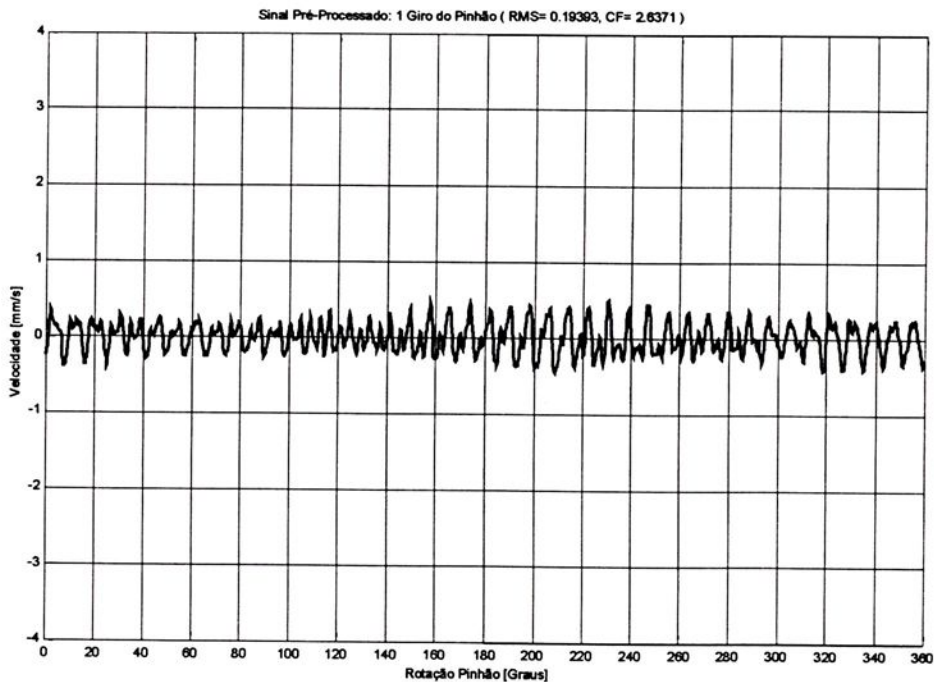


Figura 7.39 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-5 e condição de falha 1.

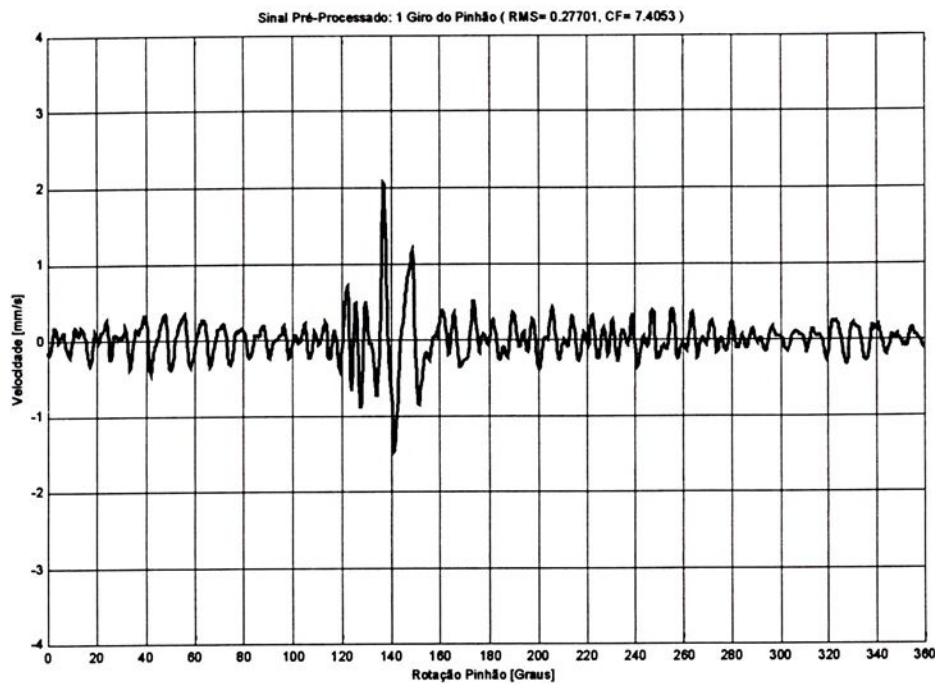


Figura 7.40 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-5 e condição de falha 2.

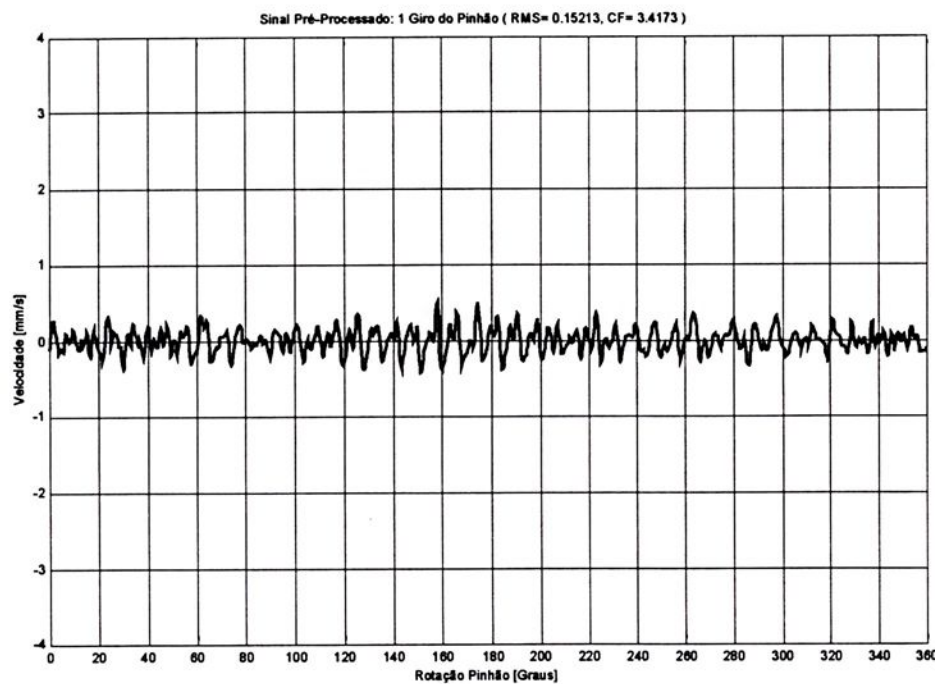


Figura 7.41 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-6 e condição de falha 1.

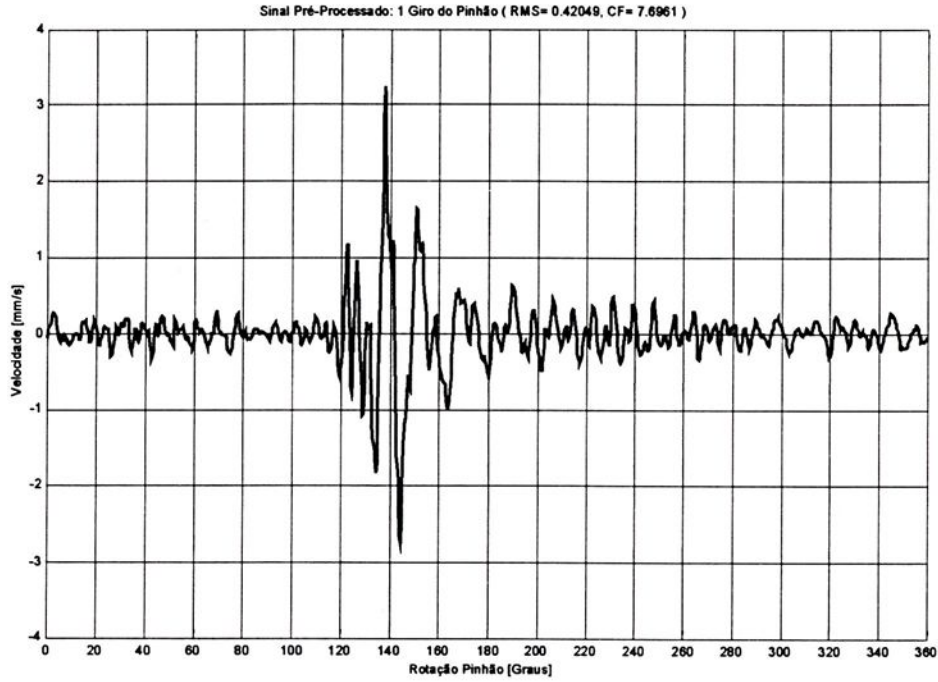


Figura 7.42 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-6 e condição de falha 2.

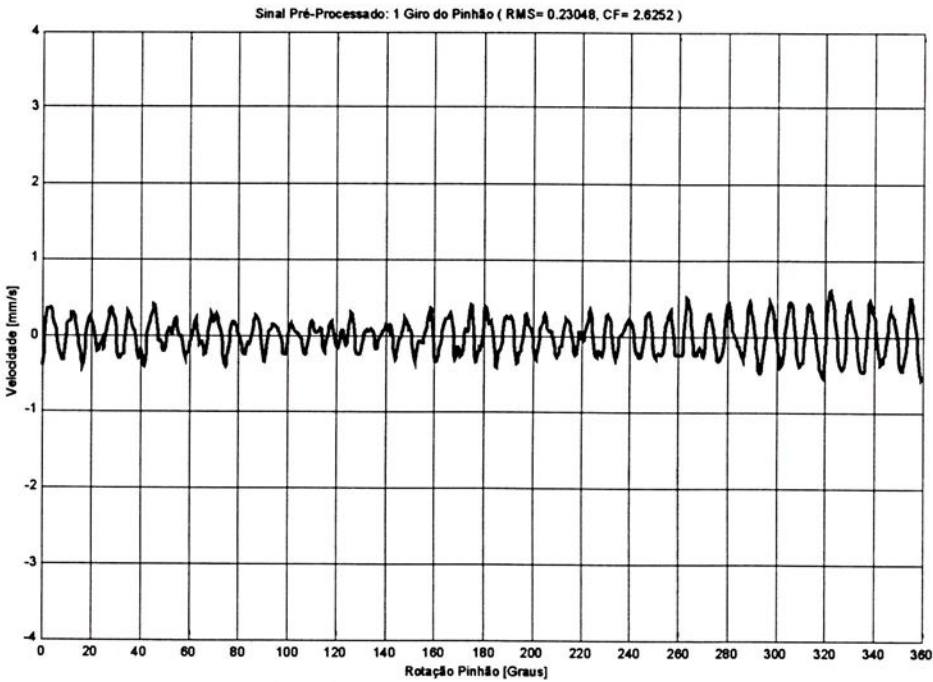


Figura 7.43 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-7 e condição de falha 1.

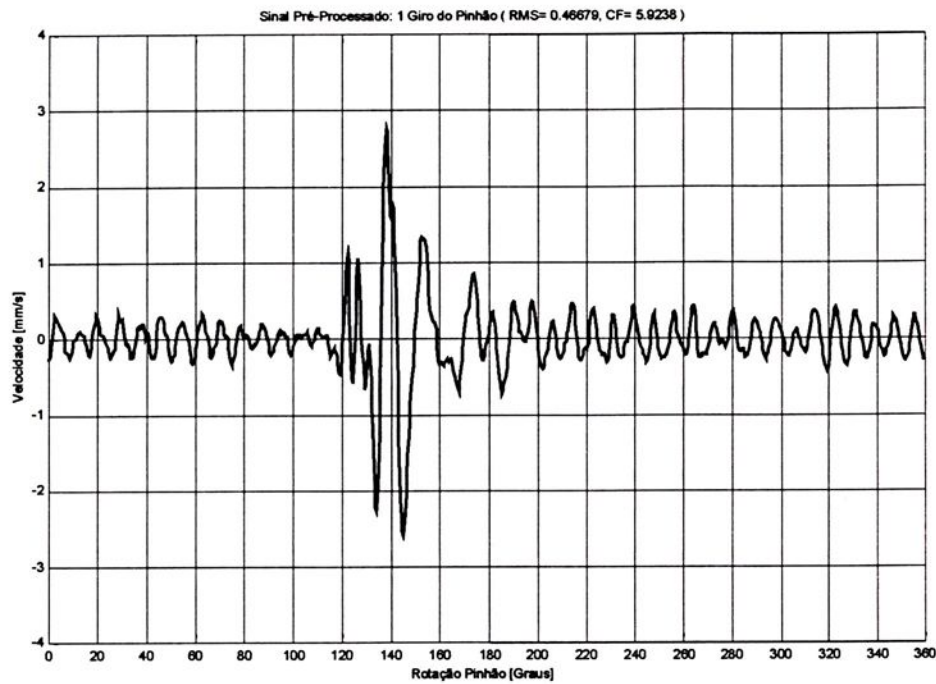


Figura 7.44 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-7 e condição de falha 2.

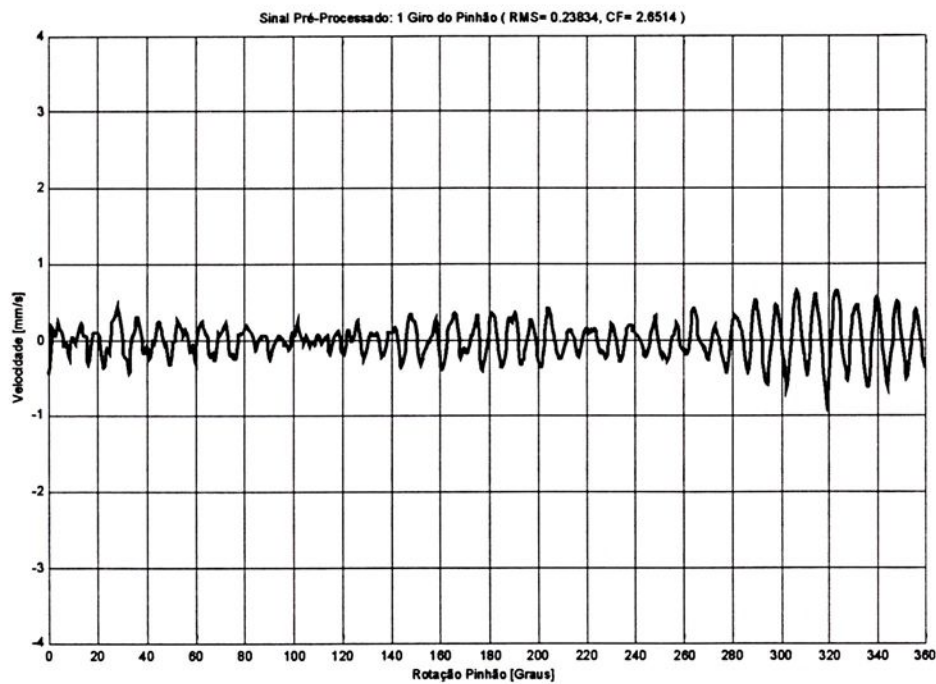


Figura 7.45 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-8 e condição de falha 1.

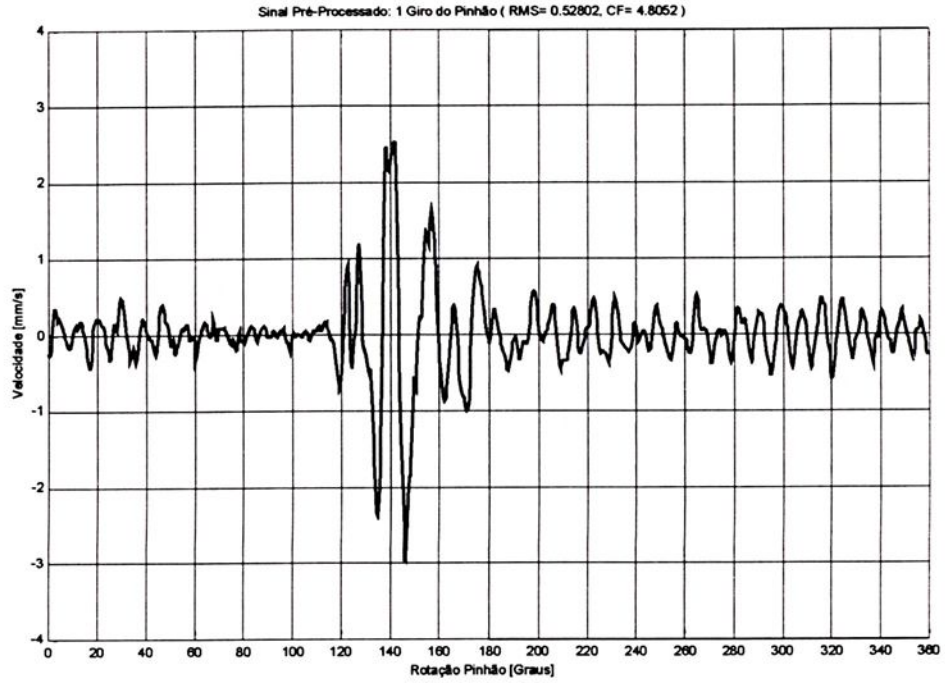


Figura 7.46 - Sinal pré-processado, obtido radialmente para a condição operacional CO-8 e condição de falha 2.

Análise Histórica: Aplicação do Parâmetro M4Global

Esta primeira análise consiste na aplicação do parâmetro denominado M4Global, na identificação do surgimento da falha. O M4Global é obtido tomando-se todos os pontos referentes a um único giro do pinhão, formando assim uma única amostra, a seguir é obtida a função densidade de probabilidade Beta para essa amostra, então utiliza-se o quarto momento desta distribuição como parâmetro descritivo.

Analizou-se independentemente o comportamento do M4Global sob a classe de operação 1 e 2, com objetivo de verificar a influência do torque e da rotação sobre seu valor, conforme demonstra a Tabela 7.7.

Tabela 7.7: Valores do parâmetro M4GLOBAL para cada uma das condições de operação submetida à condição de falha 1 e 2.

	Condição de Operação- CO	Rotação [Rpm]	Torque [N.m]	Condição Falha 1 M4GLOBAL	Condição Falha 2 M4GLOBAL
CLASSE 1	1	917	1,73	0.0003318	0.0009370
	2	918	1,32	0.0003739	0.0009561
	3	916	1,57	0.0003332	0.0009338
	4	917	2,47	0.0003649	0.0008685
CLASSE 2	5	1037	1,75	0.0003623	0.0008248
	6	1339	1,75	0.0004289	0.0013278
	7	1461	1,65	0.0003381	0.0010692
	8	1595	1,80	0.0004452	0.0011479

A Figura 7.47 apresenta o resultado comparativo sobre a influência da variação do torque sobre o parâmetro M4GLOBAL para condição de falha 1 e condições operacionais da classe 1. Obteve-se um valor médio para o parâmetro M4GLOBAL de $3.5095 \cdot 10^{-4}$ e desvio padrão de $2.1626 \cdot 10^{-5}$, em termos percentuais a variação máxima foi de 10%.

Já a Figura 7.48 apresenta o resultado comparativo sobre a influência da variação do torque sobre o parâmetro M4GLOBAL para condição de falha 2 e condições operacionais da classe 1. Obteve-se um valor médio para o parâmetro M4GLOBAL de $9.2385 \cdot 10^{-4}$ e desvio padrão de $3.8191 \cdot 10^{-5}$, em termos percentuais a variação máxima foi de 9%.

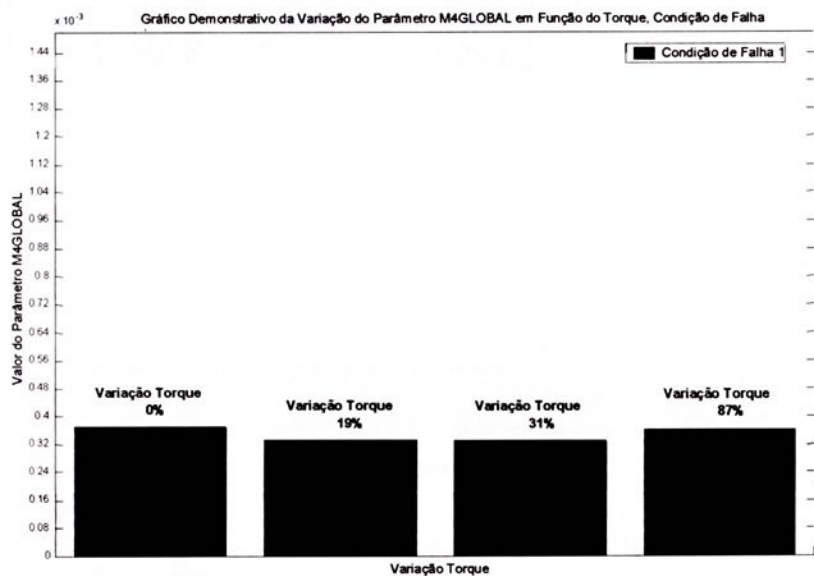


Figura 7.47 - Resultado comparativo da influência do torque sobre o parâmetro M4GLOBAL para a condição de falha 1 e condições de operação (CO) classe 1. Variação máxima de 10 %.

A Figura 7.50 apresenta o resultado comparativo entre as condições de falha 1 e 2, para condições operacionais da classe 1. Pode-se notar claramente um grande aumento do valor do parâmetro M4BLOBAL entre as condições de falha 1 e 2 indicando claramente o surgimento do defeito.

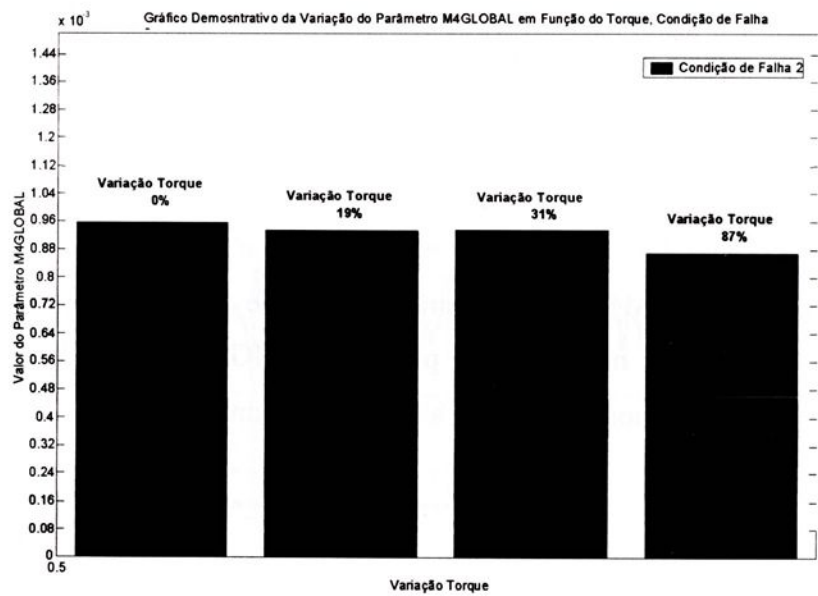


Figura 7.48 - Resultado comparativo da influência do torque sobre o parâmetro M4GLOBAL para a condição de falha 2 e condições de operação (CO) classe 1. Variação máxima de 9 %.

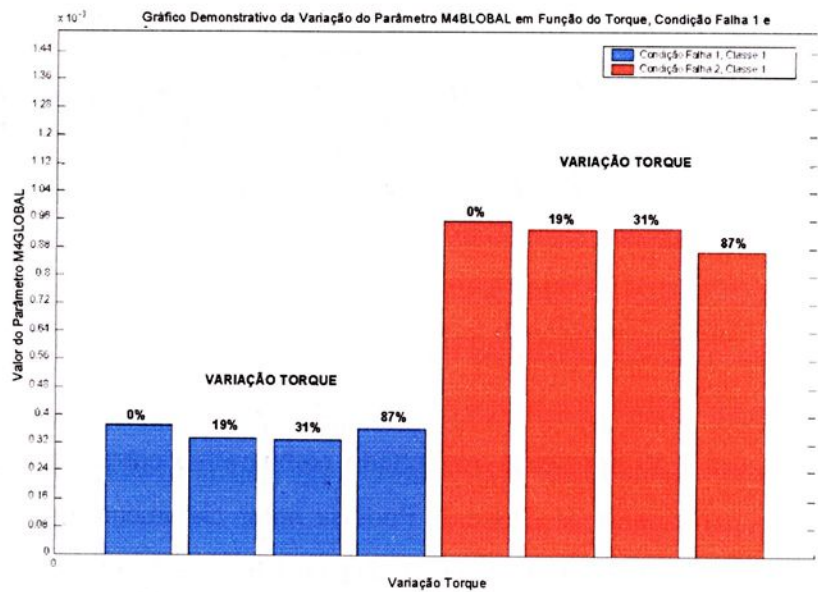


Figura 7.49 - Resultado comparativo da influência do torque sobre o parâmetro M4GLOBAL para a condição de falha 1 e 2 e condições de operação (CO) classe 1.

A Figura 7.50 apresenta o resultado comparativo sobre a influência da variação da rotação sobre o parâmetro M4GLOBAL para condição de falha 1 e condições operacionais da classe 2.

Obteve-se um valor médio para o parâmetro M4GLOBAL de $3.9362 \cdot 10^{-4}$ e desvio padrão de $5.1538 \cdot 10^{-5}$, em termos percentuais a variação máxima foi de 31%.

Já a Figura 7.51 apresenta o resultado comparativo sobre a influência da variação da rotação sobre o parâmetro M4GLOBAL para condição de falha 2 e condições operacionais da classe 2. Obteve-se um valor médio para o parâmetro M4GLOBAL de 0.0011 e desvio padrão de $2.0868 \cdot 10^{-4}$, em termos percentuais a variação máxima foi de 61%.

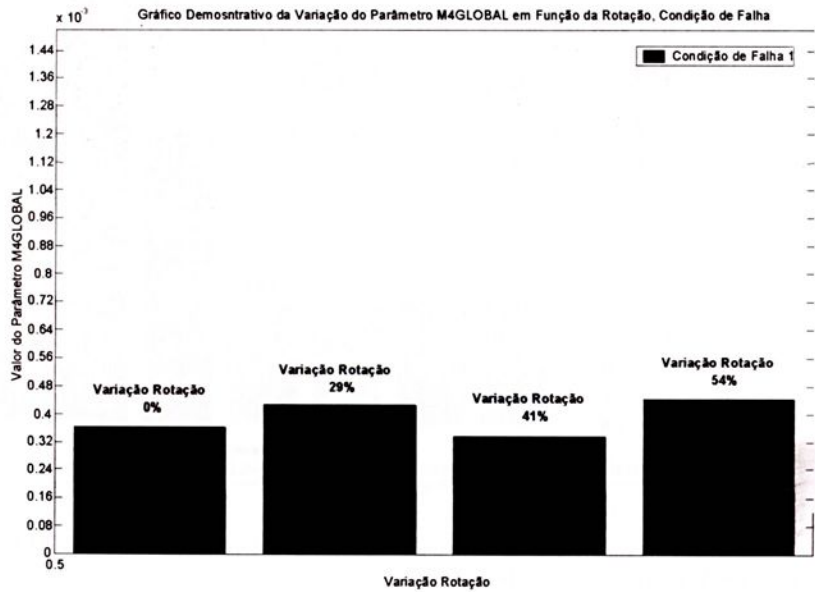


Figura 7.50 - Resultado comparativo da influência da rotação sobre o parâmetro M4GLOBAL para a condição de falha 1 e condições de operação (CO) classe 2. Variação máxima de 31 %.

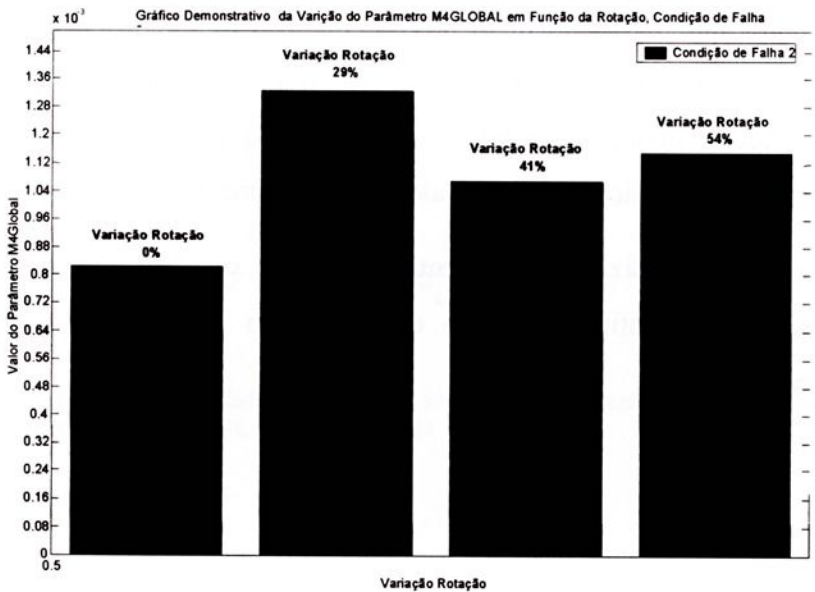


Figura 7.51 - Resultado comparativo da influência da rotação sobre o parâmetro M4GLOBAL para a condição de falha 2 e condições de operação (CO) classe 2. Variação máxima de 61 %.

A Figura 7.52 apresenta o resultado comparativo entre as condições de falha 1 e 2, para condições operacionais da classe 1. Pode-se notar que, apesar das variações serem bem mais acentuadas, ocorre um grande aumento do valor do parâmetro M4GLOBAL entre as condições de falha 1 e 2 indicando o surgimento do defeito.

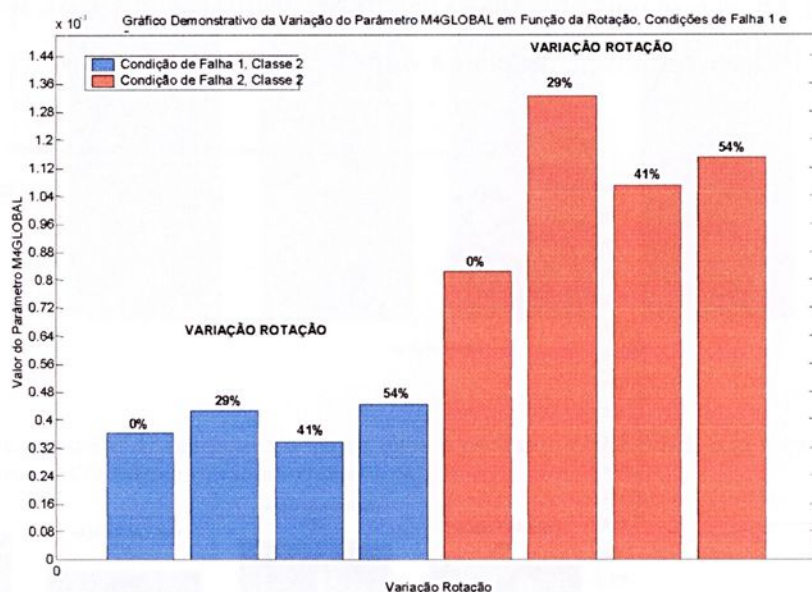


Figura 7.52 - Resultado comparativo da influência da rotação sobre o parâmetro M4GLOBAL para a condição de falha 1 e 2 e condições de operação (CO) classe 2.

Por intermédio da análise histórica baseada no parâmetro M4GLOBAL realizada, observou-se que, independentemente da condição de operação, ocorre uma grande alteração no valor deste parâmetro descritivo, indicando o aparecimento de alguma falha na engrenagem em estudo. Apesar disso, não é possível identificar que tipo de falha ocorreu, pois este parâmetro fornece uma indicação geral do estado do engrenamento.

A análise realizada e apresentada a seguir consiste em uma análise histórica e possui a capacidade de identificar não só o surgimento do defeito como identificar como também caracterizá-lo.

Análise Histórica Descritiva: Aplicação do MapM4 Histórico (HMM4)

A análise baseada no parâmetro M4GLOBAL, demonstrada acima, possibilita identificar o surgimento de um defeito na engrenagem em estudo, mas é incapaz de descrever as características deste defeito, ou seja, classificar se este defeito é distribuído ao longo de todo o engrenamento ou é localizado.

Para possibilitar esta caracterização, analisou-se os sinais de vibração obtidos utilizando um outro parâmetro, denominado HMM4. O HMM4 consiste em uma análise comparativa entre funções densidade de probabilidade Beta, especificamente entre a fdp Beta global obtida utilizando todos os pontos relativos a um único giro da engrenagem e a fdp Beta obtida para cada um dos dentes, obtendo assim um valor descritivo da condição de cada um dos dentes da engrenagem em análise. A fdp Beta global utilizada como base foi obtida para a condição de operação CO-9 e condição de falha 1. A Figura 7.53 apresenta esta fdp.

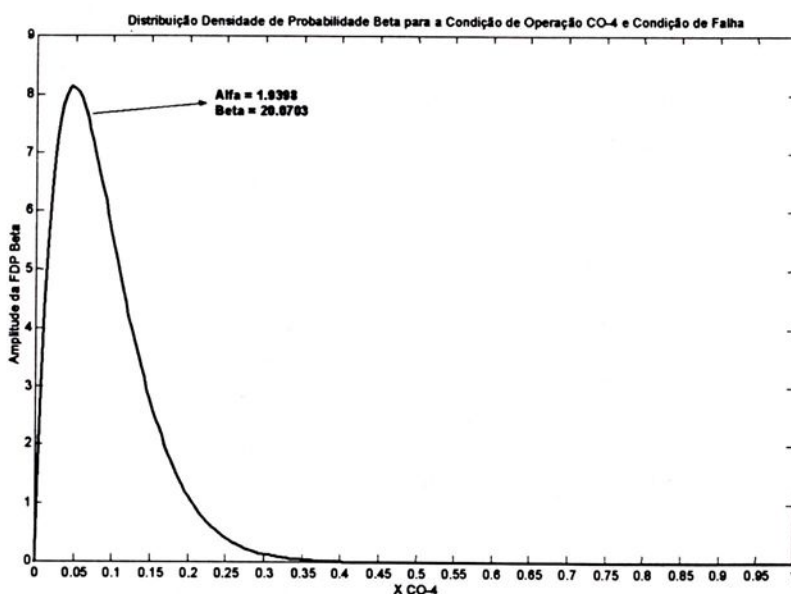


Figura 7.53 - Função densidade de probabilidade Beta referente a condição de operação CO-4 e condição de falha 1 utilizada como referência. Parâmetros $\alpha = 1.9398$, $\beta = 20.0703$ e $M4 = 3.6494 \cdot 10^{-4}$.

Foram verificadas as duas condições de falha para cada uma das oito condições de operação. A Tabela 7.8 apresenta os valores do parâmetro HMM4 para condição de falha 1, obtido segundo o procedimento descrito acima e aplicando a Eq. 7.4, para as quatro primeiras condições operacionais.

Tabela 7.8: Parâmetro HMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 Global ($.3.6494 \cdot 10^{-4}$) e condições de operação indicadas para condição de falha 1.

Condição Falha 1	Parâmetro HMM4			
Número do Dente	CO-1	CO-2	CO-3	CO-4
1	2.142	6.862	0.911	0.315
2	1.309	0.044	0.661	0.741
3	0.309	0.157	0.062	0.686
4	0.762	1.696	0.791	2.402
5	0.379	0.575	0.768	0.488
6	0.356	0.762	0.133	0.553
7	0.720	0.789	0.618	0.448
8	0.755	0.836	0.725	0.773
9	0.414	0.801	0.264	0.657
10	0.160	0.894	0.264	0.394
11	0.736	0.988	0.761	0.862
12	0.789	0.992	0.827	0.774
13	0.839	0.981	0.814	0.760
14	0.887	0.953	0.917	0.935
15	0.897	0.928	0.860	0.775
16	0.819	0.804	0.888	0.854
17	0.714	0.754	0.908	0.678
18	0.804	0.575	0.823	0.538
19	0.183	0.574	0.408	0.290
20	0.215	0.068	0.114	0.499
21	0.262	0.644	0.093	0.217
22	0.125	0.044	0.246	0.091
23	0.631	0.841	0.549	0.437
24	0.002	1.147	0.138	0.480
25	0.184	0.160	0.281	0.701
26	0.400	0.463	0.479	0.375
27	0.044	0.457	0.054	0.043
28	0.149	1.824	0.931	0.091
29	2.269	0.421	3.867	2.820
30	0.367	0.451	0.608	0.419
31	1.311	2.631	1.581	0.772
32	0.308	0.727	0.211	0.146
33	0.370	0.661	0.367	0.014
34	0.750	0.893	0.887	0.850
35	0.657	0.889	0.656	0.690
36	0.552	0.748	0.513	0.494
37	0.656	0.748	0.683	0.818
38	0.568	0.353	0.571	0.603
39	0.275	0.386	0.192	0.072
40	1.247	2.181	1.508	1.792
41	1.451	1.520	1.971	3.623
42	0.232	0.216	0.618	1.339
43	0.351	0.008	0.352	0.320
44	0.178	0.191	0.264	0.287



Graficamente, as Figura 7.54 e Figura 7.55 apresentam os valores de HMM4 para as condições descritas na Tabela 7.8, a partir da qual observa-se a qualidade do engrenamento individualmente, relativo a cada um dos dentes.

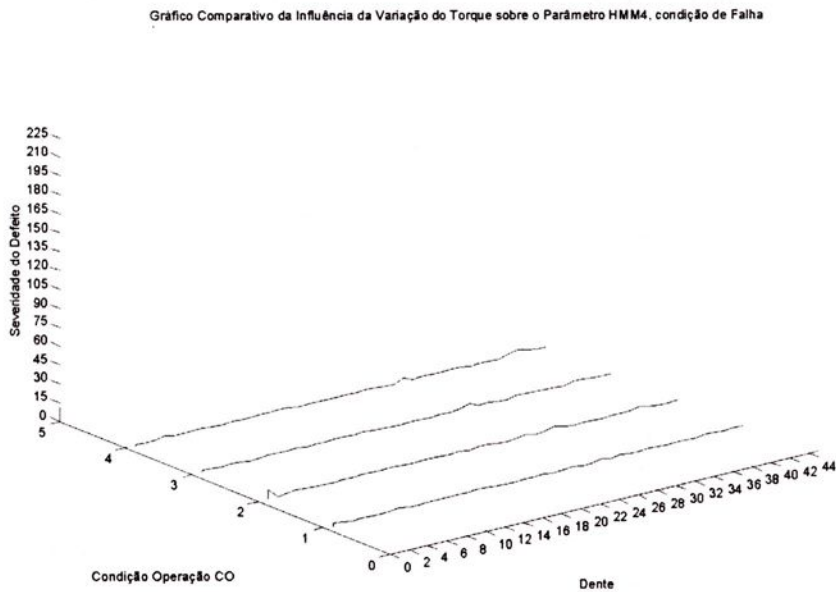


Figura 7.54 - Valores do parâmetro HMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 1.

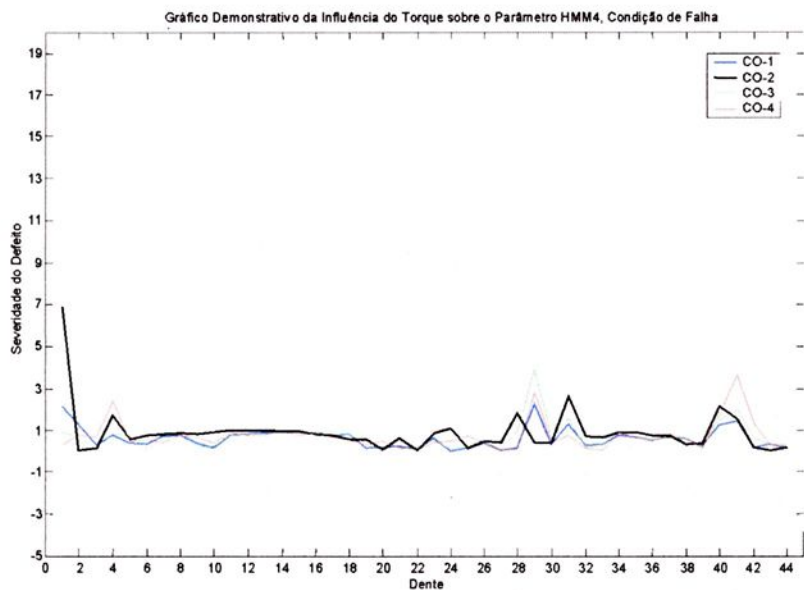


Figura 7.55 - Zoom dos valores do parâmetro HMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 1.

As quatro últimas condições operacionais, seguido dos valores do parâmetro HMM4 para condição de falha 1 são apresentadas na Tabela 7.9.

Tabela 7.9: Parâmetro HMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 Global ($3.6494 \cdot 10^{-4}$) e condições de operação indicadas para condição de falha 1.

<i>Condição Falha 1</i>	Parâmetro HMM4			
Número do Dente	CO-5	CO-6	CO-7	CO-8
1	0.000	0.552	0.069	0.647
2	0.428	0.927	0.468	0.923
3	0.431	0.266	0.459	0.586
4	0.138	0.221	0.297	0.010
5	0.645	0.566	0.558	0.348
6	0.478	0.825	0.304	0.851
7	0.838	0.725	0.909	0.695
8	0.756	1.216	0.789	0.806
9	0.691	0.301	0.710	0.846
10	0.795	0.259	0.422	0.861
11	0.876	0.991	0.780	0.958
12	0.695	0.724	0.743	0.948
13	0.755	0.201	0.890	0.954
14	0.699	0.698	0.888	0.999
15	0.216	1.081	0.931	0.958
16	0.753	2.727	0.743	0.877
17	0.777	0.123	0.950	0.933
18	0.650	1.030	0.841	0.750
19	0.083	1.945	0.686	0.419
20	0.407	8.361	0.236	0.703
21	0.609	2.659	0.554	0.256
22	1.177	4.857	0.108	0.772
23	0.004	1.049	0.126	0.034
24	0.946	1.505	0.503	0.213
25	1.987	0.268	0.568	0.573
26	1.705	0.505	0.791	0.151
27	3.261	0.799	0.798	0.884
28	1.392	0.270	0.674	0.956
29	2.176	0.101	0.551	0.892
30	0.826	0.278	0.727	0.826
31	0.384	0.281	0.424	0.756
32	0.028	0.621	0.436	0.804
33	0.483	1.582	0.497	0.237
34	0.023	0.176	0.643	0.851
35	0.333	0.454	0.373	0.110
36	0.411	0.460	0.148	0.314
37	0.035	0.651	1.827	3.143
38	0.608	0.015	0.975	3.705
39	0.633	0.834	0.823	4.039
40	0.311	0.152	5.509	18.056
41	0.571	0.528	2.127	5.146
42	0.150	0.648	2.109	3.651
43	0.048	0.836	0.132	4.178
44	0.255	0.921	1.225	1.924

Graficamente, as Figura 7.56 e Figura 7.57 apresenta o parâmetro HMM4 para as condições descritas na Tabela 7.9, visando verificar a influência da variação de rotação sobre este parâmetro.

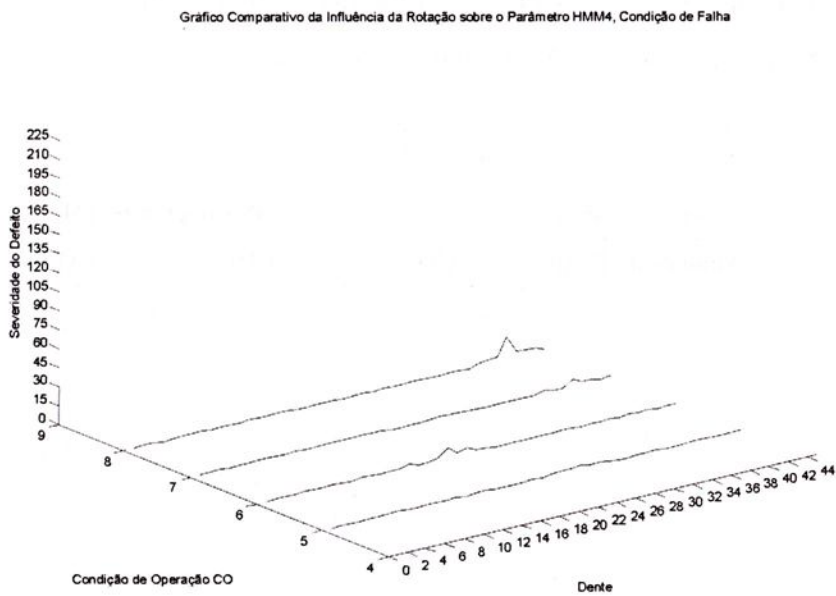


Figura 7.56 - Valores do parâmetro HMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 1.

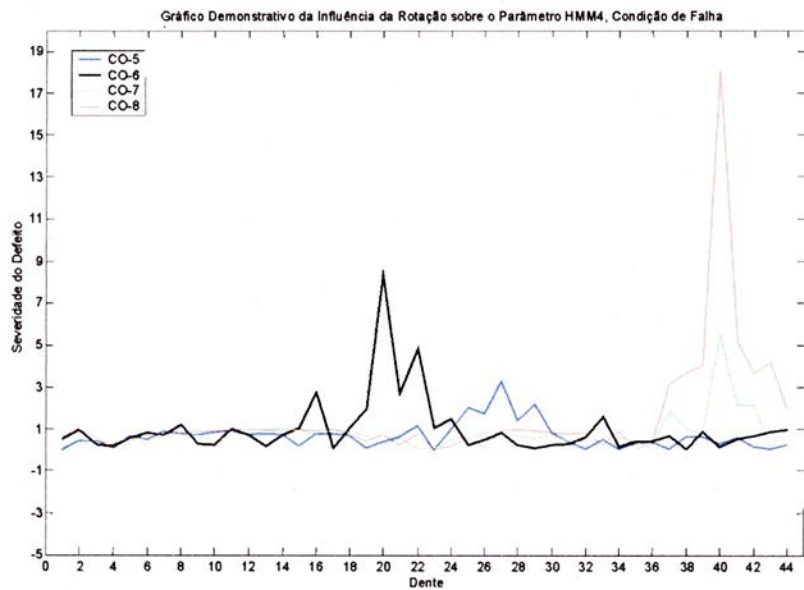


Figura 7.57 - Zoom dos valores do parâmetro HMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 1.

As Tabela 7.8 e Tabela 7.9 assim como as Figura 7.54, Figura 7.55, Figura 7.56 e Figura 7.57 apresentaram os valores numéricos e as formas gráficas relativas ao parâmetro HMM4 para a condição de falha 1.

A seguir, serão apresentados da mesma forma os valores numéricos e gráficos obtidos por intermédio do parâmetro HMM4, para a condição de falha 2.

Tabela 7.10: Parâmetro HMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 Global ($3.6494 \cdot 10^{-4}$) e condições de operação indicadas para condição de falha 2.

<i>Condição Falha 2</i>	Parâmetro HMM4			
Número do Dente	CO-1	CO-2	CO-3	CO-4
1	0.917	0.955	0.949	0.891
2	0.977	0.985	0.987	0.914
3	0.970	0.962	0.962	0.875
4	0.924	0.968	0.937	0.801
5	0.904	0.979	0.868	0.835
6	0.737	0.940	0.803	0.791
7	0.801	0.831	0.891	0.870
8	0.914	0.900	0.929	0.893
9	0.945	0.931	0.949	0.922
10	0.969	0.983	0.989	0.929
11	0.996	0.994	0.997	0.976
12	0.992	0.995	0.989	0.980
13	0.992	0.996	0.992	0.962
14	0.987	0.991	0.991	0.975
15	1.534	0.477	0.092	0.921
16	4.799	28.244	7.509	7.323
17	191.608	200.939	191.359	163.050
18	79.827	30.965	63.052	97.832
19	0.103	3.053	0.315	0.054
20	5.577	4.193	7.540	5.070
21	0.853	0.935	0.895	0.927
22	0.418	0.412	0.389	0.004
23	0.882	0.514	0.755	0.872
24	0.804	0.872	0.814	0.787
25	0.726	0.793	0.533	0.843
26	0.584	0.824	0.546	0.700
27	0.861	0.562	0.866	0.708
28	0.888	0.510	0.891	0.820
29	0.596	0.452	0.704	0.721
30	0.702	0.902	0.639	0.820
31	0.582	0.688	0.573	0.714
32	0.851	0.773	0.820	0.913
33	0.900	0.911	0.934	0.917
34	0.995	0.993	0.998	0.997
35	0.980	0.985	0.983	0.985
36	0.981	0.987	0.983	0.986
37	0.995	0.996	0.983	0.960
38	0.999	0.987	0.988	0.973
39	0.976	0.946	0.961	0.942
40	0.799	0.920	0.920	0.863
41	0.675	0.826	0.858	0.550
42	0.926	0.938	0.932	0.792
43	0.996	0.994	0.997	0.978
44	0.989	0.991	0.996	0.987

Graficamente, as Figura 7.58 e Figura 7.59 apresentam os valores de HMM4 para as condições descritas na Tabela 7.10, a partir da qual observa-se a qualidade do engrenamento individualmente, relativo a cada um dos dentes.

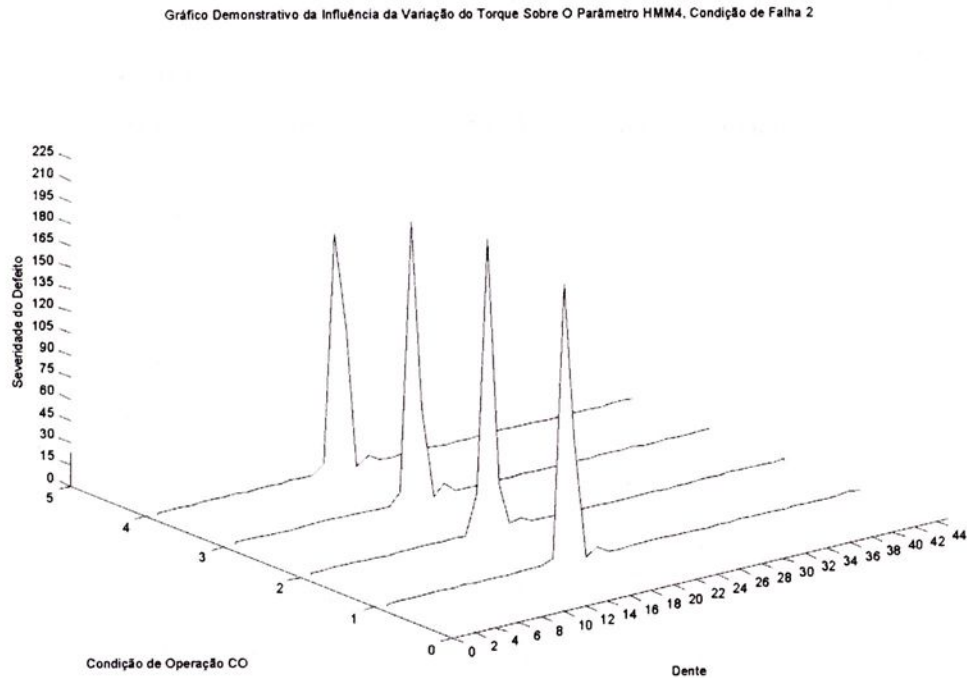


Figura 7.58 - Valores do parâmetro HMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 2.

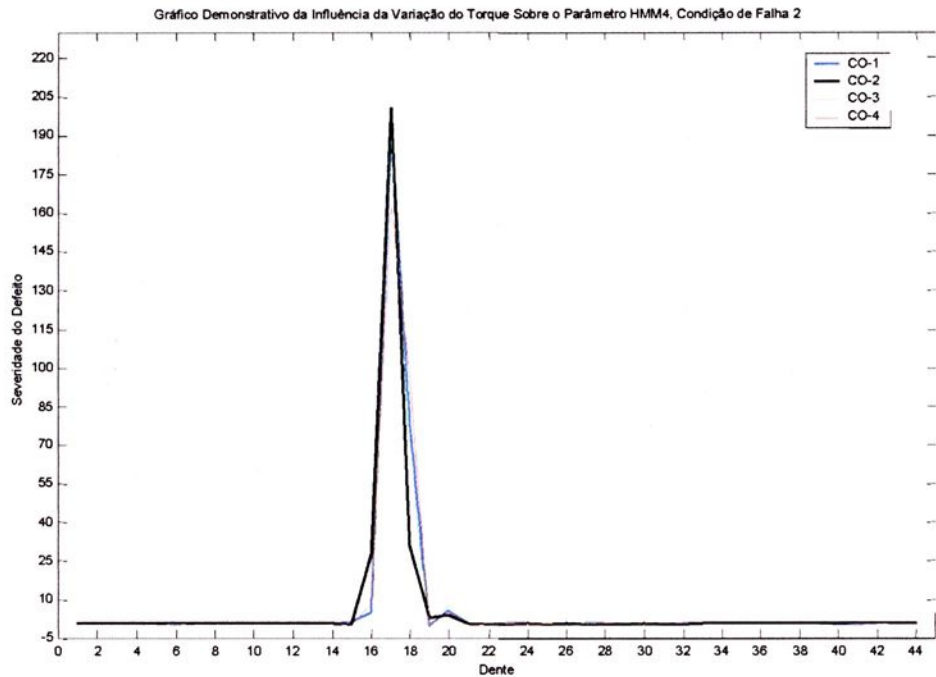


Figura 7.59 - Zoom dos valores do parâmetro HMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 2.

Tabela 7.11: Parâmetro HMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 Global ($.3.6494 \cdot 10^{-4}$) e condições de operação indicadas para condição de falha 2.

<i>Condição Falha 2</i>	Parâmetro HMM4			
Número do Dente	CO-5	CO-6	CO-7	CO-8
1	0.981	0.988	0.981	0.984
2	0.966	0.996	0.995	0.997
3	0.855	0.998	0.987	0.971
4	0.955	0.984	0.980	0.924
5	0.704	0.993	0.991	0.978
6	0.525	0.966	0.975	0.969
7	0.565	0.997	0.983	0.997
8	0.735	0.997	0.963	0.992
9	0.820	0.981	0.989	0.999
10	0.871	0.980	0.978	0.999
11	0.968	1.000	0.997	1.000
12	0.956	0.999	0.997	1.000
13	0.960	0.997	0.998	0.998
14	0.949	0.996	1.000	1.000
15	0.767	0.801	0.927	0.703
16	7.013	4.768	2.212	1.105
17	3.600	29.135	49.959	32.775
18	193.714	214.391	154.200	111.424
19	29.966	38.424	39.164	83.060
20	1.445	1.563	3.597	10.574
21	0.589	1.761	0.586	0.246
22	0.073	0.778	0.195	1.231
23	0.950	0.755	0.716	0.855
24	0.789	0.612	0.558	0.941
25	0.960	0.962	0.857	0.872
26	0.264	0.765	0.954	0.959
27	0.863	0.979	0.909	0.944
28	0.854	0.923	0.956	0.955
29	0.913	0.868	0.975	0.937
30	0.811	0.896	0.928	0.996
31	0.530	0.914	0.969	0.970
32	0.764	0.991	0.969	0.983
33	0.839	0.989	0.948	0.937
34	0.864	0.976	0.986	0.966
35	0.959	0.994	0.973	0.980
36	0.978	0.993	0.988	0.980
37	0.987	0.997	0.983	0.916
38	0.986	0.987	0.993	0.944
39	0.991	1.000	0.968	0.965
40	0.948	0.968	0.884	0.832
41	0.823	0.993	0.931	0.938
42	0.881	0.995	0.971	0.974
43	0.920	0.984	0.990	0.990
44	0.986	0.989	0.977	0.982

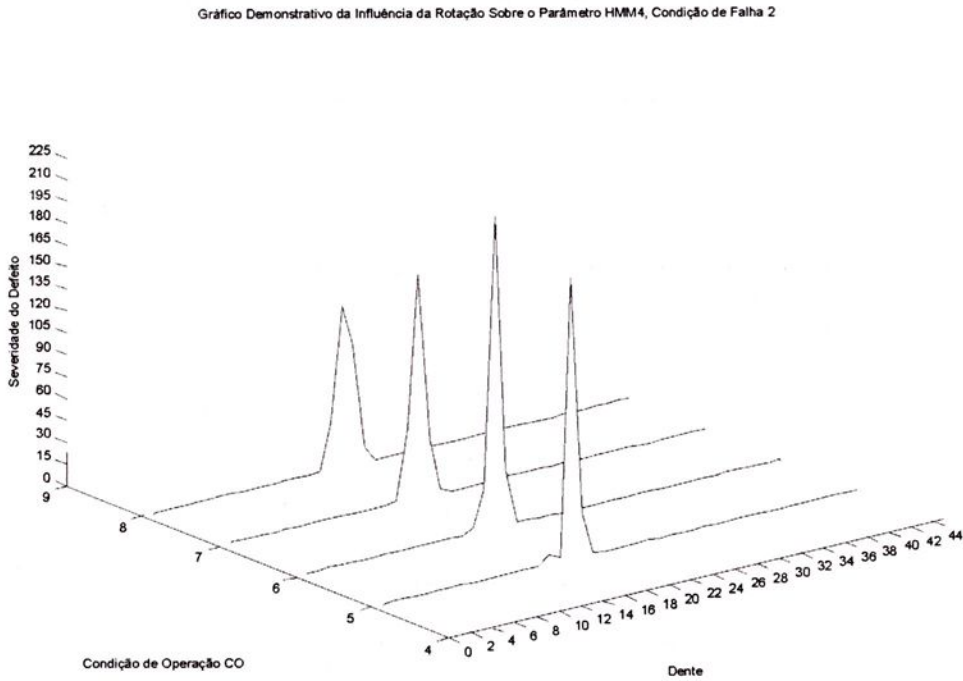


Figura 7.60 - Valores do parâmetro HMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 2.

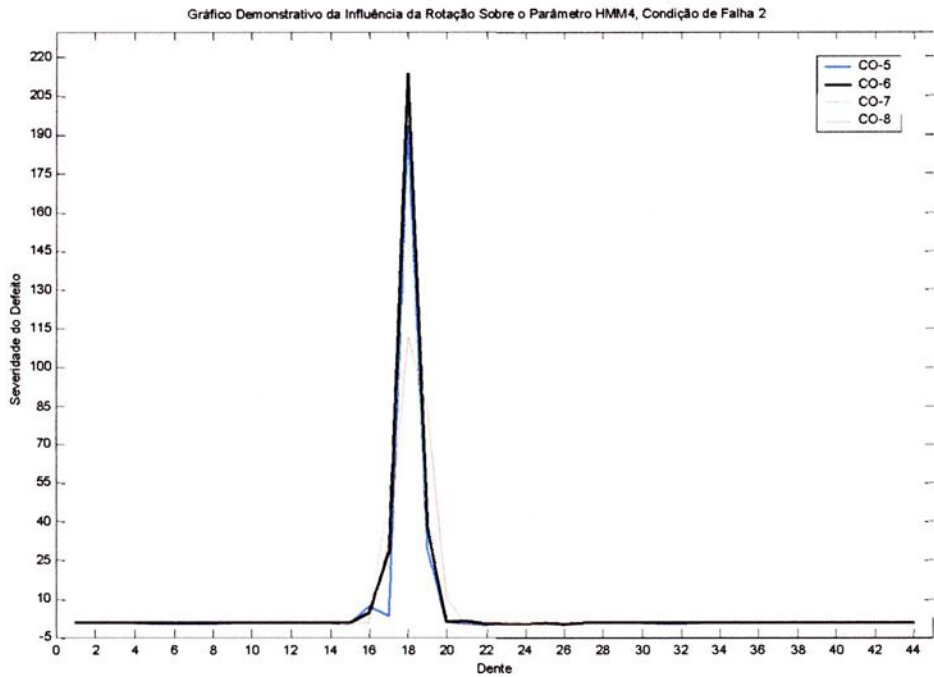


Figura 7.61 - Zoom dos valores do parâmetro HMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 2.

Análise Diagnóstico Independente: Aplicação do MapM4 Independente (IMM4)

A análise baseada no parâmetro HMM4, demonstrada no item anterior, possibilitou identificar o surgimento de um defeito na engrenagem em estudo, indicando claramente a presença e localização do defeito. A grande característica desse parâmetro é que a fdp Beta de referência é obtida para a condição de falha 1, ou seja, para a engrenagem sem defeito, sendo utilizada para todas as análises.

Já o parâmetro IMM4, é caracterizado por utilizar para cada uma das análises, uma fdp diferente obtida para cada uma das condições analisadas, o que possibilita a análise mesmo quando não foi possível a obtenção de uma fdp Beta de referência para a engrenagem nova.

Da mesma forma utilizada para o HMM4, foram verificados as duas condições de falha para cada uma das oito condições de operação. A Tabela 7.12 apresenta os valores do parâmetro IMM4 para condição de falha 1, obtido segundo o procedimento descrito acima e aplicando a Eq. 7.4, para as quatro primeiras condições operacionais.



Tabela 7.12: Parâmetro IMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 individual relativo a cada uma das condições de operação indicadas, condição de falha 1.

Condição Falha 1	Parâmetro IMM4			
Número do Dente	CO-1	CO-2	CO-3	CO-4
1	2.456	6.674	1.093	0.315
2	1.540	0.019	0.629	0.741
3	0.439	0.177	0.028	0.686
4	0.938	1.632	0.961	2.402
5	0.517	0.538	0.937	0.488
6	0.292	0.768	0.051	0.553
7	0.692	0.794	0.582	0.448
8	0.731	0.840	0.699	0.773
9	0.355	0.806	0.195	0.657
10	0.076	0.897	0.195	0.394
11	0.710	0.989	0.738	0.862
12	0.768	0.993	0.811	0.774
13	0.823	0.981	0.797	0.760
14	0.875	0.954	0.909	0.935
15	0.887	0.930	0.846	0.775
16	0.801	0.809	0.878	0.854
17	0.686	0.760	0.900	0.678
18	0.785	0.585	0.806	0.538
19	0.102	0.585	0.352	0.290
20	0.337	0.043	0.220	0.499
21	0.188	0.653	0.007	0.217
22	0.037	0.067	0.175	0.091
23	0.594	0.797	0.506	0.437
24	0.097	1.096	0.056	0.480
25	0.102	0.180	0.212	0.701
26	0.340	0.428	0.430	0.375
27	0.051	0.470	0.035	0.043
28	0.264	1.756	1.115	0.091
29	2.596	0.387	4.330	2.820
30	0.504	0.416	0.761	0.419
31	1.542	2.545	1.827	0.772
32	0.238	0.734	0.136	0.146
33	0.307	0.669	0.307	0.014
34	0.725	0.896	0.876	0.850
35	0.623	0.891	0.624	0.690
36	0.508	0.754	0.467	0.494
37	0.622	0.754	0.653	0.818
38	0.524	0.368	0.531	0.603
39	0.402	0.353	0.305	0.072
40	1.471	2.105	1.746	1.792
41	1.696	1.460	2.254	3.623
42	0.355	0.187	0.772	1.339
43	0.287	0.016	0.290	0.320
44	0.096	0.162	0.384	0.287



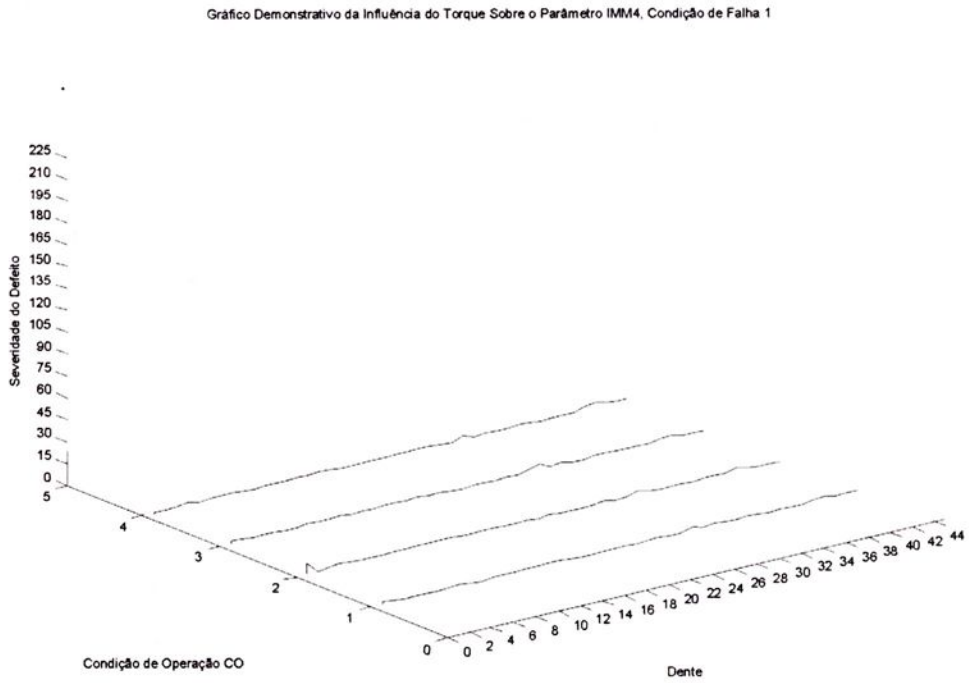


Figura 7.62 - Valores do parâmetro IMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 1.

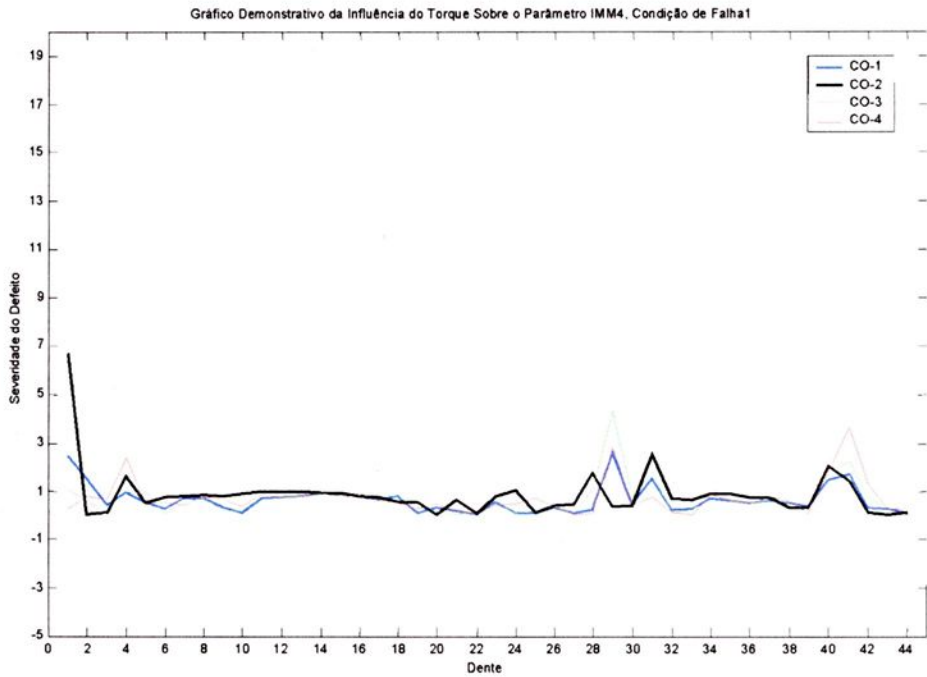


Figura 7.63 - Zoom dos valores do parâmetro IMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 1.

As quatro últimas condições operacionais, seguido dos valores do parâmetro IMM4 para condição de falha 1 são apresentadas na Tabela 7.13.

Tabela 7.13: Parâmetro IMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 individual relativo a cada uma das condições de operação indicadas, condição de falha 1.

Condição Falha 1	Parâmetro IMM4			
Número do Dente	CO-5	CO-6	CO-7	CO-8
1	0.007	0.619	0.154	0.711
2	0.424	0.938	0.426	0.937
3	0.427	0.077	0.416	0.660
4	0.146	0.039	0.241	0.188
5	0.642	0.631	0.522	0.465
6	0.474	0.851	0.408	0.878
7	0.837	0.766	0.902	0.750
8	0.754	0.885	0.772	0.841
9	0.689	0.405	0.687	0.874
10	0.793	0.071	0.376	0.886
11	0.875	0.992	0.763	0.966
12	0.693	0.765	0.723	0.957
13	0.753	0.320	0.881	0.962
14	0.697	0.743	0.879	0.999
15	0.211	0.771	0.925	0.965
16	0.751	2.171	0.723	0.899
17	0.776	0.253	0.946	0.945
18	0.648	0.728	0.829	0.795
19	0.076	1.506	0.661	0.524
20	0.417	6.965	0.176	0.756
21	0.621	2.113	0.518	0.390
22	1.193	3.984	0.037	0.814
23	0.003	0.743	0.056	0.152
24	0.961	1.132	0.464	0.355
25	2.009	0.079	0.533	0.650
26	1.725	0.579	0.775	0.056
27	3.292	0.829	0.782	0.905
28	1.410	0.081	0.648	0.964
29	2.200	0.235	0.515	0.912
30	0.839	0.385	0.705	0.857
31	0.395	0.388	0.379	0.800
32	0.021	0.678	0.391	0.839
33	0.479	1.197	0.616	0.374
34	0.031	0.299	0.615	0.878
35	0.328	0.536	0.482	0.090
36	0.406	0.242	0.239	0.077
37	0.028	0.703	2.052	2.397
38	0.605	0.136	1.132	2.857
39	0.630	0.859	0.968	3.130
40	0.321	0.020	6.026	14.621
41	0.583	0.598	2.375	4.038
42	0.144	0.701	2.356	2.813
43	0.041	0.860	0.222	3.245
44	0.249	0.933	1.402	1.397

Graficamente, as Figura 7.64 e Figura 7.65 apresentam o parâmetro IMM4 para as condições descritas na Tabela 7.13, visando verificar a influência da variação de rotação sobre este parâmetro.



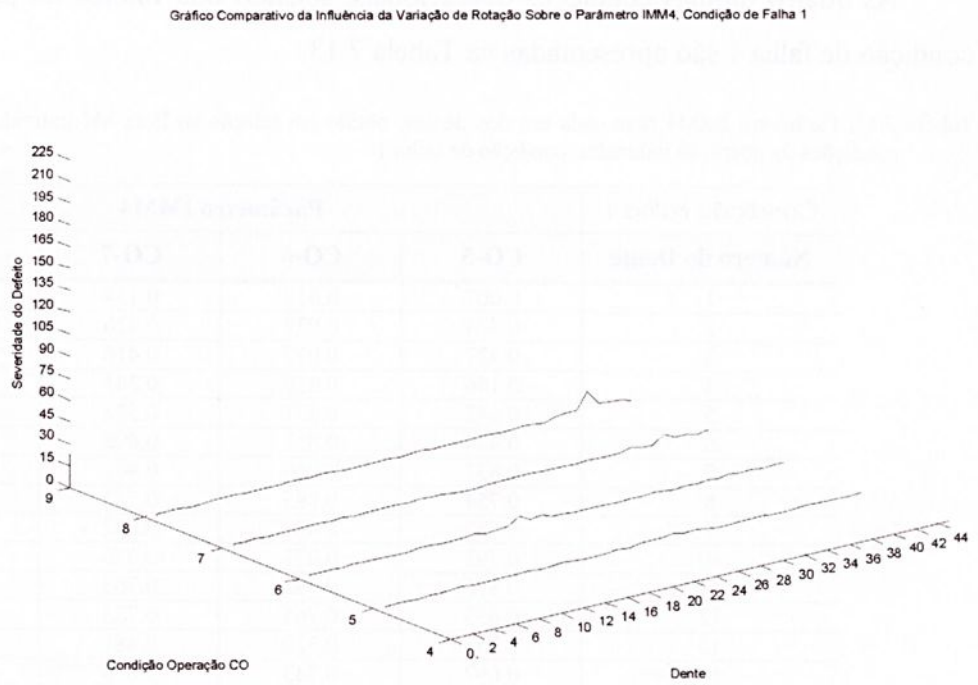


Figura 7.64 - Valores do parâmetro IMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 1.

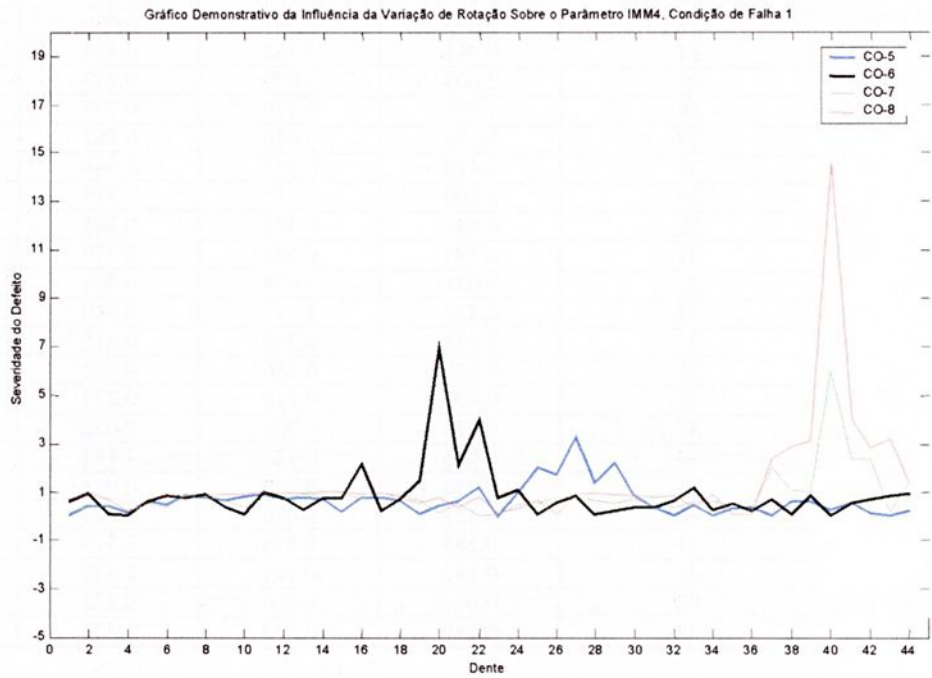


Figura 7.65 - Zoom dos valores do parâmetro IMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 1.

As Tabela 7.12 e Tabela 7.13 assim como as Figura 7.62, Figura 7.63, Figura 7.64 e Figura 7.65 apresentaram os valores numéricos e as formas gráficas relativas ao parâmetro IMM4 para a condição de falha 1.

A seguir, serão apresentados, da mesma maneira, os valores numéricos e gráficos obtidos por intermédio do parâmetro IMM4, para a condição de falha 2.

Tabela 7.14: Parâmetro IMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 individual relativo a cada uma das condições de operação indicadas, condição de falha 2.

Condição Falha 2	Parâmetro IMM4			
Número do Dente	CO-1	CO-2	CO-3	CO-4
1	0.968	0.983	0.980	0.954
2	0.991	0.994	0.995	0.964
3	0.988	0.985	0.985	0.947
4	0.970	0.988	0.975	0.916
5	0.963	0.992	0.948	0.931
6	0.898	0.977	0.923	0.912
7	0.922	0.936	0.958	0.945
8	0.966	0.962	0.972	0.955
9	0.979	0.974	0.980	0.967
10	0.988	0.994	0.996	0.970
11	0.998	0.998	0.999	0.990
12	0.997	0.998	0.996	0.991
13	0.997	0.999	0.997	0.984
14	0.995	0.997	0.997	0.990
15	0.013	0.436	0.573	0.193
16	1.258	10.162	2.326	2.497
17	74.013	76.076	74.178	67.936
18	30.479	11.200	24.033	40.530
19	0.651	0.547	0.486	0.602
20	1.561	0.982	2.338	1.551
21	0.943	0.975	0.959	0.969
22	0.773	0.461	0.761	0.578
23	0.954	0.815	0.904	0.946
24	0.924	0.951	0.927	0.910
25	0.893	0.921	0.817	0.934
26	0.838	0.933	0.823	0.874
27	0.946	0.833	0.948	0.877
28	0.956	0.813	0.957	0.924
29	0.843	0.791	0.884	0.883
30	0.884	0.963	0.859	0.924
31	0.837	0.881	0.833	0.880
32	0.942	0.913	0.930	0.964
33	0.961	0.966	0.974	0.965
34	0.998	0.997	0.999	0.999
35	0.992	0.994	0.993	0.994
36	0.993	0.995	0.993	0.994
37	0.998	0.998	0.993	0.983
38	0.999	0.995	0.995	0.989
39	0.991	0.979	0.985	0.976
40	0.922	0.970	0.969	0.942
41	0.873	0.934	0.945	0.811
42	0.971	0.976	0.973	0.913
43	0.999	0.998	0.999	0.991
44	0.996	0.997	0.998	0.994



Graficamente, as Figura 7.66 e Figura 7.67 apresentam os valores de IMM4 para as condições descritas na Tabela 7.14, a partir da qual observa-se a qualidade do engrenamento individualmente, relativo a cada um dos dentes.

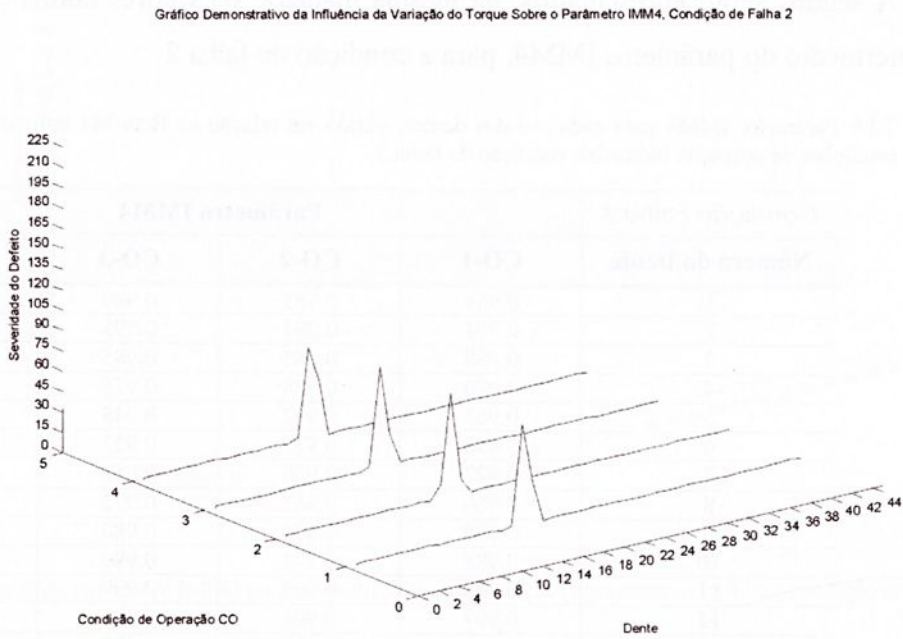


Figura 7.66 - Valores do parâmetro IMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 2.

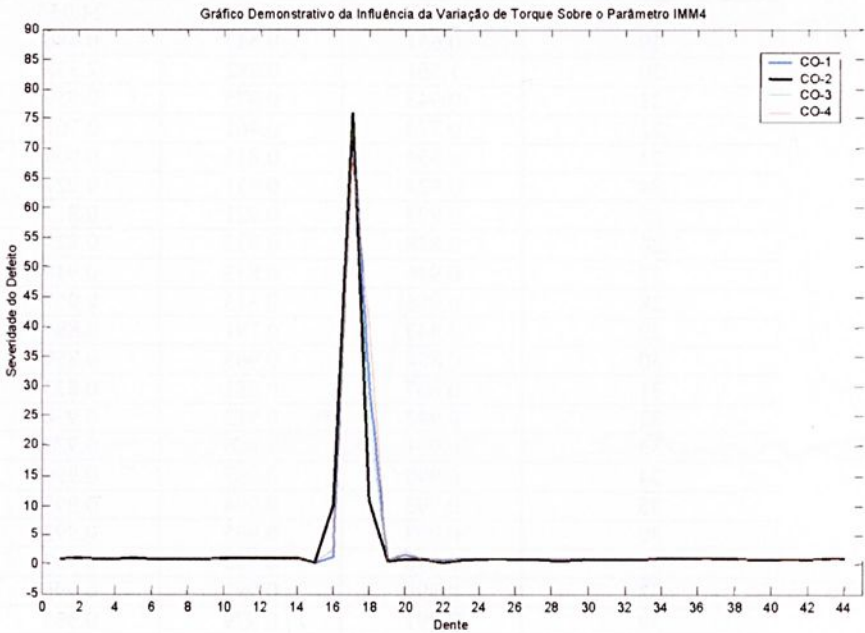


Figura 7.67 - Zoom dos valores do parâmetro IMM4 para as quatro primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 2.

A Tabela 7.15 apresenta os valores relativos ao parâmetro IMM4 para a condição de falha 2 e condições operacionais indicadas, visando verificar a influência da variação unívoca da rotação sobre este parâmetro.

Tabela 7.15: Parâmetro IMM4 para cada um dos dentes, obtido em relação ao Beta M4 individual relativo a cada uma das condições de operação indicadas, condição de falha 2.

Condição Falha 2	Parâmetro IMM4			
Número do Dente	CO-5	CO-6	CO-7	CO-8
1	0.992	0.997	0.994	0.995
2	0.985	0.999	0.998	0.999
3	0.936	0.999	0.995	0.991
4	0.980	0.996	0.993	0.976
5	0.869	0.998	0.997	0.993
6	0.790	0.991	0.992	0.990
7	0.808	0.999	0.994	0.999
8	0.883	0.999	0.987	0.998
9	0.920	0.995	0.996	1.000
10	0.943	0.994	0.993	1.000
11	0.986	1.000	0.999	1.000
12	0.980	1.000	0.999	1.000
13	0.982	0.999	0.999	0.999
14	0.977	0.999	1.000	1.000
15	0.897	0.945	0.975	0.906
16	2.545	0.585	0.096	0.331
17	1.035	7.282	16.394	9.738
18	85.151	58.198	51.974	34.742
19	12.701	9.835	12.709	25.724
20	0.082	0.296	0.569	2.680
21	0.818	0.241	0.859	0.760
22	0.590	0.939	0.592	0.291
23	0.978	0.933	0.903	0.954
24	0.907	0.893	0.849	0.981
25	0.982	0.990	0.951	0.959
26	0.674	0.935	0.984	0.987
27	0.939	0.994	0.969	0.982
28	0.936	0.979	0.985	0.986
29	0.962	0.964	0.992	0.980
30	0.917	0.972	0.975	0.999
31	0.792	0.976	0.989	0.991
32	0.895	0.997	0.990	0.995
33	0.929	0.997	0.982	0.980
34	0.940	0.993	0.995	0.989
35	0.982	0.998	0.991	0.994
36	0.990	0.998	0.996	0.994
37	0.994	0.999	0.994	0.973
38	0.994	0.996	0.998	0.982
39	0.996	1.000	0.989	0.989
40	0.977	0.991	0.960	0.947
41	0.922	0.998	0.976	0.980
42	0.948	0.999	0.990	0.992
43	0.965	0.996	0.997	0.997
44	0.994	0.997	0.992	0.994



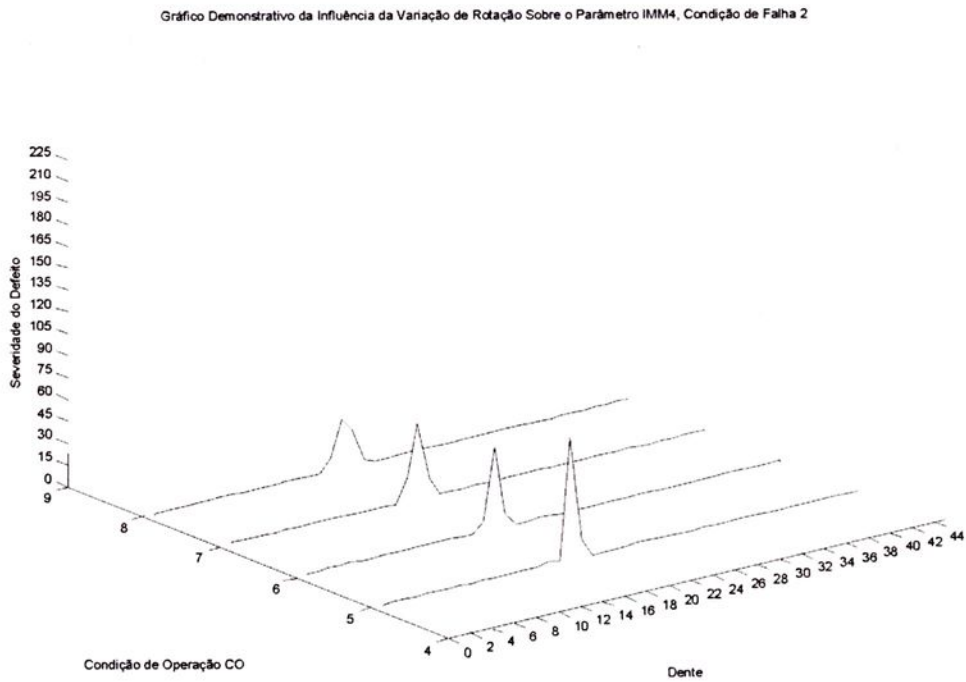


Figura 8.68 - Valores do parâmetro IMM4 para as últimas primeiras condições operacionais (CO) e condição de falha 2.

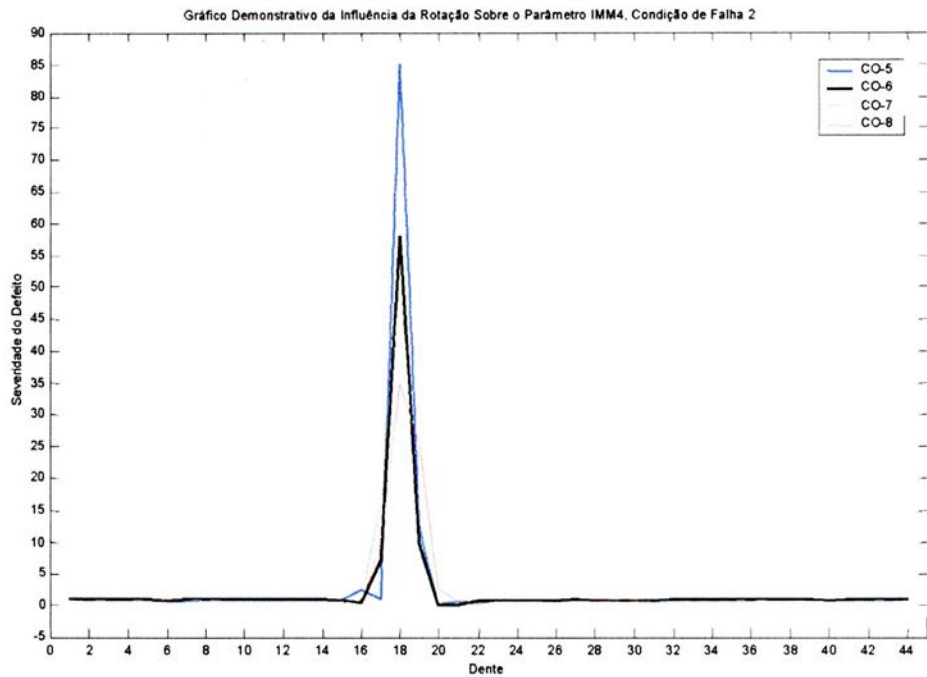


Figura 7.69 - Zoom dos valores do parâmetro IMM4 para as quatro últimas condições operacionais (CO) e condição de falha 2.

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Com o objetivo de superar o problema da avaliação da severidade no diagnóstico e monitoramento de falhas em redutores de velocidade submetidos à variação de demanda de potência, inicialmente foi investigado comparativamente o comportamento das técnicas usuais utilizando-se sinais simulados. Foram analisadas treze técnicas usuais de monitoramento. Três no domínio do tempo: TSA, sinal residual e demodulação; cinco no domínio da amplitude: variância, RMS, skewness, kurtosis, fator de crista; uma no domínio da frequência: espectro em amplitude e quatro no domínio tempo-frequência: STFT, wavelet, Wigner-Ville e Pseudo Wigner-Ville, todas elas apresentaram-se susceptíveis à variação de potência.

Para subsidiar o estudo comparativo um simulador foi especialmente desenvolvido e implementado, no qual o sinal da resposta vibratória esperada de um par engrenado para cada uma das possíveis excitações decorrentes de seu funcionamento normal, e alguns defeitos mais frequentes, é simulada por equações matemáticas específicas. O sinal global resultante é obtido por superposição das diversas respostas individuais correspondentes às fontes de excitação, que se queiram considerar presentes, para cada caso em estudo.

Este simulador possui dois pontos positivos: primeiro, a capacidade de simular independentemente cada uma das fontes de ruído, assim como todas as suas possíveis

combinações, ou seja, é possível se gerar sinais desde um redutor perfeito até aquele que tivesse todos os defeitos descritos no capítulo 2. Segundo, por ser construído de forma modular possibilita uma boa flexibilidade e robustez, além de suportar novos módulos e variações que sejam necessárias no futuro. Um ponto negativo deste simulador é a impossibilidade dos parâmetros de entrada serem diretamente grandezas tais como força, torque ou potência. Este fato é decorrente do próprio equacionamento matemático, pois este se refere exclusivamente à resposta e, portanto, variações de força, torque ou potência necessitam serem introduzidas como variações em amplitude e frequência na resposta.

Na segunda etapa do trabalho foi proposto um procedimento baseado nas técnicas de análise estatística que aplicado sobre os sinais simulados superou satisfatoriamente o problema da avaliação da severidade na detecção e monitoramento de falhas em redutores sujeitos a demanda variável de potência. Finalmente o desempenho deste procedimento foi investigado, utilizando sinais vibratórios reais provenientes de uma bancada experimental.

A bancada experimental mostrou-se robusta, confiável e flexível em relação às condições operacionais. No entanto deve-se considerar dois problemas relevantes enfrentados durante os testes: a repetibilidade no controle de carga no sistema e a garantia da eliminação de ruídos interferentes no sinal vibratório adquirido.

Devido aos erros de leitura do manômetro controlador do sistema de alta pressão houve uma variação de até 9% no valor do torque entre uma corrida de medição e outra durante a aquisição dos sinais da classe 2, que deveriam ter torque constante.

Como se utilizou um inversor de frequência para controlar a rotação do redutor, não se considerou inicialmente que este emite uma forte interferência eletromagnética, a ponto de distorcer os sinais de vibração provenientes do redutor. Este fato paralisou temporariamente o trabalho de aquisição. A conclusão sobre quem era o responsável por tais interferências, ou problemas na aquisição, ou problemas do condicionador, ou problemas na transformação A/D ou problemas no software só foi obtida após uma exaustiva e demorada substituição de equipamentos e incontáveis testes, que resultaram na identificação do verdadeiro culpado, o inversor. Por ser um problema de interferência elétrica/eletromagnética, foi necessário a colaboração do Departamento de Engenharia Elétrica da FEIS/Unesp, por intermédio do Prof. Dr Rossi e de alguns alunos da pós graduação, que felizmente, após várias tentativas, conseguiram



eliminar tais interferências para que os sinais vibratório reais pudessem ser obtidos com segurança e livres delas.

Com a obtenção dos sinais vibratórios reais, foi estudado a influência do torque e rotação sobre o comportamento dinâmico do redutor. Para isso, foram utilizados os valores RMS, escolhido para caracterizar o valor de amplitude ao longo de todo o sinal e o fator de crista, que fornece a razão entre o valor de pico máximo e o RMS, responsável pela indicação da presença de transientes no sinal. Foram analisadas as oito condições de operação, sujeitas a condição de defeito 1, as quais foram apresentadas a seguir, juntamente com seus respectivos valores RMS e do fator de crista. Os valores numéricos dos parâmetros RMS e FC obtidos foram agrupados conforme demonstra a Tabela 7.5.

Observando estes dados para a condição de falha 1, notou-se que quando o redutor sofreu variações unívocas de torque, permanecendo a rotação constante, o parâmetro RMS oscilou no máximo 8% para uma variação de até 87% do torque. No caso da variação unívoca da rotação, permanecendo o torque constante, a oscilação do parâmetro RMS foi bem maior, chegando a 77% para uma variação de até 73% de rotação.

Para a condição de falha 2, notou-se que a variação unívoca de torque influenciou sensivelmente o aspecto do defeito, sendo tal variação representada por uma discreta alteração no valor da amplitude máxima na região do defeito, entre 120 e 160 graus de rotação do pinhão. O mesmo comportamento não ocorre para a condição de variação unívoca de rotação, sendo que para esta condição ocorreu fortes modificações na característica do defeito, chegando a ter picos de amplitude de até 3 mm/s ou 36% maior.

DISCUSSÕES SOBRE A METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA A DETECÇÃO DE FALHAS EM REDUTORES SUBMETIDOS À VARIAÇÃO DE POTÊNCIA

Discussões sobre o pré-processamento do sinal vibratório

Quando se tem como objetivo identificar a presença de anomalias em um determinado elemento mecânico do redutor, ainda mais sob condições tão desfavoráveis devido à variação de potência, é razoável que se busque extrair do sinal vibratório total aquela componente que realmente possui informações sob as condições do elemento em estudo, nesta pesquisa, a engrenagem. É exatamente neste aspecto que o pré-processamento do sinal mostra-se importante.



A escolha de iniciar-se o pré-processamento do sinal utilizando a média temporal síncrona foi correta, pois possibilitou a eliminação das componentes não síncronas ao eixo do pinhão. Mas somente o uso da TSA não foi suficiente, pois ainda havia componentes síncronas com o eixo que não eram oriundas do pinhão, principalmente na faixa até 300 Hz. Assim o uso de um filtro passa-alto tornou-se necessário, pois possibilitou que estas componentes de baixa frequência tais como giro do eixo fossem eliminadas, resultando em um sinal bem mais simples e mais expressivo das condições do pinhão. O processo de pré-processamento termina com a extração, com base no sinal total, do sinal referente a um único giro do pinhão, o qual foi facilmente obtido, com base o sinal proveniente do *trigger*.

Na fase de normalização do sinal, a etapa mais importante é a divisão do sinal pelo seu valor RMS, cujo intuito é a eliminação da influência da variação de potência sobre o sinal vibratório. Conforme demonstrado no capítulo 6, para o caso em que a variação de potência influenciaria de forma linear a resposta do redutor, este procedimento elimina o fator amplificador/atenuador de sinal. Mas pelos resultados reais obtidos pode-se observar que a resposta do redutor não se comporta linearmente com a variação de potência.

Discussões sobre os parâmetros M4GLOBAL, HMM4 E IMM4

A realização de ensaios dinâmicos é sempre muito trabalhosa e delicada. Sabendo das dificuldades e tempo demandados para a realização de todos os ensaios necessários a esta investigação, muitas discussões foram realizadas para a sua definição. Nesta fase de planejamento, as principais perguntas estiveram relacionadas com as condições operacionais a serem analisadas: Devemos realizar variações de torque e rotação máximos, limitados pelas características da bancada?; Ou devemos fixar um ponto operacional e realizar pequenas e incrementais variações em torno deste ponto?

Qualquer que fosse a decisão tomada, posteriormente a realização dos ensaios e conclusão desta pesquisa ainda existiriam perguntas, como por exemplo: Qual é o limite da variação de potência, em torno da potência nominal que poderia ocorrer sem que o comportamento da metodologia empregada seja afetado?

Assim optou-se em realizar as máximas variações possíveis acima de uma determinada faixa de operação nominal, representada por uma rotação de entrada de 917 rpm e 1.32 N.m



(condição de operação - CO2). Essa decisão foi tomada com o objetivo de atingir ou verificar quais as limitações do procedimento dotado, mesmo sabendo que na indústria as variações da potência de um redutor raramente chegam em 25%.

O parâmetro M4GLOBAL, para a condição de variação unívoca de torque e condição de falha 1, na qual o torque variou em até 87% em relação ao seu valor nominal (condição CO2), este parâmetro obteve uma variação máxima de 11%, mínima de 2.5% e média de 7.8%. Um detalhe surpreendente que mostra a complexidade dinâmica do sistema em estudo ocorre justamente para a maior variação no torque, que resultou na menor variação deste parâmetro. Ainda para a condição de variação unívoca de torque, mas para a condição de falha 2, este parâmetro obteve uma variação máxima de 9%, mínima de 2% e média de 4.4%. Estas variações são satisfatórias, levando-se em conta a complexidade de todo o processo envolvido e a quantidade de erros presentes, deste a aquisição do sinal até os resultados finais. Nestas condições de rotação constante e torque variável, este parâmetro indicou claramente a presença do dente quebrado, defeito este que modificou seu valor fortemente, em média 163%.

O parâmetro M4GLOBAL, para a condição de variação unívoca de rotação e condição de falha 2, na qual a rotação variou em até 73% em relação ao seu valor nominal (condição CO2), este parâmetro obteve uma variação máxima de 19%, mínima de 3% e média de 12%. Estas variações quando comparada à condição de variação unívoca do torque, demonstram que este parâmetro é mais sensível à variação de rotação do que de torque. Ainda para a condição de variação unívoca de rotação, mas para a condição de falha 2, este parâmetro obteve uma variação máxima de 39%, mínima de 13% e média de 20%. Estas variações, para a condição de falha 2, demonstram que este parâmetro tem limitações em relação à porcentagem de variação de rotação em torno da condição nominal. Nestas condições de rotação variável e torque constante, este parâmetro indicou claramente a presença do dente quebrado, defeito este que modificou seu valor fortemente, em média 173%.

O parâmetro HMM4, para a condição de variação unívoca de torque e condição de falha 1, na qual o torque variou em até 87% em relação ao seu valor nominal (condição CO2), apresenta pequenos valores para todos os dentes, indicando assim uma boa qualidade do engrenamento. Para a condição de variação unívoca de rotação e condição de falha 1, este parâmetro também apresenta pequenos valores para todos os dentes, mas pode-se observar que esta condição de falha o influencia mais, havendo pequenos aumentos no valor deste parâmetro, principalmente para as maiores rotações.

O parâmetro HMM4, para a condição de variação unívoca de torque e condição de falha 2, na qual o torque variou em até 87% em relação ao seu valor nominal (condição CO2), apresentou grandes valores para os dentes 16, 17, 18, cujo valor máximo refere-se ao dente 17, exatamente o dente que foi introduzida a falha, o que demonstra a capacidade da técnica na identificação precisa do dente com falha. Outra importante característica é a intensidade da indicação, enquanto para os demais dentes do redutor indicam valores de HMM4 em torno de 1, para o dente 17 este valor saltou para em média 186, uma diferença de 18500%, o que indica a severidade do defeito. A variação do torque fez com que o valor de HMM4 para o dente 17 tivesse uma variação máxima de 18%, mínima de 4.6% e média de 9%, o que indica que este parâmetro tem limitações em relação à faixa de variação de torque, mas apresentou variações extremamente satisfatórias para variações de torque de até 31%.

O parâmetro HMM4, para a condição de variação unívoca de rotação e condição de falha 2, na qual a rotação variou em até 73% em relação ao seu valor nominal (condição CO2), apresentou grandes valores para os dentes 18 e 19, cujo valor máximo refere-se ao dente 18. Nesta condição este parâmetro não foi exatamente preciso na posição do dente, que deveria ter sido inçado o dente número dezessete e não o dezoito. Esta imprecisão deve-se provavelmente à rápida transferência de força entre os dentes e também pelo fato do pinhão ser uma engrenagem helicoidal, na qual existe sempre mais de um dente em engrenamento. Este parâmetro teve uma variação máxima de 94%, mínima de 4% e média de 32%, o que indica que este parâmetro tem limitações no que se refere a faixa de variação de rotação, mas apresentou pequenas variações entre 4 e 7% para até 45% de variação de rotação acima da nominal, o que é muito satisfatório.

O parâmetro IMM4, para a condição de variação unívoca de torque e condição de falha 1, na qual o torque variou em até 87% em relação ao seu valor nominal (condição CO2), apresenta pequenos valores para todos os dentes, indicando assim uma boa qualidade do engrenamento. Para a condição de variação unívoca de rotação e condição de falha 1, este parâmetro também apresenta pequenos valores para todos os dentes.

O parâmetro IMM4, para a condição de variação unívoca de torque e condição de falha 2, na qual o torque variou em até 87% em relação ao seu valor nominal (condição CO2), apresentou grandes valores para os dentes 17 e 18, cujo valor máximo refere-se ao dente 17, exatamente o dente que foi introduzida a falha, o que demonstra a capacidade da técnica na identificação precisa do dente com falha. Outra importante característica é a intensidade da indicação, enquanto para os demais dentes do redutor indicam valores de IMM4 em torno de 1, para o dente



17 este valor saltou para em média 74, uma diferença de 7300%, o que indica a severidade do defeito, mas o IMM4 é bem menos sensível do que o HMM4. A variação do torque fez com que o valor de HMM4 para o dente 17 tivesse uma variação máxima de 10%, mínima de 2% e média de 4.8%, variações estas menores do que as apresentadas pelo HMM4.

O parâmetro IMM4, para a condição de variação unívoca de rotação e condição de falha 2, na qual a rotação variou em até 73% em relação ao seu valor nominal (condição CO2), apresentou grandes valores para os dentes 18 e 19, cujo valor máximo refere-se ao dente 18. Nesta condição este parâmetro também não foi exatamente preciso na posição do dente, que deveria ter sido indicado o dente numero dezessete e não o dezoito. Esta imprecisão deve-se provavelmente ao mesmo motivo descrito ao HMM4. Este parâmetro teve uma variação máxima de 55%, mínima de 12% e média de 30%, o que indica que este parâmetro tem limitações no que se refere a faixa de variação de rotação, mas apresentou variações aceitáveis para até 45% de variação de rotação acima da nominal, piores que as apresentadas pelo HMM4.

CONCLUSÕES FINAIS

Do exposto e discutido chegou-se as seguintes conclusões finais:

- A utilização de um simulador digital de sinais foi de extrema importância no desenvolvimento deste trabalho, pois possibilitou que se tivesse total controle sobre os sinais, pois eram conhecidas a priori todas as propriedades do sinal, tais como, amplitude, frequência, modulação, variações pontuais. Outra facilidade proveniente de um simulador é o tempo gasto para gerar os sinais, que é extremamente pequeno, quando comparado a uma aquisição real.
- Conforme mencionado no capítulo 1 e confirmado no desenvolvimento desta pesquisa, não existe uma técnica aplicável às diversas classes de defeitos e que forneça sempre bons resultados. Cada técnica tem suas características próprias, as quais podem fornecer melhores ou piores resultados dependendo do tipo de defeito e condição que se está interessado em analisar.
- A bancada experimental utilizada mostrou-se de extrema importância, pois foi possível realizar os ensaios reais necessários na validação dos procedimentos propostos. As maiores dificuldades enfrentadas estavam relacionadas com a parte de controle, tanto de rotação como de torque. A parte de controle do torque apesar de satisfatória, não possibilitou que se controlasse o torque com a precisão desejada.
- O pré-processamento do sinal vibratório de um redutor de velocidade mostrou ser um item de extrema importância. A maioria dos pesquisadores utiliza no mínimo a média temporal



síncrona como técnica de pré-processamento, pois realmente os sinais vibratórios provenientes deste equipamento são muito complexos e difíceis de se analisar.

- As condições operacionais, torque e rotação, modificam consideravelmente o comportamento dinâmico de um redutor de velocidade e mais, estas modificações não se comportam linearmente. A variação da rotação mostrou-se afetar mais a dinâmica de um redutor do que a variação em torque.
- O parâmetro M4GLOBAL demonstrou ser capaz de suportar satisfatoriamente as variações de torque e rotação dentro de uma ampla faixa, mas possui limitações, apesar destas estarem muito além dos limites reais encontrados na indústria.
- O parâmetro HMM4 apresentou um ótimo desempenho quanto a variação da severidade do defeito, devido à variações de torque de até 31%, indicando de forma inconfundível a presença, localização e severidade do defeito. Para variações unívocas de rotação, esta técnica também apresentou um ótimo desempenho, mas é mais susceptível à variações de rotação maiores que 45% acima da nominal.
- O parâmetro IMM4 apresentou também ótimos resultados quanto a variação da severidade do defeito, devido a variações unívocas de torque, é bem menos sensível a intensidade do defeito do que o HMM4 e menos influenciado pelo torque. Para variações unívocas de rotação apresentou um desempenho satisfatório, mas quando comparado com o HMM4 esse apresentou um desempenho menor, o seja é mais afetado pela variação de rotação.
- Uma importante característica dos fatores M4GLOBAL, HMM4 e IMM4 é a facilidade de análise, e mais, podem ser perfeitamente utilizados na detecção automática de falhas, pois o M4GLOBAL descreve a qualidade do engrenamento em apenas um número, o HMM4 e o IMM4 descrevem a qualidade de cada um dos dentes também por intermédio de um único número e desta forma pode-se utilizados no treinamento e análise de danos via redes neurais ou outro método similar.



Capítulo 9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, F. A., ESAT, I. I., BADI, M. N. M. Gearbox fault detection using statistical methods, time-frequency methods and harmonic wavelet: a comparative study. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTIC ENGINEERING MANAGEMENT, 12, 1999, Sunderland, UK. **Proceeding Comaden'99**. Oxford: Coxmoor Publishing Company, 1999. p.77-85.

BAHER, H. **Analog & digital signal processing**. West Sussex: J. Wiley & Sons, 1994. 473p.

BARNES, J. W., **Statistical analysis for engineers and scientists: a computer-based approach**. Singapore: McGraw-Hill, 1994. 396p.

BLANKENSHIP, G. W., SINGH, R. A new gear mesh interface dynamic model to predict multidimensional force coupling and excitation. **Mechanic Machine Theory**, v. 30, p. 43-57, 1995.

BLANKENSHIP, G. W., SINGH, R. **Mechanical Machine Theory**, v.30, p.43-57, 1995

BLANKENSHIP, G. W., SINGH, R. PROCEEDING OF THE ASME DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCE, 17, 1999. ASME Conference of Power Transmission and Gear Configuration. S.l: ASME, 1992. p.137-146.

- BOUALEM, B., **Time-Frequency signal analysis: methods and application**. Melbourne: Wiley Halsted Press, 1992. 546p.
- BRAUN, S. **Mechanical signature analysis: theory and applications**. London: Academic Press, 1986. 384p.
- CHOY, F. K. et al. Analysis of the effects of surface pitting and wear on the vibration of a gear transmission system. **Tribology International**, v.29,n.1, p.77-83, 1996.
- COHEN, L. **Time frequency analysis**. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 300p.
- FORRESTER, D. Time-Frequency analysis in machine fault detection. In: BOUALEM, B., **Time-Frequency signal analysis: methods and application**. Melbourne: Wiley Halsted Press, 1992a. V.1, cap.18, p.03-42.
- HENG, R. B. W., NOR, M. J. M. Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition. **Applied Acoustic**, v.53, n.1-3, p.211-26, 1998.
- JOHNSON, N.L., KOLTE, S., **Continuous univariate distributions**. Wiley & Sons, 1970. 306p.
- KIM, Y. Y., KIM, E. H. **A new damage detection method based on wavelet transform**. Seoul: Seoul National University, s.d. (mimeogr)
- LARSON, H. J., **Introduction to probability theory and statistical interference**. Wiley & Sons, 1968. 387p.
- LARSON, H. J., **Introduction to probability**. Addison-Wesley, 1995. 371p.
- LEE, S. H., KIM, J., KIM, H. J. **Time frequency representations of signals: STFT, Wigner-Ville & Wavelet transformation**. Cincinnati: University of Cincinnati, s.d, (mimeogr).
- LEE, S. K. , WHITE, P. R. Fault identification for rotating machinery using adaptive signal processing and time-frequency analysis. In: ASME DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCE, 17, 1997, Sacramento. **Proceedings of DETS'97**. Sacramento: ASME, 1997. p.1-12.



- LYNN, P. A., FUERST, W. **Digital signal processing : with computer applications**. West Sussex: J.Wiley & Sons, 1996. 400p.
- MAMED, W.F., TEODORO, E.B. **Análise de falhas em redutores utilizando transformada wavelet**. Uberlândia: UFU, 1997. 8p. (mimeogr)
- MARK, W.D. Elements of gear noise prediction. In: BERANEK, L. L., VER, I. L. **Noise and vibration control engineering: principles and applications**. New York: J. Wiley, 1992. P. 735-70.
- MARTIN, H.R. Detection of gear damage by statistical vibration analysis, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS, 1992, s.l. **Proceeding of the...** s.l: Imech, 1992. p.395-401.
- McCONNELL, K. G., **Vibration testing: theory and practice**. New York: Wiley & Sons, 1995. 606p.
- MCFADDEN, P. D., WANG, W. J. Analysis of gear vibration signatures by the weighted Wigner-Ville distribution. PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS, 1992, s.l. **Proceeding of the...** s.l: Imech, 1992. p.387-93.
- MCFADDEN, P.D. Detection of gear faults by decomposition of matched difference of vibration signals, **Mechanical Systems and Signal Processing I**, p.805-17, 2000.
- MCFADDEN, P.D. A revised model for the extraction of periodic waveform by time domain averaging, **Mechanical Systems and Signal Processing I**, p.83-95, 1987a.
- MCFADDEN, P.D. Analysis of the vibration of the input bevel pinion in RAN Wessex helicopter main rotor gearbox, **ARL Aero Propulsion Report**, 169, september, 1985.
- MCFADDEN, P.D. **Condition monitoring of rolling element bearing by vibration analysis**. PROCEEDINGS OF INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS, 1990, s.l. **Proceeding of the...** s.l: Imech, 1990. p.49-53.
- MCFADDEN, P.D. Examination of a technique for the early detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of meshing vibration, **Mechanical Systems and Signal Processing I**, p.173-83, 1987b.



- NAJAR, A. M., HASHEMI, J. **Continuous wavelet transform analysis of acoustic emission signals**. Lubbock: Texas Tech University, s.d. (mimeogr)
- NEWLAND, D. E. Practical signal analysis: do wavelet make any difference?. In: DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCE, 1997, Sacramento. **Proceedings of DETC'97**. Sacramento: ASME, 1997 p.01-12.
- NEWLAND, D. E. Wavelet analysis of vibration, part I: theory. **Journal of Vibration and Acoustic**, v.16, 1994. p.409-24.
- NEWLAND, D. E., BUTLER, G. D. Time-varying-cross spectra by harmonic wavelets for soil motion with damage. In: PROCEEDING OF THE ASME DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCE, 17, 1999. **ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise**. Las Vegas: ASME, 1999. p.1-7.
- NEWLAND, D.E. **An introduction to random vibrations, spectral and wavelet Analysis**. 3.ed. New York: Longman Scientific & Technical, Harlow, 1993, 476p.
- OPPEINHEIM, A. V., SCHAFER, R. W., BUCK, J. R. **Discrete-time signal processing**. 2.ed. Upper Saddle River, 1999. 870p.
- PARKER, R. G., VIJAYAMAR, S.M., IMAJO, T. Non-linear dynamic response of spur gear pair: modeling and experimental comparisons. *Journal of Sound and Vibration*, v. 237. p. 435-55, 2000.
- PENTER, A.L., LEWIS, D.C. Build quality inspection of repaired and new gearboxes. In: PROCEEDINGS OF INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS, 1990. **First International Conference of Gear Noise and Vibration**, s.l: IMech, 1990, p.153-58.
- RANDALL, R. B., A new method of modelling gear faults, **ASME Journal of Mechanical Design**, v.104, p.259-62, 1982.
- RIOUL, O., VETTERLI, M. Wavelets and signal processing. In: ACKENHUSEN, J. G. (ed.) **Signal processing technology and applications**. New York: IEEE, 1995. p.85-109.

SAFIZADEH, M. S., LAKIS, A. A., THOMAS, M. Using short time Fourier transform in machinery diagnosis. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTIC ENGINEERING MANAGEMENT, 12, 1999, Sunderland, UK. **Proceeding Comaden'99**. Oxford: Coxmoor Publishing Company, 1999. p.126-30.

SEGAWA, R. et al. Wavelet analysis of strong response records of building: with bilinear restoring force. In: ASME DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCES, 1999, Las Vegas. **Proceedings of the ...** Las Vegas:ASME, 1999. p.1-6.

SHAN, J., BAUER, B., SEELIGER, A. The joint time-frequency analysis and its application for vibration diagnosis of machines. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTIC ENGINEERING MANAGEMENT, 12, 1999, Sunderland, UK. **Proceeding Comaden'99**. Coxmoor Publishing Company, 1999. p.271-79.

SKF. Condition Monitoring. **Why synchronous time averaging?**. San Diego: SKF, 1996 (Application note CM3016).

STASZEWSKI, W. J., RUOTOLO, R., STORER, D.M. **Fault detection in ball-bearing using wavelet variance**. Sheffield: University of Sheffield, s.d. (mimeogr)

STEWART, R. M. **Some useful data analysis techniques for gearbox diagnostics**, Institute of Sounds and Vibration, MHR/R/10/77, 1977.

TANDON, N., NAKHA, B.C. Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling elements bearings. Hauz Khas: Indian Institute of Technology, s.d. (mimeogr)

THEODOSSIADIS, S., & NATSIKAVAS, S. Non-linear dynamics of gear pair system with periodic stiffness and backlash. **Journal of Sound and Vibration**, v. 229, p. 287-310, 1999.

THRANE, N. et al. **Practical use of the Hilbert transform**. Naerum: Bruel & Kjaer, s.d. (Application Note)

WANG, W. J., MCFADDEN, P. D. Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection. **Journal of Sound and Vibration**, v.192, n.5, p.927-39,1996.

WEG, Manual de Motores Elétricos, 7. ed. (catálogo)

WHITE, G., Amplitude demodulation - a new tool for predictive maintenance, Sound and Vibration, september, p.14-18, 1991.



FOTOS DA BANCADA EXPERIMENTAL

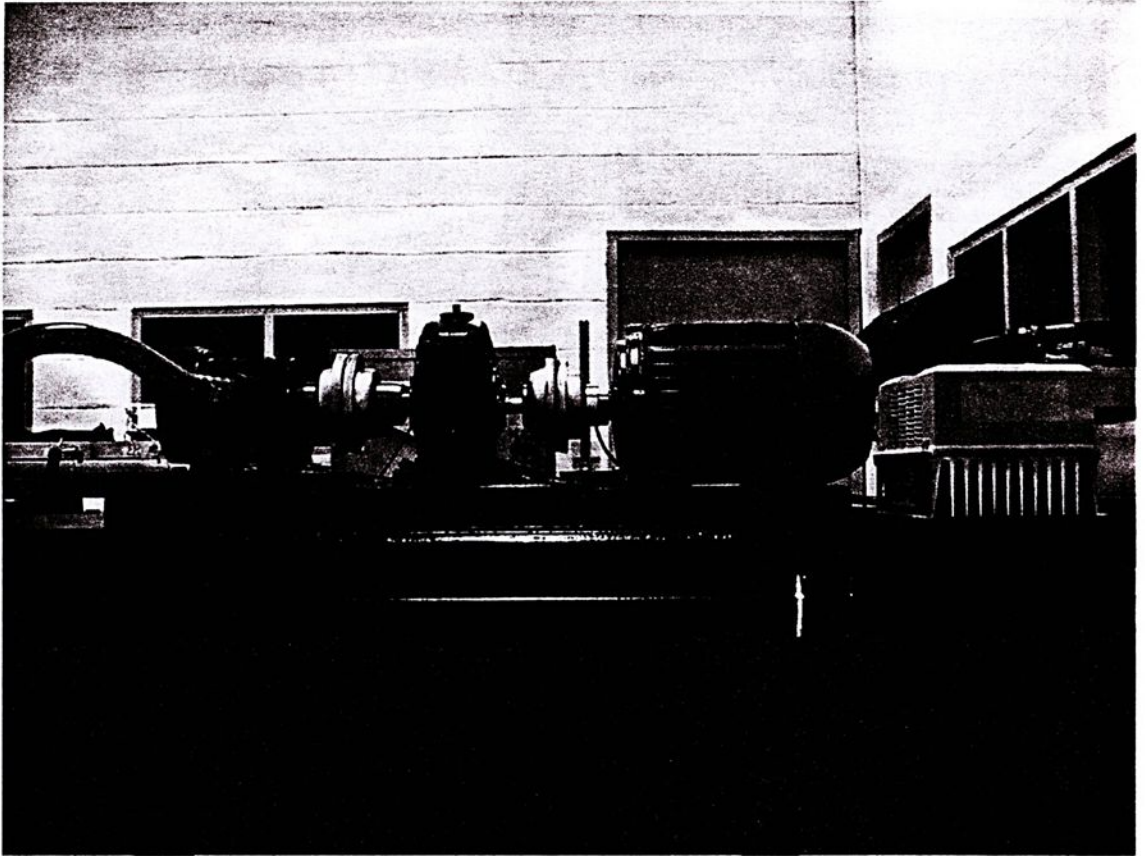


Figura A1.1: Vista lateral da bancada experimental

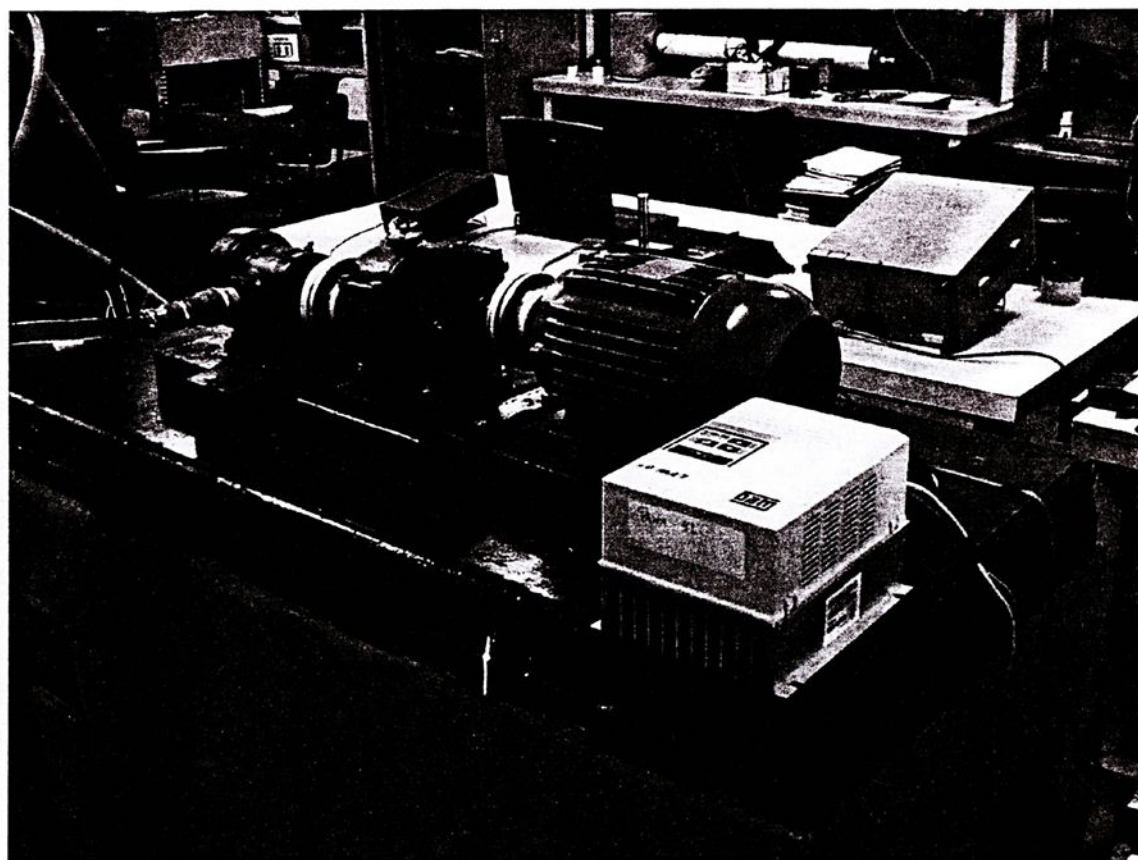


Figura A1.2: Vista lateral da bancada experimental, a partir da qual pode-se observar os módulos que a compõem e ao fundo o amplificador/condicionador de sinais, microcomputador e o sistema A/D utilizados na aquisição.

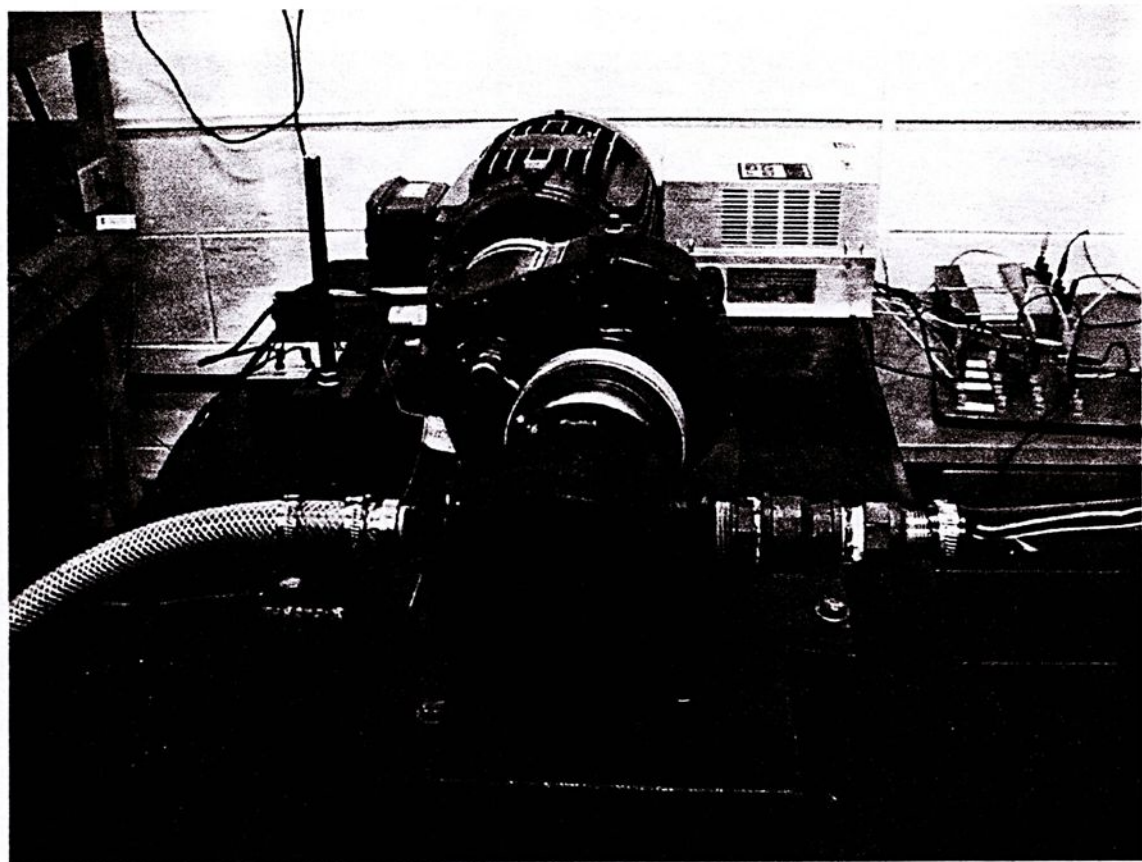


Figura A1.3: Vista frontal da bancada experimental, a partir da qual pode-se observar o posicionamento dos acelerômetros.

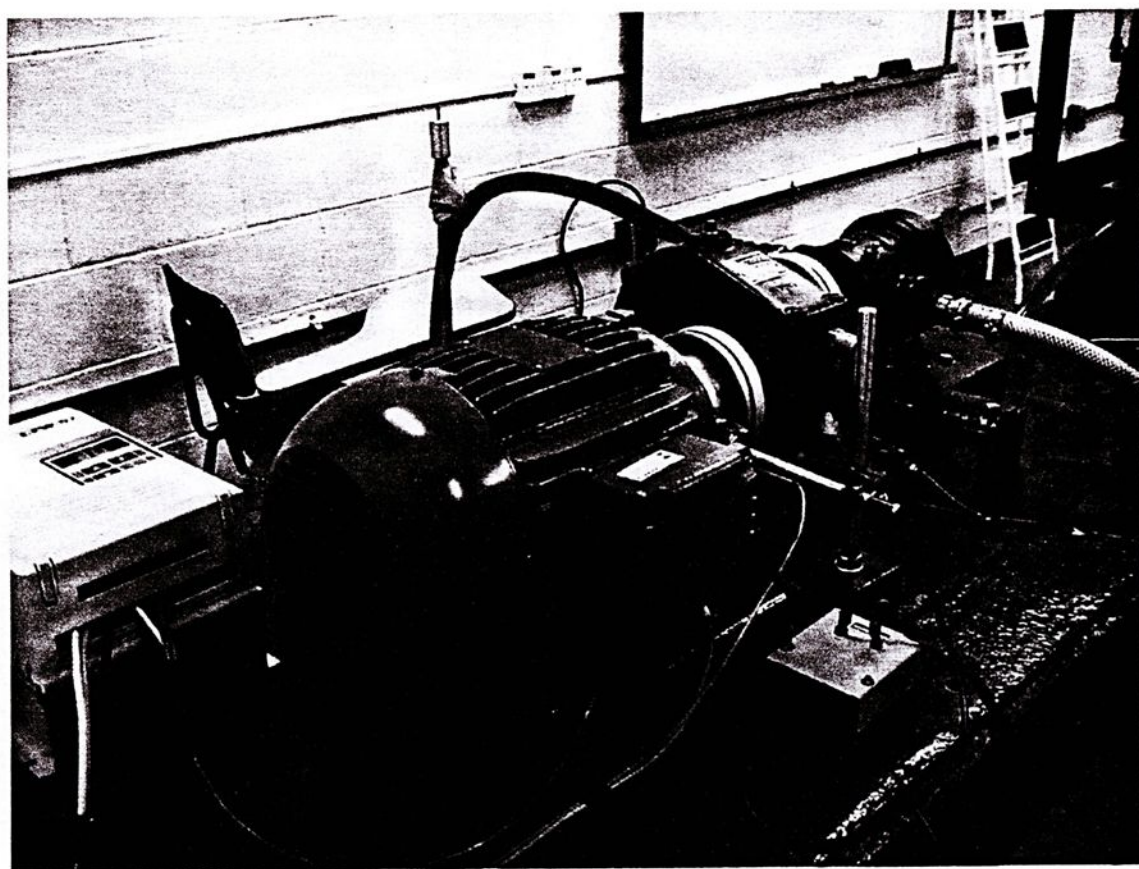


Figura A1.4: Vista traseira da bancada experimental, a partir da qual pode-se observar os itens que a compõem.

Apêndice 2

FOTOS DO REDUTOR EM ESTUDO

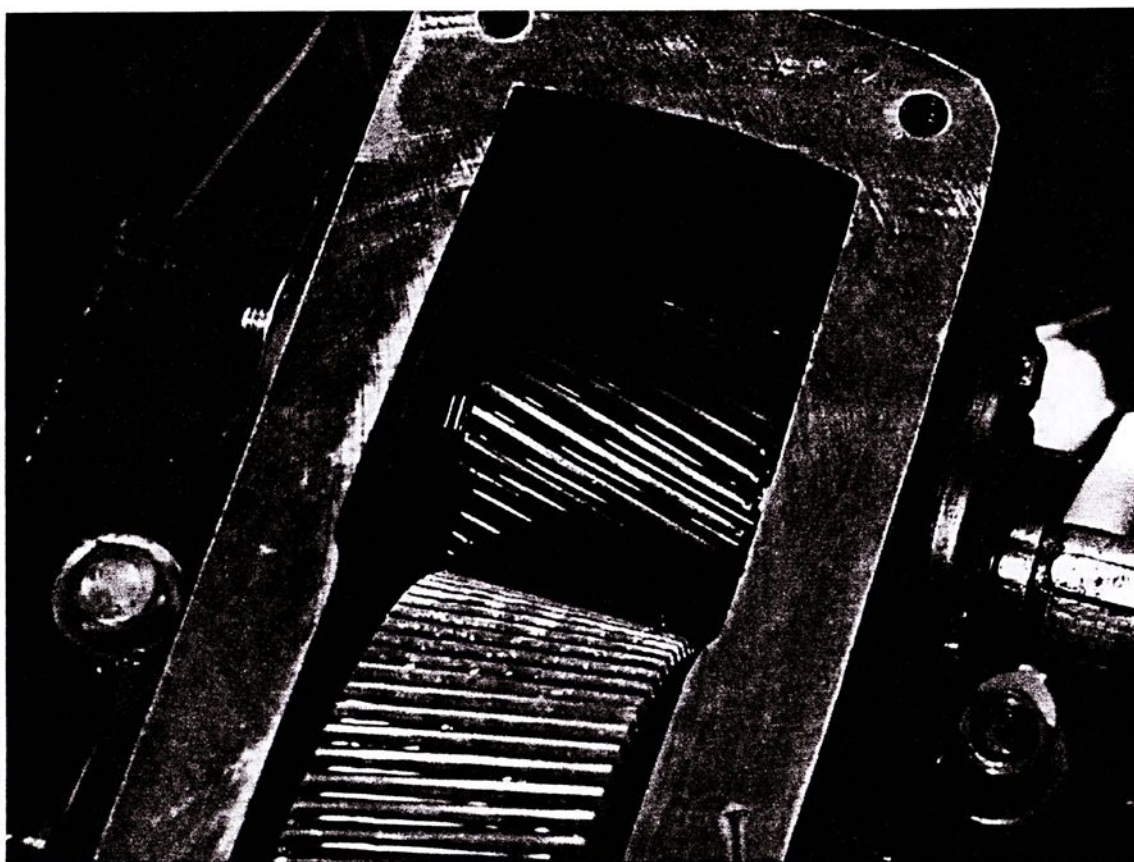


Figura A2.1: Vista interna do redutor em estudo em perfeito estado, a partir da qual pode-se observar os dentes intactos.

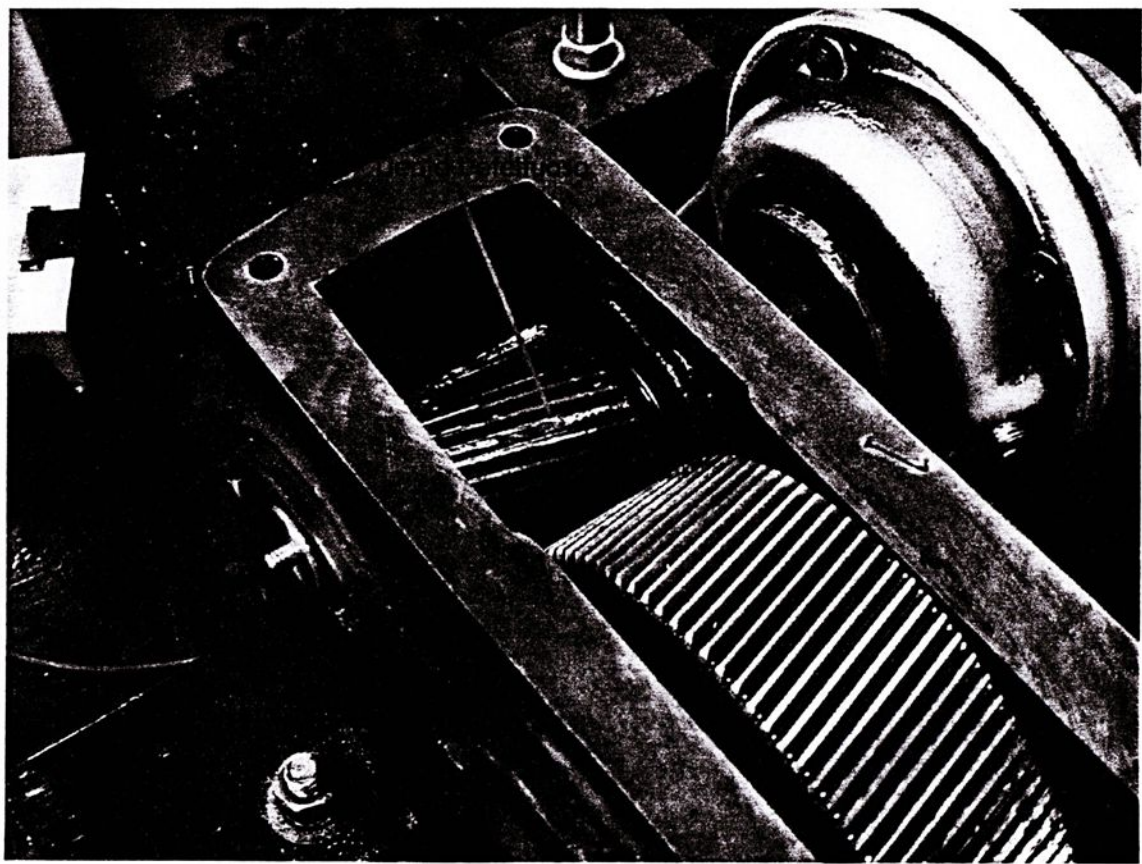


Figura A2.2: Vista interna do redutor em estudo, a partir da qual pode-se observar o dente com falha (quebrado).

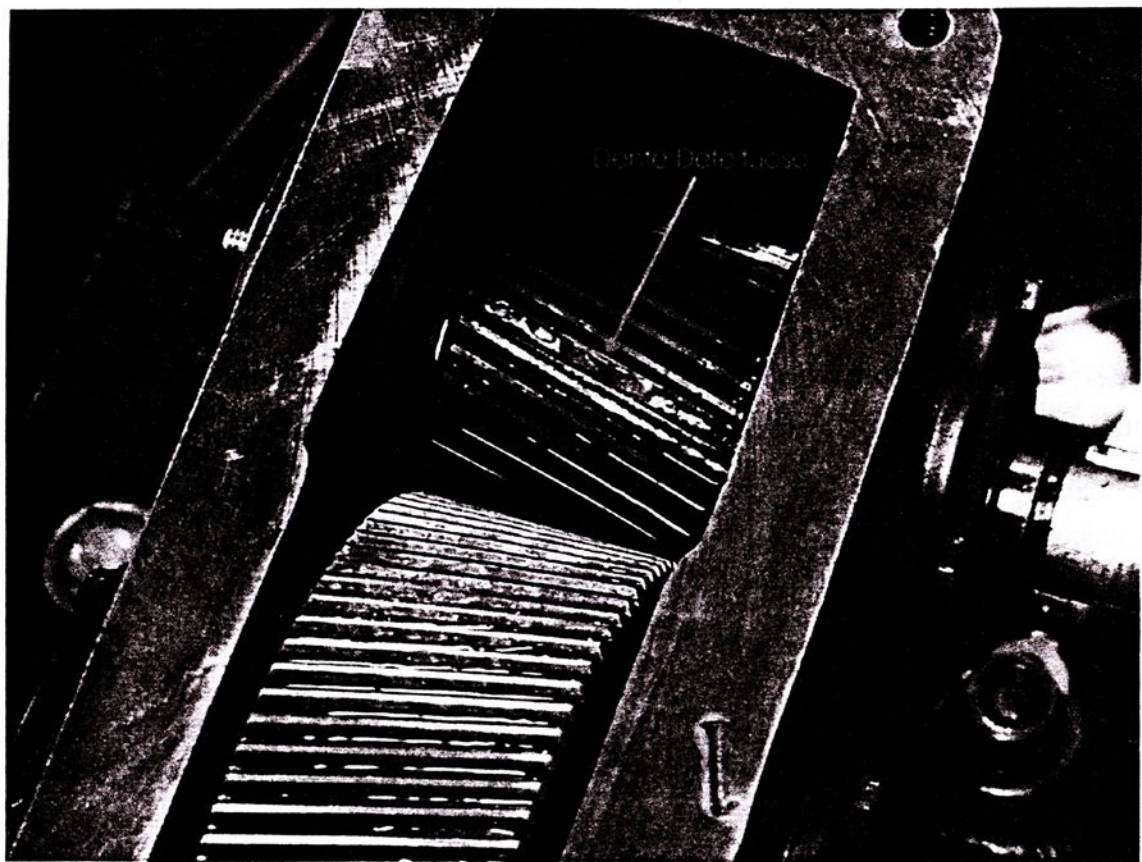


Figura A2.3: Vista interna do redutor em estudo, a partir da qual pode-se observar o dente com falha (quebrado).

Apêndice 3

ROTINAS UTILIZADAS NO PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS

Para a realização do pré-processamento dos sinais de vibração, foram construídas, sobre a plataforma Matlab®, três rotinas computacionais. A primeira, denominada PreLoad, é responsável pela leitura e separação dos 3 canais contidos no sinais de vibração, representados pelo sinal do *encoder* (canal 1), vibração axial (canal 2) e vibração radial (canal 3) distribuindo-os em arquivos independentes, posteriormente é realizada a separação dos blocos de cada um dos canais em colunas independentes. A segunda rotina, denominada PreTSA, é responsável pela realização da média temporal síncrona estável para cada um dos três canais. A terceira e última rotina, denominada HighFilter, é a responsável por duas funções, a primeira consiste na filtragem passa-alta da média temporal síncrona, a segunda é a retirar da TSA uma fatia representativa de um único giro da engrenagem em estudo. A Figura A3.1 apresenta o esquema utilizado no pré-processamento do sinal de vibração, na qual cada etapa é seguida da rotina correspondente.

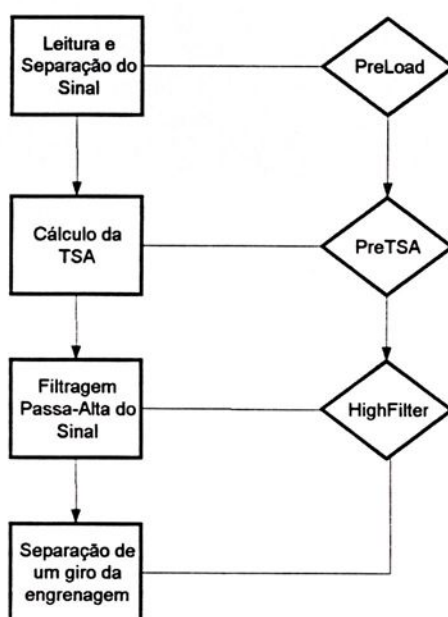


Figura A3.1: Esquema utilizado no pré-processamento dos sinais de vibração.

A seguir é apresentado o código computacional de cada uma das três rotinas utilizadas, PreLoad, PreTSA, HighFilter.

ROTINA PRELOAD

```
%=====IDENTIFICAÇÃO=====
% ORIENTADO: DEMIAN GOMES DA SILVA
% ORIENTADOR: ADYLES ARATO JUNIOR
% BOLSA: FAPESP
% PROJETO: DETECÇÃO DE FALHAS EM REDUTORES – ROTINA PRELOAD
% DATA: OUTUBRO 2000
% =====

close all
clear all
clc
disp('=====')
disp('          PROGRAMA DE ANÁLISE DE REDUTORES DE ENGRENAGENS')
disp(' ')
disp(' ENTRADA DE DADOS')
disp('=====')
disp(' ')
arq=input(' Entre com o nome do arquivo de dados: ','s');
disp(' ')
ncan=input(' Entre com o número de canais do sinal: ncan=');
disp(' ')
ncan=3;
ns=input(' Entre com o número de pontos por bloco: ns=');
ns=4096;
disp(' ')
dt=input(' Entre com o intervalo de tempo da aquisição dt [s]: dt=');
disp(' ')
% CARREGA O ARQUIVO DE DADOS')
```



```
% =====  
  
arq=[num2str(arq),'.asc'];  
dat=load (arq);  
  
%ADOTANDO CANAL1=TRIGGER, CANAL2=AXIAL, CANAL3=RADIAL.  
  
% INICIO DA SEPARAÇÃO DOS BLOCOS DO TRIGGER')  
% =====  
uu=1;% Seta o canal do trigger  
x=dat(:,uu);  
nx=length(x);  
nk=nx/ns;  
nx1=0;  
nx2=0;  
  
for i=1:nk  
    nx1=nx2+1;  
    nx2=nx2+ns;  
    trigger(:,i)=x(nx1:nx2); %Distribui os blocos de dados em colunas independentes  
end  
  
% INICIO DA SEPARAÇÃO DOS BLOCOS DO AXIAL')  
% =====  
uu=2;% Seta o canal do axial  
x=dat(:,uu);  
nx=length(x);  
nk=nx/ns;  
nx1=0;  
nx2=0;  
  
for i=1:nk  
    nx1=nx2+1;  
    nx2=nx2+ns;  
    axial(:,i)=x(nx1:nx2); %Distribui os blocos de dados em colunas independentes
```



```
end
```

```
% INICIO DA SEPARAÇÃO DOS BLOCOS DO RADIAL')
```

```
% =====
```

```
uu=3;% Seta o canal do axial
```

```
x=dat(:,uu);
```

```
nx=length(x);
```

```
nk=nx/ns;
```

```
nx1=0;
```

```
nx2=0;
```

```
for i=1:nk
```

```
    nx1=nx2+1;
```

```
    nx2=nx2+ns;
```

```
    radial(:,i)=x(nx1:nx2);%Distribui os blocos de dados em colunas independentes
```

```
end
```

```
% INICIO DA GRAVAÇÃO DOS ARQUIVOS E LIBERAÇÃO DE MEMÓRIA
```

```
% =====
```

```
save trigger trigger
```

```
clear trigger
```

```
save axial axial
```

```
clear axial
```

```
save radial radial
```

```
clear radial
```

```
clear dat
```



ROTINA PreTSA

```
%=====IDENTIFICAÇÃO=====
% ORIENTADO: DEMIAN GOMES DA SILVA
% ORIENTADOR: ADYLES ARATO JUNIOR
% BOLSA: FAPESP
% PROJETO: DETECÇÃO DE FALHAS EM REDUTORES – ROTINA PRETSA
% DATA: OUTUBRO 2000
%=====

close all
clear all
clc

disp(' ')
np=input(' Entre com o número de pontos de cada bloco do arquivo de dados: ','np');
disp(' ')
nk=input(' Entre com o número de blocos: nk=');

% CARREGA O ARQUIVO DE DADOS')
% =====

load trigger;
load axial;
load radial;

% CALCULO DA MÉDIA TEMPORAL SÍNCRONA PARA O TRIGGER
% =====

tsa=zeros(np,nk);
tsa(:,1)=trigger(:,1);

for i=1:nk-1
    tsa(:,i+1)=tsa(:,i)+((trigger(:,i+1)-tsa(:,i))/(i+1));
end

tsatrigger=tsa(:,nk);
```



```
% CALCULO DA MÉDIA TEMPORAL SÍNCRONA PARA O AXIAL
```

```
% =====
```

```
tsa=zeros(np,nk);
```

```
tsa(:,1)=axial(:,1);
```

```
for i=1:nk-1
```

```
    tsa(:,i+1)=tsa(:,i)+((axial(:,i+1)-tsa(:,i))/(i+1));
```

```
end
```

```
tsaaxial=tsa(:,nk);
```

```
% CALCULO DA MÉDIA TEMPORAL SÍNCRONA PARA O RADIAL
```

```
% =====
```

```
tsa=zeros(np,nk);
```

```
tsa(:,1)=radial(:,1);
```

```
for i=1:nk-1
```

```
    tsa(:,i+1)=tsa(:,i)+((radial(:,i+1)-tsa(:,i))/(i+1));
```

```
end
```

```
tsaradial=tsa(:,nk);
```

```
clear tsa
```

```
tsa=zeros(np,3);
```

```
tsa(:,1)=tsatrigger;
```

```
tsa(:,2)=tsaaxial;
```

```
tsa(:,3)=tsaradial;
```



ROTINA HighFilter

```
%=====IDENTIFICAÇÃO=====
% ORIENTADO: DEMIAN GOMES DA SILVA
% ORIENTADOR: ADYLES ARATO JUNIOR
% BOLSA: FAPESP
% PROJETO: DETECÇÃO DE FALHAS EM REDUTORES – ROTINA HIGHFILTER
% DATA: OUTUBRO 2000
% =====

disp(' ')
palta=input(' Entre com a frequência passa alta: ','palta');
[b,a]=cheby2(7,50,palta*2/fa,'high');
[H,w]=freqz(b,a,np);
tf=filter(b,a,tsa);

%Pega do vetor com os pontos da posição 1 até a posição ident(1,1)
for j=1:delta
    sinalfil(j)=tf((delta/2)+j);
end

es=fft(sinalfil);
% CALCULO DOS FATORES DE AQUISIÇÃO PARA A CONDIÇÃO DE CADA GIRO
% =====

np2=length(sinalfil);
dt2=dt;
tt2=(np2-1)*dt2;
fa2=1/dt2;
t2=0:dt2:(np2*dt2-dt2);
df2=fa2/np2;
f2=0:df2:(np2*df2-df2)/2;
angu2=0:360*fpinhao*dt2:(np2*360*fpinhao*dt2-360*fpinhao*dt2);
```



```
% CALCULO DO VALOR RMS DO SINAL FILTRADO
```

```
% =====
```

```
rms4=sinalfil;
```

```
rms3=rms4.*rms4;
```

```
rms2=sum(rms3)/length(sinalfil);
```

```
rms=sqrt(rms2);
```

```
% CALCULO DO FATOR DE CRISTA DO SINAL FILTRADO
```

```
% =====
```

```
cf=max(sinalfil)/rms;
```

```
% CALCULO DO VALOR PICO-A-PICO DO SINAL FILTRADO
```

```
% =====
```

```
vpp=max(sinalfil)+abs(min(sinalfil));
```

```
figure(1)
```

```
hndl=plot(w*fa/(2*pi),abs(H),'k');
```

```
title('Resposta do Filtro Passa-Alta')
```

```
xlabel('Frequência (Hz)');
```

```
ylabel('Mag.da Resposta em frequência');
```

```
axis([0 3000 0 1.3])
```

```
han=gcf;
```

```
set(han,'numbertitle','off');
```

```
str=sprintf('Programa de Análise de Redutores: Resposta do Filtro Chebyshev Passa-Alta (Arquivo: %s Canal %s)',arq,can);
```

```
set(han,'name',str);
```

```
set(hndl,'LineWidth',1.5)
```

```
zoom on;
```

```
grid on;
```

```
figure(2)
```

```
freqz(b,a,np,fa);
```

```
title('Filtro Chebyshev Passa Alto')
```

```
zoom on
grid on;

figure(3)
hndl=plot(t,tsa,'k');
title(sprintf('TSA Original: Tempo Total Aquisição = %s',num2str(tt)))
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Velocidade [mm/s]')
axis([0 tt 1.5*min(tsa) 1.5*max(tsa)])
han=gcf;
set(han,'numbertitle','off');
str=sprintf('Programa de Análise de Redutores: TSA ORIGINAL (Arquivo: %s Canal %s)',arq,can);
set(han,'name',str);
set(hndl,'LineWidth',1.5)
grid on

figure(4)
hndl=plot(t,tf,'k');
title(sprintf('TSA Filtrado até %s Hz',num2str((palta))))
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Velocidade [mm/s]')
axis([0 tt 1.5*min(tf) 1.5*max(tf)])
han=gcf;
set(han,'numbertitle','off');
str=sprintf('Programa de Análise de Redutores: TSA FILTRADO (Arquivo: %s Canal %s)',arq,can);
set(han,'name',str);
set(hndl,'LineWidth',1.5)
grid on

figure(5)
hndl=plot(ang2,sinalfil,'k');
title(sprintf('Sinal Pré-Processado: 1 Giro do Pinhão ( RMS= %s, CF= %s)',num2str(rms),num2str(cf)))
xlabel('Rotação Pinhão [Graus]')
ylabel('Velocidade [mm/s]')
axis([0 360 -4 4])
```




```
han=gcf;
set(han,'numbertitle','off');
str=sprintf('Programa de Análise de Redutores: TSA FILTRADO: 1 GIRO DO PINHÃO (Arquivo: %s Canal %s
)',arq,can);
set(han,'name',str);
set(hndl,'LineWidth',1.5)
grid on

figure(6)
hndl=stem(f2,(abs(es(1:np2/2))/(np2/2)),'k');
title(sprintf('Espectro em Amplitude da TSA Filtrado: F.Engrenamento = %s Hz , Resolução (df)=
%s',num2str(fix(fmalha)), num2str(df2)))
xlabel('Frequência [Hz]')
ylabel('Velocidade [mm/s]')
axis([0 3*fmalha 0 1.5*max((abs(es(1:np2/2))/(np2/2)))])
han=gcf;
set(han,'numbertitle','off');
str=sprintf('Programa de Análise de Redutores: ESPECTRO EM AMPLITUDE DO TSA FILTRADO (Arquivo: %s
Canal %s)',arq,can);
set(han,'name',str);
set(hndl,'LineWidth',1.5)
grid on;
```



Apêndice 4

ROTINA UTILIZADA NO CÁLCULO DO QUARTO MOMENTO DA DISTRIBUIÇÃO BETA

A Figura A4.1 demonstra, de uma forma geral, as etapas envolvidas na obtenção do MapM4. Quando se utiliza como referência uma FDP obtida para um sinal considerado em boas condições, denominada FDP de base, denominamos o MapM4 resultante de HMM4. Quando a FDP utilizada como referência é a obtida para cada sinal independente, denominamos o MapM4 de IMM4.

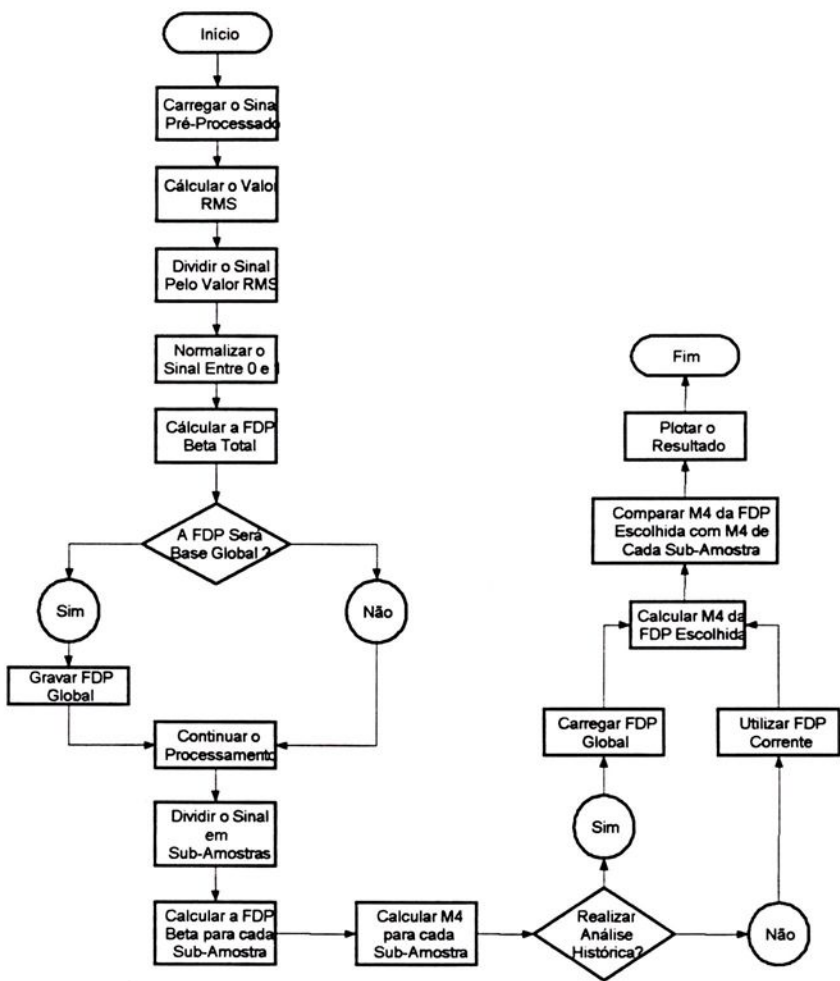


Figura A4.1 - Fluxograma representativo do processamento para obtenção do MapM4.

%=====IDENTIFICAÇÃO=====

% ORIENTADO: DEMIAN GOMES DA SILVA

% ORIENTADOR: ADYLES ARATO JUNIOR

% BOLSA: FAPESP

% PROJETO: DETECÇÃO DE FALHAS EM REDUTORES – ROTINA MAPM4

% DATA: OUTUBRO 2000

%=====

% INICIO DO CALCULO DO FATOR BETAM4

%=====

sinal2=sinalfil/rms;

sinal3=sqrt(sinal2.*sinal2);

sig1=sinal3/(3*pi);%para ficar entre 0 e 1

tam=(length(sig1)/ndentes);%Quantidade de pontos para cada dente

hgt=tam;

if tam-fix(tam)~=0

 cont1=ndentes;

 tam=floor(tam);

else

 cont1=ndentes;

end

cont2=1;

xpto=0:1/255:1; %vetor de 0 a 1 para o calculo da distribuição (Para ver a curva)

for i=1:cont1

 for j=cont2:(cont2+(tam-1))

 vaux(j-cont2+1)=sig1(j);

 end

cadadente(:,i)=vaux';% Vetor possui em cada coluna os pontos de cada dente

sinal=vaux;

% inicio da montagem da amostra GRANDE


```
amostra=zeros(1,100*tam);
contk=1;
    for j=1:100
        contk2=1;

        for ti=contk:contk+tam-1
            amostra(ti)=sinal(contk2);
            contk2=contk2+1;
        end

        contk=contk+tam;
    end

sinalmaior=amostra;
media=(mean(sinalmaior));
vari=(var(sinalmaior));
a=((media/vari))*((1-media)*media-vari);
k=(((1-media)/vari))*((1-media)*media-vari);
m4o=((a+3)*(a+2)*(a+1)*a)/((a+k+3)*(a+k+2)*(a+k+1)*(a+k)); % 4 momento em torno da origem
m4m=(3*a*k*(-2*a*k+2*k^2+2*a^2+a^2*k+a*k^2))/(((a+k)^4)*(a+k+1)*(a+k+2)*(a+k+3)); % 4 momento em
    torno da média
km4=(3*(2*a^2+a^2*k-2*a*k+a*k^2+2*k^2)*(a+k+1))/(a*k*(a+k+2)*(a+k+3)); %Kurtosis de Beta
fdpbeta(:,i)=betapdf(xpto',a,k);
sinaldente(:,i)=sinal';
vmedia(i)=media;
vvari(i)=vari;
va(i)=a;
vk(i)=k;
vkm4(i)=km4;
vm4o(i)=m4o;
vm4m(i)=m4m;
clear vaux
cont2=cont2+tam;

end
```

```
clear media;vari;a;k;m4o;m4m;km4
```

```
% INICIO DO CALCULO DO FATOR BETAM4 PARA O ENGRENAMENTO DE REFERENCIA
```

```
% =====
```

```
media=(mean(sig1));
```

```
vari=(var(sig1));
```

```
a=((media/vari))*((1-media)*media-vari);
```

```
k((((1-media)/vari))*((1-media)*media-vari);
```

```
m4omesh=((a+3)*(a+2)*(a+1)*a)/((a+k+3)*(a+k+2)*(a+k+1)*(a+k)); % 4 momento em torno da origem
```

```
m4mmesh=(3*a*k*(-2*a*k+2*k^2+2*a^2+a^2*k+a*k^2))/(((a+k)^4)*(a+k+1)*(a+k+2)*(a+k+3));% 4 momento  
em torno da média
```

```
km4mesh=(3*(2*a^2+a^2*k-2*a*k+a*k^2+2*k^2)*(a+k+1))/(a*k*(a+k+2)*(a+k+3));%Kurtosis de Beta
```

Apêndice 5

RESULTADOS NÚMERICOS DO MAPM4 PARA
A CONDIÇÃO DE FALHA 1

Com o objetivo de investigar o comportamento do método estatístico proposto, foram realizados ensaios de curta duração sob diversas condições de operação do redutor em estudo, totalizando oito condições diferentes, que foram agrupadas em duas classes distintas: classe 1, composta por quatro condições de operação, é caracterizada por conter as condições sujeitas à variação unívoca de torque, mantendo a rotação constante; classe 2, também composta por quatro condições distintas de operação, é caracterizada por conter as condições sujeitas à variação unívoca da rotação, permanecendo o torque constante.

Cada uma das oito condições operacionais do redutor foi submetida a duas condições de falha: condição 1, com o redutor novo sem nenhuma falha; condição 2, com apenas um tipo falha pontual ocorrendo em um único dente (apêndice 6).

Neste apêndice serão apresentados os resultados numéricos obtidos em relação à condição de falha 1.

Tabela A5.1: Condições operacionais utilizadas nos ensaios relativas ao eixo de entrada do redutor.

	Condição de Operação- CO	Rotação [Rpm]	Torque [N.m]	Potência Útil [W]
CLASSE 1	1	917	1,73	166,53
	2	918	1,32	126,88
	3	916	1,57	150,67
	4	917	2,47	237,90
CLASSE 2	5	1037	1,75	190,32
	6	1339	1,75	245,83
	7	1461	1,65	253,76
	8	1595	1,80	301,34



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 1

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	2,147	15,218	0,0011467	2,142	2,456
2	2,396	18,009	0,0008427	1,309	1,540
3	5,817	41,606	0,0004776	0,309	0,439
4	3,288	24,454	0,0006431	0,762	0,938
5	4,635	34,145	0,0005033	0,379	0,517
6	5,173	46,467	0,0002350	0,356	0,292
7	6,110	67,268	0,0001021	0,720	0,692
8	5,233	61,560	0,0000893	0,755	0,731
9	4,193	40,462	0,0002140	0,414	0,355
10	4,322	37,362	0,0003066	0,160	0,076
11	4,274	51,405	0,0000963	0,736	0,710
12	2,755	39,551	0,0000769	0,789	0,768
13	1,830	32,440	0,0000586	0,839	0,823
14	1,943	37,078	0,0000414	0,887	0,875
15	1,627	34,091	0,0000374	0,897	0,887
16	2,037	33,625	0,0000661	0,819	0,801
17	1,408	23,553	0,0001043	0,714	0,686
18	2,051	33,060	0,0000714	0,804	0,785
19	2,150	22,775	0,0002980	0,183	0,102
20	1,674	17,260	0,0004435	0,215	0,337
21	1,803	20,920	0,0002694	0,262	0,188
22	1,649	18,824	0,0003195	0,125	0,037
23	3,454	39,847	0,0001346	0,631	0,594
24	1,660	18,194	0,0003641	0,002	0,097
25	2,583	25,796	0,0002979	0,184	0,102
26	2,035	23,998	0,0002190	0,400	0,340
27	2,431	23,632	0,0003488	0,044	0,051
28	3,887	31,448	0,0004192	0,149	0,264
29	2,560	16,949	0,0011931	2,269	2,596
30	2,541	21,937	0,0004989	0,367	0,504
31	2,133	16,646	0,0008435	1,311	1,542
32	2,909	29,414	0,0002527	0,308	0,238
33	1,703	21,118	0,0002301	0,370	0,307
34	3,752	47,232	0,0000914	0,750	0,725
35	1,934	27,220	0,0001251	0,657	0,623
36	3,837	40,818	0,0001634	0,552	0,508
37	5,946	62,131	0,0001254	0,656	0,622
38	3,134	35,479	0,0001578	0,568	0,524
39	2,618	22,867	0,0004652	0,275	0,402
40	4,624	29,472	0,0008199	1,247	1,471
41	3,324	22,321	0,0008945	1,451	1,696
42	2,848	24,506	0,0004497	0,232	0,355
43	2,864	29,633	0,0002367	0,351	0,287
44	3,780	33,929	0,0003001	0,178	0,096

Parâmetros Globais	
a	2,259
k	22,814
M4Omesh	0,0003318



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 2

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	2,710	13,348	0,0028691	6,862	6,674
2	4,627	36,999	0,0003810	0,044	0,019
3	2,168	22,688	0,0003076	0,157	0,177
4	4,639	27,954	0,0009840	1,696	1,632
5	2,375	20,083	0,0005749	0,575	0,538
6	3,919	49,515	0,0000868	0,762	0,768
7	3,028	42,303	0,0000770	0,789	0,794
8	2,707	41,903	0,0000597	0,836	0,840
9	3,482	47,597	0,0000727	0,801	0,806
10	1,347	30,215	0,0000386	0,894	0,897
11	2,990	91,528	0,0000042	0,988	0,989
12	2,154	81,322	0,0000028	0,992	0,993
13	2,374	68,209	0,0000070	0,981	0,981
14	3,243	66,705	0,0000173	0,953	0,954
15	3,088	57,542	0,0000263	0,928	0,930
16	1,959	32,086	0,0000714	0,804	0,809
17	2,273	33,215	0,0000897	0,754	0,760
18	2,484	30,255	0,0001552	0,575	0,585
19	2,454	29,997	0,0001553	0,574	0,585
20	2,182	21,264	0,0003899	0,068	0,043
21	1,989	27,425	0,0001299	0,644	0,653
22	2,899	26,730	0,0003488	0,044	0,067
23	3,041	22,803	0,0006717	0,841	0,797
24	2,307	17,941	0,0007835	1,147	1,096
25	4,540	38,817	0,0003067	0,160	0,180
26	3,804	28,811	0,0005340	0,463	0,428
27	1,339	19,070	0,0001980	0,457	0,470
28	3,542	22,409	0,0010305	1,824	1,756
29	1,408	14,831	0,0005184	0,421	0,387
30	3,963	29,794	0,0005295	0,451	0,416
31	3,597	20,978	0,0013253	2,631	2,545
32	3,161	40,631	0,0000995	0,727	0,734
33	3,069	37,428	0,0001237	0,661	0,669
34	4,184	64,883	0,0000389	0,893	0,896
35	2,808	47,785	0,0000406	0,889	0,891
36	4,152	50,914	0,0000920	0,748	0,754
37	4,593	55,090	0,0000918	0,748	0,754
38	3,733	36,005	0,0002361	0,353	0,368
39	3,378	26,789	0,0005058	0,386	0,353
40	3,260	20,318	0,0011609	2,181	2,105
41	2,661	18,861	0,0009196	1,520	1,460
42	3,109	26,197	0,0004438	0,216	0,187
43	3,244	28,540	0,0003680	0,008	0,016
44	3,500	28,759	0,0004346	0,191	0,162

Parâmetros Globais	
a	1,868
k	19,451
M4Omesh	0,0003739



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 3

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	1,793	15,749	0,0006974	0,911	1,093
2	4,361	48,693	0,0001237	0,661	0,629
3	5,047	40,880	0,0003425	0,062	0,028
4	3,914	27,724	0,0006535	0,791	0,961
5	4,404	30,476	0,0006454	0,768	0,937
6	4,149	35,877	0,0003164	0,133	0,051
7	4,353	47,038	0,0001392	0,618	0,582
8	5,193	59,271	0,0001002	0,725	0,699
9	4,552	40,423	0,0002684	0,264	0,195
10	3,716	34,591	0,0002684	0,264	0,195
11	5,704	66,434	0,0000873	0,761	0,738
12	2,268	36,571	0,0000630	0,827	0,811
13	1,904	31,977	0,0000677	0,814	0,797
14	2,798	51,545	0,0000304	0,917	0,909
15	1,918	34,696	0,0000512	0,860	0,846
16	3,610	57,253	0,0000408	0,888	0,878
17	3,123	54,330	0,0000335	0,908	0,900
18	2,532	39,117	0,0000648	0,823	0,806
19	2,000	23,825	0,0002161	0,408	0,352
20	1,998	19,822	0,0004066	0,114	0,220
21	1,693	18,945	0,0003309	0,093	0,007
22	1,834	21,016	0,0002750	0,246	0,175
23	3,622	39,001	0,0001647	0,549	0,506
24	1,843	20,274	0,0003147	0,138	0,056
25	2,519	26,297	0,0002626	0,281	0,212
26	2,206	26,356	0,0001900	0,479	0,430
27	1,773	19,260	0,0003451	0,054	0,035
28	3,513	24,987	0,0007048	0,931	1,115
29	2,231	13,616	0,0017762	3,867	4,330
30	2,843	22,619	0,0005870	0,608	0,761
31	2,117	16,016	0,0009421	1,581	1,827
32	2,431	24,985	0,0002879	0,211	0,136
33	1,749	21,456	0,0002309	0,367	0,307
34	4,106	62,876	0,0000414	0,887	0,876
35	1,652	24,623	0,0001254	0,656	0,624
36	2,985	33,122	0,0001778	0,513	0,467
37	5,393	58,715	0,0001155	0,683	0,653
38	3,021	34,634	0,0001564	0,571	0,531
39	2,597	23,191	0,0004349	0,192	0,305
40	5,165	31,121	0,0009152	1,508	1,746
41	3,642	22,529	0,0010844	1,971	2,254
42	2,796	22,313	0,0005906	0,618	0,772
43	3,598	35,011	0,0002365	0,352	0,290
44	2,863	24,412	0,0004614	0,264	0,384

Parâmetros Globais	
a	2,243
k	22,677
M4Omesh	0,0003332



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 4

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	1,858	18,011	0,0004798	0,315	0,315
2	2,186	31,882	0,0000947	0,741	0,741
3	1,499	14,630	0,0006152	0,686	0,686
4	2,846	18,035	0,0012415	2,402	2,402
5	2,939	23,707	0,0005430	0,488	0,488
6	5,073	50,743	0,0001631	0,553	0,553
7	6,256	56,684	0,0002013	0,448	0,448
8	4,501	55,803	0,0000828	0,773	0,773
9	2,755	34,539	0,0001252	0,657	0,657
10	4,017	38,796	0,0002210	0,394	0,394
11	3,783	55,970	0,0000505	0,862	0,862
12	2,043	31,685	0,0000824	0,774	0,774
13	2,144	32,174	0,0000875	0,760	0,760
14	2,018	44,174	0,0000238	0,935	0,935
15	0,964	20,379	0,0000821	0,775	0,775
16	1,637	31,063	0,0000533	0,854	0,854
17	1,924	27,609	0,0001174	0,678	0,678
18	1,854	24,347	0,0001686	0,538	0,538
19	1,641	16,748	0,0004708	0,290	0,290
20	1,743	16,632	0,0005472	0,499	0,499
21	1,995	21,944	0,0002857	0,217	0,217
22	2,654	24,163	0,0003980	0,091	0,091
23	2,985	31,777	0,0002056	0,437	0,437
24	1,709	16,493	0,0005399	0,480	0,480
25	1,889	16,862	0,0006206	0,701	0,701
26	1,828	22,135	0,0002281	0,375	0,375
27	1,907	19,608	0,0003806	0,043	0,043
28	2,437	22,780	0,0003982	0,091	0,091
29	2,477	15,785	0,0013940	2,820	2,820
30	3,138	25,206	0,0005177	0,419	0,419
31	2,478	19,962	0,0006466	0,772	0,772
32	2,221	22,971	0,0003115	0,146	0,146
33	2,505	23,716	0,0003700	0,014	0,014
34	2,218	37,431	0,0000549	0,850	0,850
35	2,417	32,443	0,0001133	0,690	0,690
36	2,379	27,969	0,0001845	0,494	0,494
37	5,466	69,234	0,0000663	0,818	0,818
38	2,686	32,562	0,0001449	0,603	0,603
39	1,620	17,548	0,0003912	0,072	0,072
40	4,240	25,787	0,0010188	1,792	1,792
41	3,639	19,625	0,0016872	3,623	3,623
42	2,526	18,606	0,0008536	1,339	1,339
43	2,073	23,434	0,0002482	0,320	0,320
44	2,723	27,828	0,0002603	0,287	0,287

Parâmetros Globais	
a	1,940
k	20,070
M4Omesh	0,0003649



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 5

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	2,628	24,621	0,0003648	0,000	0,007
2	4,122	40,223	0,0002087	0,428	0,424
3	3,059	32,256	0,0002075	0,431	0,427
4	1,781	18,294	0,0004153	0,138	0,146
5	1,734	25,147	0,0001296	0,645	0,642
6	2,285	26,976	0,0001904	0,478	0,474
7	1,852	32,597	0,0000592	0,838	0,837
8	4,803	57,523	0,0000892	0,756	0,754
9	1,970	28,369	0,0001126	0,691	0,689
10	3,151	43,847	0,0000750	0,795	0,793
11	2,512	42,915	0,0000453	0,876	0,875
12	1,344	22,504	0,0001114	0,695	0,693
13	1,804	28,597	0,0000895	0,755	0,753
14	3,398	41,682	0,0001097	0,699	0,697
15	3,166	30,167	0,0002860	0,216	0,211
16	2,396	34,377	0,0000901	0,753	0,751
17	2,223	33,637	0,0000813	0,777	0,776
18	2,195	29,400	0,0001276	0,650	0,648
19	2,165	22,121	0,0003347	0,083	0,076
20	2,170	19,538	0,0005133	0,407	0,417
21	2,245	19,204	0,0005873	0,609	0,621
22	1,840	15,394	0,0007944	1,177	1,193
23	2,490	23,742	0,0003633	0,004	0,003
24	2,197	17,885	0,0007102	0,946	0,961
25	2,062	15,051	0,0010900	1,987	2,009
26	2,525	17,792	0,0009870	1,705	1,725
27	1,900	12,769	0,0015550	3,261	3,292
28	2,077	16,186	0,0008731	1,392	1,410
29	2,078	14,844	0,0011591	2,176	2,200
30	2,249	18,518	0,0006663	0,826	0,839
31	2,623	22,344	0,0005052	0,384	0,395
32	2,773	25,776	0,0003547	0,028	0,021
33	1,919	24,115	0,0001886	0,483	0,479
34	2,165	21,428	0,0003734	0,023	0,031
35	1,999	23,016	0,0002434	0,333	0,328
36	2,370	26,707	0,0002150	0,411	0,406
37	1,325	16,040	0,0003523	0,035	0,028
38	2,773	33,418	0,0001431	0,608	0,605
39	2,491	31,588	0,0001341	0,633	0,630
40	1,531	15,973	0,0004784	0,311	0,321
41	2,751	22,253	0,0005733	0,571	0,583
42	2,621	25,759	0,0003102	0,150	0,144
43	2,828	26,290	0,0003475	0,048	0,041
44	2,415	25,282	0,0002721	0,255	0,249

Parâmetros Globais

a	1,962
k	20,265
M4Omesh	0,0003623



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 6

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	2,311	28,380	0,0001636	0,552	0,619
2	1,548	36,348	0,0000265	0,927	0,938
3	2,468	21,993	0,0004620	0,266	0,077
4	1,304	14,832	0,0004455	0,221	0,039
5	2,051	26,450	0,0001584	0,566	0,631
6	1,971	33,207	0,0000640	0,825	0,851
7	2,828	37,435	0,0001003	0,725	0,766
8	5,528	34,128	0,0008086	1,216	0,885
9	2,029	22,923	0,0002553	0,301	0,405
10	1,722	17,386	0,0004594	0,259	0,071
11	2,041	75,502	0,0000032	0,991	0,992
12	3,014	39,110	0,0001008	0,724	0,765
13	2,907	28,213	0,0002915	0,201	0,320
14	1,727	26,237	0,0001104	0,698	0,743
15	1,858	15,702	0,0007594	1,081	0,771
16	1,607	11,978	0,0013600	2,727	2,171
17	4,220	36,222	0,0003202	0,123	0,253
18	1,208	12,181	0,0007410	1,030	0,728
19	1,577	12,734	0,0010748	1,945	1,506
20	0,983	6,662	0,0034161	8,361	6,965
21	2,438	15,821	0,0013352	2,659	2,113
22	1,274	9,015	0,0021375	4,857	3,984
23	2,791	20,766	0,0007477	1,049	0,743
24	2,034	15,739	0,0009142	1,505	1,132
25	2,162	20,103	0,0004627	0,268	0,079
26	2,875	32,101	0,0001806	0,505	0,579
27	1,571	27,731	0,0000734	0,799	0,829
28	1,743	17,472	0,0004634	0,270	0,081
29	1,185	15,357	0,0003281	0,101	0,235
30	1,784	20,911	0,0002636	0,278	0,385
31	4,453	39,991	0,0002624	0,281	0,388
32	3,638	41,101	0,0001383	0,621	0,678
33	1,284	11,727	0,0009423	1,582	1,197
34	1,856	20,641	0,0003007	0,176	0,299
35	1,713	22,090	0,0001992	0,454	0,536
36	1,441	14,914	0,0005328	0,460	0,242
37	2,603	33,041	0,0001273	0,651	0,703
38	2,421	23,153	0,0003705	0,015	0,136
39	1,666	30,335	0,0000604	0,834	0,859
40	1,128	13,887	0,0004204	0,152	0,020
41	2,879	32,567	0,0001723	0,528	0,598
42	1,168	19,945	0,0001284	0,648	0,701
43	2,043	34,600	0,0000600	0,836	0,860
44	2,435	47,569	0,0000287	0,921	0,933

Parâmetros Globais	
a	1,519
k	16,423
M4Omesh	0,0004289



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 7

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	3,531	29,872	0,0003902	0,069	0,154
2	4,171	41,435	0,0001940	0,468	0,426
3	2,560	28,851	0,0001974	0,459	0,416
4	3,906	36,392	0,0002565	0,297	0,241
5	4,546	46,669	0,0001615	0,558	0,522
6	2,423	21,527	0,0004761	0,304	0,408
7	1,919	39,102	0,0000331	0,909	0,902
8	2,398	35,923	0,0000770	0,789	0,772
9	5,363	59,915	0,0001057	0,710	0,687
10	1,902	23,224	0,0002108	0,422	0,376
11	4,944	60,617	0,0000802	0,780	0,763
12	1,948	29,650	0,0000937	0,743	0,723
13	1,435	31,024	0,0000401	0,890	0,881
14	2,106	39,225	0,0000408	0,888	0,879
15	3,918	69,378	0,0000252	0,931	0,925
16	1,905	29,221	0,0000938	0,743	0,723
17	2,603	56,374	0,0000181	0,950	0,946
18	2,318	37,986	0,0000579	0,841	0,829
19	2,006	28,570	0,0001145	0,686	0,661
20	1,937	21,682	0,0002787	0,236	0,176
21	4,589	46,902	0,0001628	0,554	0,518
22	2,767	26,383	0,0003256	0,108	0,037
23	3,268	29,912	0,0003191	0,126	0,056
24	5,134	49,716	0,0001813	0,503	0,464
25	3,986	42,438	0,0001577	0,568	0,533
26	2,412	36,193	0,0000761	0,791	0,775
27	4,198	54,601	0,0000737	0,798	0,782
28	1,416	22,775	0,0001189	0,674	0,648
29	6,165	59,347	0,0001640	0,551	0,515
30	2,088	30,496	0,0000996	0,727	0,705
31	4,603	43,737	0,0002101	0,424	0,379
32	8,312	71,569	0,0002059	0,436	0,391
33	2,712	22,348	0,0005463	0,497	0,616
34	8,355	81,807	0,0001302	0,643	0,615
35	2,893	24,003	0,0005009	0,373	0,482
36	1,982	19,542	0,0004190	0,148	0,239
37	3,175	20,661	0,0010317	1,827	2,052
38	3,032	22,279	0,0007208	0,975	1,132
39	4,582	31,151	0,0006653	0,823	0,968
40	2,453	13,239	0,0023752	5,509	6,026
41	4,356	25,430	0,0011411	2,127	2,375
42	3,358	20,914	0,0011346	2,109	2,356
43	4,590	35,912	0,0004130	0,132	0,222
44	3,613	24,453	0,0008120	1,225	1,402

Parâmetros Globais

a	2,192
k	22,237
M4Omesh	0,0003381



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 8

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	1,592	23,901	0,0001287	0,647	0,711
2	1,725	38,243	0,0000280	0,923	0,937
3	2,140	27,566	0,0001512	0,586	0,660
4	3,328	29,237	0,0003614	0,010	0,188
5	2,219	24,812	0,0002381	0,348	0,465
6	1,793	32,725	0,0000542	0,851	0,878
7	2,383	32,295	0,0001112	0,695	0,750
8	3,858	51,770	0,0000708	0,806	0,841
9	3,287	48,961	0,0000562	0,846	0,874
10	3,756	55,567	0,0000508	0,861	0,886
11	1,926	48,301	0,0000152	0,958	0,966
12	1,150	33,459	0,0000190	0,948	0,957
13	1,849	45,861	0,0000168	0,954	0,962
14	3,547	179,832	0,0000005	0,999	0,999
15	1,963	48,708	0,0000154	0,958	0,965
16	1,843	35,043	0,0000450	0,877	0,899
17	2,561	51,375	0,0000245	0,933	0,945
18	2,522	35,480	0,0000913	0,750	0,795
19	5,067	47,068	0,0002120	0,419	0,524
20	1,882	27,845	0,0001084	0,703	0,756
21	3,920	35,900	0,0002715	0,256	0,390
22	3,041	41,546	0,0000830	0,772	0,814
23	3,594	30,566	0,0003775	0,034	0,152
24	5,926	48,969	0,0002872	0,213	0,355
25	3,379	37,622	0,0001558	0,573	0,650
26	2,484	22,717	0,0004201	0,151	0,056
27	2,916	48,504	0,0000424	0,884	0,905
28	5,385	100,692	0,0000159	0,956	0,964
29	4,779	71,735	0,0000393	0,892	0,912
30	4,905	0,642	0,0000635	0,826	0,857
31	2,195	32,535	0,0000889	0,756	0,800
32	3,563	48,601	0,0000717	0,804	0,839
33	2,367	24,768	0,0002786	0,237	0,374
34	2,353	39,060	0,0000543	0,851	0,878
35	2,012	19,933	0,0004050	0,110	0,090
36	2,556	22,284	0,0004796	0,314	0,077
37	2,682	16,267	0,0015121	3,143	2,397
38	2,713	15,756	0,0017169	3,705	2,857
39	3,004	16,581	0,0018388	4,039	3,130
40	2,146	8,403	0,0069542	18,056	14,621
41	3,065	15,789	0,0022430	5,146	4,038
42	3,103	17,408	0,0016974	3,651	2,813
43	2,805	15,648	0,0018897	4,178	3,245
44	2,341	16,493	0,0010670	1,924	1,397

Parâmetros Globais

a	1,439
k	15,718
M4Omesh	0,0004452



Apêndice 6

RESULTADOS NÚMERICOS DO MAPM4 PARA A CONDIÇÃO DE FALHA 2

Neste apêndice serão apresentados os resultados numéricos obtidos em relação à condição de falha 2.



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 1

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	1,652	36,423	0,0000304	0,917	0,968
2	2,151	60,843	0,0000084	0,977	0,991
3	6,849	135,538	0,0000109	0,970	0,988
4	3,368	60,320	0,0000279	0,924	0,970
5	5,291	80,312	0,0000350	0,904	0,963
6	6,305	70,267	0,0000959	0,737	0,898
7	5,754	70,377	0,0000727	0,801	0,922
8	4,146	68,194	0,0000315	0,914	0,966
9	2,939	59,781	0,0000200	0,945	0,979
10	3,618	81,009	0,0000113	0,969	0,988
11	1,692	81,306	0,0000015	0,996	0,998
12	0,989	50,207	0,0000030	0,992	0,997
13	2,424	85,730	0,0000031	0,992	0,997
14	2,020	68,024	0,0000047	0,987	0,995
15	1,116	10,884	0,0009249	1,534	0,013
16	2,588	14,259	0,0021162	4,799	1,258
17	0,493	1,301	0,0702897	191,608	74,013
18	2,542	5,387	0,0294967	79,827	30,479
19	3,240	29,504	0,0003273	0,103	0,651
20	1,442	9,347	0,0024001	5,577	1,561
21	1,105	24,691	0,0000536	0,853	0,943
22	1,829	22,601	0,0002125	0,418	0,773
23	1,828	35,261	0,0000432	0,882	0,954
24	2,570	38,448	0,0000715	0,804	0,924
25	2,164	31,179	0,0001001	0,726	0,893
26	1,652	23,332	0,0001518	0,584	0,838
27	1,842	33,899	0,0000507	0,861	0,946
28	2,273	41,200	0,0000410	0,888	0,956
29	1,417	21,445	0,0001473	0,596	0,843
30	1,586	25,001	0,0001087	0,702	0,884
31	1,709	23,803	0,0001525	0,582	0,837
32	3,273	49,274	0,0000543	0,851	0,942
33	1,811	36,688	0,0000365	0,900	0,961
34	1,888	83,013	0,0000019	0,995	0,998
35	2,656	73,254	0,0000071	0,980	0,992
36	2,787	76,270	0,0000069	0,981	0,993
37	3,256	121,185	0,0000018	0,995	0,998
38	2,503	140,727	0,0000005	0,999	0,999
39	1,849	54,468	0,0000088	0,976	0,991
40	5,691	69,579	0,0000733	0,799	0,922
41	3,135	38,460	0,0001186	0,675	0,873
42	1,521	35,831	0,0000268	0,926	0,971
43	1,245	70,720	0,0000013	0,996	0,999
44	2,631	84,243	0,0000041	0,989	0,996

Parâmetros Globais	
a	0,512
k	7,299
M4Omesh	0,0009370



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 2

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	1,371	38,418	0,0000165	0,955	0,983
2	2,011	65,430	0,0000054	0,985	0,994
3	1,916	49,204	0,0000140	0,962	0,985
4	3,549	79,015	0,0000118	0,968	0,988
5	5,871	131,312	0,0000076	0,979	0,992
6	7,764	125,095	0,0000219	0,940	0,977
7	5,261	68,496	0,0000616	0,831	0,936
8	3,435	56,829	0,0000366	0,900	0,962
9	1,555	36,954	0,0000251	0,931	0,974
10	2,339	70,040	0,0000061	0,983	0,994
11	2,139	87,476	0,0000021	0,994	0,998
12	2,249	91,934	0,0000019	0,995	0,998
13	1,738	84,950	0,0000014	0,996	0,999
14	2,087	76,677	0,0000032	0,991	0,997
15	0,746	10,359	0,0005390	0,477	0,436
16	1,888	6,601	0,0106721	28,244	10,162
17	0,604	1,418	0,0736949	200,939	76,076
18	3,550	9,970	0,0116652	30,965	11,200
19	1,672	11,959	0,0014790	3,053	0,547
20	1,867	11,858	0,0018952	4,193	0,982
21	1,811	41,321	0,0000236	0,935	0,975
22	1,426	14,969	0,0005152	0,412	0,461
23	2,244	27,197	0,0001773	0,514	0,815
24	4,666	67,227	0,0000466	0,872	0,951
25	2,205	34,145	0,0000755	0,793	0,921
26	1,932	32,726	0,0000644	0,824	0,933
27	1,877	24,916	0,0001599	0,562	0,833
28	1,714	22,792	0,0001787	0,510	0,813
29	1,953	23,985	0,0002000	0,452	0,791
30	2,276	42,870	0,0000356	0,902	0,963
31	1,296	21,904	0,0001137	0,688	0,881
32	2,402	35,233	0,0000829	0,773	0,913
33	1,941	39,528	0,0000326	0,911	0,966
34	1,848	76,052	0,0000025	0,993	0,997
35	2,294	70,804	0,0000055	0,985	0,994
36	1,543	56,996	0,0000049	0,987	0,995
37	2,689	109,253	0,0000016	0,996	0,998
38	2,512	78,981	0,0000046	0,987	0,995
39	1,787	42,955	0,0000198	0,946	0,979
40	3,731	64,367	0,0000290	0,920	0,970
41	4,400	58,992	0,0000635	0,826	0,934
42	3,681	68,023	0,0000228	0,938	0,976
43	2,097	83,660	0,0000023	0,994	0,998
44	3,592	112,330	0,0000032	0,991	0,997

Parâmetros Globais

a	0,498
k	7,161
M4Omesh	0,0009561

CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 3

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	1,672	41,798	0,0000188	0,949	0,980
2	3,547	100,499	0,0000047	0,987	0,995
3	3,017	67,020	0,0000140	0,962	0,985
4	5,007	86,133	0,0000229	0,937	0,975
5	6,589	88,114	0,0000481	0,868	0,948
6	5,779	70,876	0,0000717	0,803	0,923
7	4,792	71,735	0,0000396	0,891	0,958
8	3,915	68,890	0,0000258	0,929	0,972
9	2,081	48,119	0,0000186	0,949	0,980
10	2,250	76,128	0,0000040	0,989	0,996
11	2,895	122,118	0,0000013	0,997	0,999
12	2,310	77,408	0,0000040	0,989	0,996
13	1,738	68,976	0,0000031	0,992	0,997
14	1,658	66,994	0,0000031	0,991	0,997
15	1,024	13,374	0,0003985	0,092	0,573
16	2,603	12,639	0,0031054	7,509	2,326
17	0,523	1,345	0,0701989	191,359	74,178
18	3,778	7,957	0,0233749	63,052	24,033
19	3,246	26,425	0,0004798	0,315	0,486
20	1,576	9,060	0,0031165	7,540	2,338
21	1,151	27,722	0,0000381	0,895	0,959
22	1,736	21,570	0,0002228	0,389	0,761
23	1,644	27,002	0,0000893	0,755	0,904
24	4,468	58,625	0,0000679	0,814	0,927
25	2,344	28,308	0,0001706	0,533	0,817
26	1,821	24,195	0,0001656	0,546	0,823
27	2,399	40,717	0,0000489	0,866	0,948
28	2,264	41,449	0,0000398	0,891	0,957
29	1,326	22,505	0,0001082	0,704	0,884
30	1,162	19,744	0,0001318	0,639	0,859
31	2,645	31,563	0,0001558	0,573	0,833
32	2,828	42,074	0,0000658	0,820	0,930
33	2,283	47,662	0,0000242	0,934	0,974
34	2,288	114,618	0,0000009	0,998	0,999
35	2,399	70,596	0,0000063	0,983	0,993
36	2,882	80,055	0,0000063	0,983	0,993
37	1,549	53,755	0,0000061	0,983	0,993
38	2,922	89,023	0,0000044	0,988	0,995
39	1,644	44,677	0,0000141	0,961	0,985
40	5,887	91,806	0,0000294	0,920	0,969
41	3,799	55,757	0,0000518	0,858	0,945
42	2,275	47,250	0,0000248	0,932	0,973
43	1,952	97,204	0,0000011	0,997	0,999
44	2,781	111,291	0,0000016	0,996	0,998

Parâmetros Globais

a	0,515
k	7,323
M4Omesh	0,0009338



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 4

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	1,908	37,026	0,0000399	0,891	0,954
2	2,059	41,573	0,0000312	0,914	0,964
3	4,877	69,973	0,0000457	0,875	0,947
4	3,824	51,066	0,0000726	0,801	0,916
5	4,570	61,672	0,0000602	0,835	0,931
6	5,413	66,123	0,0000761	0,791	0,912
7	5,267	73,634	0,0000475	0,870	0,945
8	3,928	61,697	0,0000392	0,893	0,955
9	2,517	48,759	0,0000285	0,922	0,967
10	4,011	70,009	0,0000260	0,929	0,970
11	1,691	51,548	0,0000088	0,976	0,990
12	1,519	50,554	0,0000074	0,980	0,991
13	1,279	38,604	0,0000140	0,962	0,984
14	1,736	51,918	0,0000091	0,975	0,990
15	1,097	11,733	0,0007011	0,921	0,193
16	2,649	12,890	0,0030373	7,323	2,497
17	0,508	1,443	0,0598677	163,050	67,936
18	1,422	3,344	0,0360672	97,832	40,530
19	1,821	19,584	0,0003454	0,054	0,602
20	1,489	9,784	0,0022151	5,070	1,551
21	1,133	30,352	0,0000265	0,927	0,969
22	1,875	19,611	0,0003663	0,004	0,578
23	2,438	41,670	0,0000468	0,872	0,946
24	1,317	24,586	0,0000778	0,787	0,910
25	2,215	36,938	0,0000574	0,843	0,934
26	1,535	24,473	0,0001093	0,700	0,874
27	1,817	27,352	0,0001067	0,708	0,877
28	1,827	31,404	0,0000657	0,820	0,924
29	1,802	27,579	0,0001017	0,721	0,883
30	1,633	29,265	0,0000658	0,820	0,924
31	1,684	26,244	0,0001043	0,714	0,880
32	2,659	49,197	0,0000317	0,913	0,964
33	1,993	41,093	0,0000301	0,917	0,965
34	2,644	118,039	0,0000011	0,997	0,999
35	2,189	69,023	0,0000054	0,985	0,994
36	3,852	105,233	0,0000050	0,986	0,994
37	1,775	46,458	0,0000145	0,960	0,983
38	1,785	51,800	0,0000098	0,973	0,989
39	1,558	38,729	0,0000212	0,942	0,976
40	4,715	66,465	0,0000501	0,863	0,942
41	3,700	39,659	0,0001642	0,550	0,811
42	2,659	38,749	0,0000758	0,792	0,913
43	2,722	72,168	0,0000080	0,978	0,991
44	2,798	84,018	0,0000049	0,987	0,994

Parâmetros Globais	
a	0,569
k	7,846
M4Omesh	0,0008685



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 5

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	2,422	69,388	0,0000069	0,981	0,992
2	4,252	89,424	0,0000123	0,966	0,985
3	2,052	35,915	0,0000529	0,855	0,936
4	1,536	41,039	0,0000166	0,955	0,980
5	3,356	41,480	0,0001081	0,704	0,869
6	2,469	29,211	0,0001732	0,525	0,790
7	3,390	37,521	0,0001586	0,565	0,808
8	3,820	47,125	0,0000967	0,735	0,883
9	3,101	44,961	0,0000657	0,820	0,920
10	3,195	50,306	0,0000472	0,871	0,943
11	2,523	61,977	0,0000117	0,968	0,986
12	1,547	41,489	0,0000162	0,956	0,980
13	1,589	43,265	0,0000147	0,960	0,982
14	2,063	47,746	0,0000188	0,949	0,977
15	2,588	36,814	0,0000852	0,767	0,897
16	2,437	12,315	0,0029241	7,013	2,545
17	1,276	9,750	0,0016786	3,600	1,035
18	1,654	2,649	0,0710581	193,714	85,151
19	2,095	6,925	0,0113006	29,966	12,701
20	0,989	10,293	0,0008923	1,445	0,082
21	3,309	37,450	0,0001500	0,589	0,818
22	4,083	34,757	0,0003381	0,073	0,590
23	1,711	42,656	0,0000183	0,950	0,978
24	4,515	57,093	0,0000769	0,789	0,907
25	2,152	52,597	0,0000145	0,960	0,982
26	1,424	18,108	0,0002687	0,264	0,674
27	1,899	34,680	0,0000501	0,863	0,939
28	1,890	34,019	0,0000531	0,854	0,936
29	3,254	56,853	0,0000316	0,913	0,962
30	1,704	29,680	0,0000688	0,811	0,917
31	1,420	20,566	0,0001715	0,530	0,792
32	2,633	37,128	0,0000862	0,764	0,895
33	2,553	40,426	0,0000587	0,839	0,929
34	1,298	27,588	0,0000497	0,864	0,940
35	2,110	51,488	0,0000150	0,959	0,982
36	1,852	55,652	0,0000081	0,978	0,990
37	1,564	57,956	0,0000047	0,987	0,994
38	2,458	76,215	0,0000050	0,986	0,994
39	3,602	112,501	0,0000032	0,991	0,996
40	1,578	40,140	0,0000191	0,948	0,977
41	4,284	57,560	0,0000644	0,823	0,922
42	3,843	59,068	0,0000433	0,881	0,948
43	4,279	71,298	0,0000293	0,920	0,965
44	1,329	51,504	0,0000051	0,986	0,994

Parâmetros Globais

a	0,610
k	8,244
M4Omesh	0,0008248



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 6

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	2,121	71,654	0,0000044	0,988	0,997
2	2,530	110,895	0,0000013	0,996	0,999
3	2,794	132,716	0,0000008	0,998	0,999
4	1,982	63,531	0,0000058	0,984	0,996
5	2,861	99,813	0,0000027	0,993	0,998
6	1,664	46,550	0,0000124	0,966	0,991
7	1,645	91,040	0,0000009	0,997	0,999
8	3,117	136,998	0,0000010	0,997	0,999
9	1,228	45,712	0,0000068	0,981	0,995
10	2,099	61,798	0,0000074	0,980	0,994
11	2,132	211,276	0,0000001	1,000	1,000
12	2,096	127,826	0,0000005	0,999	1,000
13	1,782	95,766	0,0000009	0,997	0,999
14	1,719	85,598	0,0000013	0,996	0,999
15	1,196	23,724	0,0000726	0,801	0,945
16	2,422	13,642	0,0021049	4,768	0,585
17	1,183	4,879	0,0109974	29,135	7,282
18	2,162	3,008	0,0786040	214,391	58,198
19	2,974	8,075	0,0143873	38,424	9,835
20	1,057	10,520	0,0009352	1,563	0,296
21	4,886	28,916	0,0010075	1,761	0,241
22	2,415	35,579	0,0000812	0,778	0,939
23	2,052	31,068	0,0000894	0,755	0,933
24	1,308	20,694	0,0001416	0,612	0,893
25	4,656	93,218	0,0000138	0,962	0,990
26	1,468	25,487	0,0000859	0,765	0,935
27	1,836	56,455	0,0000076	0,979	0,994
28	2,014	42,144	0,0000282	0,923	0,979
29	1,968	35,852	0,0000482	0,868	0,964
30	2,107	40,078	0,0000378	0,896	0,972
31	3,445	59,380	0,0000314	0,914	0,976
32	2,901	95,051	0,0000033	0,991	0,997
33	1,467	58,125	0,0000040	0,989	0,997
34	1,571	49,365	0,0000087	0,976	0,993
35	3,040	108,497	0,0000023	0,994	0,998
36	2,651	97,168	0,0000024	0,993	0,998
37	1,914	93,705	0,0000012	0,997	0,999
38	3,452	97,722	0,0000049	0,987	0,996
39	1,348	150,033	0,0000001	1,000	1,000
40	1,914	51,596	0,0000117	0,968	0,991
41	2,316	88,935	0,0000024	0,993	0,998
42	1,440	71,910	0,0000017	0,995	0,999
43	1,745	58,226	0,0000060	0,984	0,996
44	4,184	118,286	0,0000041	0,989	0,997

Parâmetros Globais	
a	0,315
k	5,269
M4Omesh	0,0013278



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 7

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	4,314	105,462	0,0000069	0,981	0,994
2	1,809	81,307	0,0000018	0,995	0,998
3	2,145	70,273	0,0000048	0,987	0,995
4	4,230	102,935	0,0000072	0,980	0,993
5	3,685	113,582	0,0000033	0,991	0,997
6	4,205	96,377	0,0000090	0,975	0,992
7	4,168	106,300	0,0000061	0,983	0,994
8	3,162	69,822	0,0000136	0,963	0,987
9	3,038	94,108	0,0000039	0,989	0,996
10	1,882	56,475	0,0000080	0,978	0,993
11	2,839	123,470	0,0000012	0,997	0,999
12	3,454	149,440	0,0000010	0,997	0,999
13	1,331	83,519	0,0000008	0,998	0,999
14	2,830	201,864	0,0000002	1,000	1,000
15	1,965	42,150	0,0000265	0,927	0,975
16	2,333	15,986	0,0011723	2,212	0,096
17	1,340	4,280	0,0185969	49,959	16,394
18	3,410	4,949	0,0566383	154,200	51,974
19	1,472	4,986	0,0146575	39,164	12,709
20	1,197	9,400	0,0016777	3,597	0,569
21	7,284	69,814	0,0001510	0,586	0,859
22	1,975	19,271	0,0004362	0,195	0,592
23	1,809	27,496	0,0001036	0,716	0,903
24	2,923	33,540	0,0001612	0,558	0,849
25	1,225	26,348	0,0000521	0,857	0,951
26	3,652	73,584	0,0000166	0,954	0,984
27	2,033	40,527	0,0000333	0,909	0,969
28	2,496	56,488	0,0000161	0,956	0,985
29	5,844	124,850	0,0000091	0,975	0,992
30	2,135	44,557	0,0000264	0,928	0,975
31	3,496	79,007	0,0000113	0,969	0,989
32	4,909	102,777	0,0000112	0,969	0,990
33	1,781	43,308	0,0000190	0,948	0,982
34	4,859	126,355	0,0000049	0,986	0,995
35	1,372	44,001	0,0000100	0,973	0,991
36	9,274	225,955	0,0000042	0,988	0,996
37	3,572	93,810	0,0000063	0,983	0,994
38	3,061	104,893	0,0000027	0,993	0,998
39	1,973	52,621	0,0000117	0,968	0,989
40	3,192	51,746	0,0000424	0,884	0,960
41	4,151	72,447	0,0000253	0,931	0,976
42	3,117	74,068	0,0000105	0,971	0,990
43	4,145	122,418	0,0000035	0,990	0,997
44	4,276	99,205	0,0000085	0,977	0,992

Parâmetros Globais	
a	0,427
k	6,449
M4Omesh	0,0010692



CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - CO 8

Parâmetros Originais				Análise Histórica	Análise Independente
Dente	a	k	M4 Origem	Dif. M4 Origem	Dif. M4 Origem
1	2,953	82,605	0,0000060	0,984	0,995
2	4,675	190,003	0,0000009	0,997	0,999
3	2,843	69,493	0,0000104	0,971	0,991
4	2,476	48,496	0,0000279	0,924	0,976
5	4,285	101,380	0,0000079	0,978	0,993
6	1,633	46,993	0,0000115	0,969	0,990
7	3,583	147,153	0,0000011	0,997	0,999
8	1,406	62,156	0,0000028	0,992	0,998
9	2,662	150,880	0,0000004	0,999	1,000
10	2,348	140,117	0,0000004	0,999	1,000
11	3,076	228,834	0,0000001	1,000	1,000
12	2,222	256,958	0,0000000	1,000	1,000
13	0,890	71,654	0,0000006	0,998	0,999
14	2,835	256,778	0,0000001	1,000	1,000
15	1,269	21,936	0,0001083	0,703	0,906
16	1,929	16,029	0,0007681	1,105	0,331
17	1,275	4,883	0,0123258	32,775	9,738
18	2,902	5,117	0,0410276	111,424	34,742
19	1,229	3,286	0,0306765	83,060	25,724
20	2,664	11,594	0,0042238	10,574	2,680
21	2,585	26,410	0,0002752	0,246	0,760
22	9,200	52,302	0,0008143	1,231	0,291
23	1,263	26,681	0,0000531	0,855	0,954
24	3,446	65,611	0,0000217	0,941	0,981
25	1,523	30,841	0,0000466	0,872	0,959
26	1,498	41,528	0,0000150	0,959	0,987
27	4,977	88,316	0,0000205	0,944	0,982
28	2,083	49,882	0,0000163	0,955	0,986
29	7,006	113,029	0,0000232	0,937	0,980
30	4,041	155,217	0,0000013	0,996	0,999
31	1,276	41,292	0,0000108	0,970	0,991
32	2,636	75,719	0,0000062	0,983	0,995
33	1,081	30,771	0,0000229	0,937	0,980
34	1,519	44,064	0,0000124	0,966	0,989
35	1,010	40,543	0,0000071	0,980	0,994
36	3,932	97,411	0,0000071	0,980	0,994
37	3,422	59,527	0,0000305	0,916	0,973
38	4,068	75,677	0,0000203	0,944	0,982
39	3,503	76,572	0,0000128	0,965	0,989
40	3,244	47,364	0,0000612	0,832	0,947
41	2,608	53,085	0,0000227	0,938	0,980
42	2,400	63,589	0,0000094	0,974	0,992
43	2,397	81,397	0,0000037	0,990	0,997
44	2,212	66,583	0,0000064	0,982	0,994

Parâmetros Globais	
a	0,387
k	6,035
M4Omesh	0,0011479







UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dem.feis.unesp.br

