

FERNANDA DO CARMO SILVÉRIO VANZO

**METODOLOGIA PARA PREDIÇÃO DE TEMPO DE
FALHA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS
BASEADA NO MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2017

FERNANDA DO CARMO SILVÉRIO VANZO

**METODOLOGIA PARA PREDIÇÃO DE TEMPO DE FALHA DE
MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS BASEADA NO MONITORAMENTO
DE VIBRAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibração

Orientador: Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte

UBERLÂNDIA - MG

2017



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA



ALUNA: Fernanda do Carmo Silverio Vanzo

NÚMERO DE MATRÍCULA: 11522EMC005

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

LINHA DE PESQUISA: Dinâmica de Sistemas Mecânicos

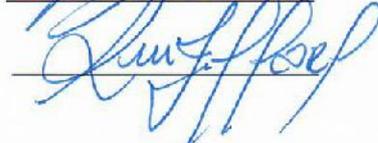
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

“Metodologia para Predição de Tempo de Falha de Máquinas e Equipamentos Baseada no Monitoramento de Vibração”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcus Antonio Viana Duarte

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro B - Bloco 50, Campus Santa Mônica, em 30 de agosto de 2017, às 14:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME	ASSINATURA
Prof. Dr. Marcus Antonio Viana Duarte	UFU 
Prof. Dr. Antônio Marcos Gonçalves de Lima	UFU 
Prof. Dr. Rui Francisco Martins Marçal	PUCPR 

Uberlândia, 30 de agosto de 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

V285m Vanzo, Fernanda do Carmo Silvério, 1984-
2017 Metodologia para predição de tempo de falha de máquinas e
equipamentos baseada no monitoramento de vibração / Fernanda do
Carmo Silvério Vanzo. - 2017.

145 f. : il.

Orientador: Marcus Antônio Viana Duarte.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1109>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Fábricas - Manutenção - Teses.
3. Rolamentos - Teses. 4. Vibração - Teses. I. Duarte, Marcus Antônio
Viana. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

*Dedico este trabalho a todos que, direta
ou indiretamente, contribuíram para a
sua realização.*

*"Os que se encantam com a prática
sem a ciência, são como os timoneiros
que entram no navio sem timão nem
bússola, nunca tendo certeza do seu
destino."*

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, a saúde e capacidade de perseverar.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

Ao Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte, por ter me orientado nesta jornada e, principalmente, por ter me repassado conhecimentos primordiais.

A minha família pelo apoio e amor, que me fortaleceram durante a jornada.

Ao meu esposo Maycon Vanzo, pelo amor, compreensão e paciência principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos colegas do Laboratório de Acústica e Vibrações, em especial a Ms. Geisa Arruda Zuffi, Ms. Déborah Aparecida Souza dos Reis, Prof. Ms. João Gabriel Miranda e ao Prof. Ms. Pedro Pio Rosa Nishida, que me apoiaram durante as diversas etapas da realização do trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelos conhecimentos a mim repassados de forma paciente e sublime.

Ao técnico Jonas Profeta Borges pela construção do protótipo e suporte nos mais diversos momentos.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Ao CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

VANZO, F. C. S. **Metodologia para predição de tempo de falha de máquinas e equipamentos baseada no monitoramento de vibração**. 2017. 124 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para predição de tempo de falha de máquinas e equipamentos baseada no monitoramento de vibração. A partir de medições realizadas em uma bancada experimental, a qual era composta por um motor e cinco mancais de rolamentos, objetivou-se analisar os dados de vibração coletados, aplicando neles ferramentas de análise sinais. Estas ferramentas consistem no cálculo de sintomas vibroacústicos, cuja evolução temporal foi avaliada. O objetivo foi verificar qual(is) sintoma(s) poderia(m) ser modelado(s) conforme a distribuição de Weibull, a qual é muito utilizada para se avaliar tempo de vida de equipamentos. Dentre os sintomas avaliados, verificou-se que os seguintes sintomas poderiam ser modelados conforme a distribuição de Weibull: *kurtosis*, *skewness*, K4, TDA com filtro passa-alta de 3000 Hz, nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-baixa em 100 Hz, nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 1000 e 2000 Hz, nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 2000 e 4000 Hz.

Palavras Chave: Manutenção preditiva. Vibrações. Rolamentos. Weibull. Sintomas vibroacústicos.

VANZO, F. C. S. **Methodology for predicting machine and equipment failure time based on vibration monitoring.** 2017. 124 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

The purpose of this work is to propose a methodology for predicting machine and equipment failure time based on vibration monitoring. Several measurements have been made in an experimental workbench, which was composed of a motor and five bearings. The objective of these measurements was to analyze the vibration data collected by applying specific signal analysis tools. Those specific tools consist on calculating vibroacoustic symptoms, whose temporal evolution has been evaluated. The objective was to verify which symptom (s) could be modeled according to the Weibull distribution, which is widely used to evaluate equipment lifetime. Among the symptoms evaluated, the following symptoms could be modeled according to the Weibull distribution: kurtosis, skewness, K4, TDA with high pass filter of 3000 Hz, energy level of the envelope with low pass filter in 100 Hz, energy level of the filtered envelope with bandpass filter between 1000 and 2000 Hz, filtered envelope energy level with bandpass filter between 2000 and 4000 Hz.

Keywords: Predictive maintenance. Vibrations. Rolling bearings. Weibull distribution. Vibroacoustic symptoms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Custos por cada tipo de manutenção em US\$ / HP / ano	22
Figura 2.2 - Análise qualitativa dos tipos de manutenção	23
Figura 2.3 - Grandezas usadas para caracterização da vibração.....	25
Figura 2.4 - Sistema de um grau de liberdade	25
Figura 2.5 - Representação gráfica das formas de quantificação de vibração	27
Figura 2.6 - Componentes presentes em um rolamento típico de esferas.....	28
Figura 2.7 - Etapas de deterioração de um rolamento	29
Figura 2.8 - Sinais de vibração típicos para falhas em rolamentos.....	30
Figura 2.9 - Efeito de uma falha na pista interna do rolamento sobre o sinal no domínio do tempo	32
Figura 2.10 - Elastômero para medição de vibração	34
Figura 2.11 - Transdutor piezoelétrico	34
Figura 2.12 - Sinal de aceleração analisado: (a) no domínio do tempo; (b) no domínio da frequência.....	35
Figura 3.1 - Diferentes tipos de distribuições em relação à simetria: (a) simétrica; (b) assimétrica negativa; (c) assimétrica positiva	33
Figura 3.2 - Diferentes tipos de distribuições em relação à <i>kurtosis</i> : (a) leptocúrtica; (b) mesocúrtica; (c) platicúrtica	34
Figura 3.3 - Comportamento da curtose com a evolução do desgaste em mancais de rolamentos.....	35
Figura 3.4 - Variação do valores de pico e RMS em função do desgaste de mancais de rolamentos.....	36
Figura 3.5 - Comportamento do FC em função do tempo	36
Figura 3.6 - Representação de médias no domínio do tempo	38
Figura 3.7 - Probabilidade de falha $F(x)$ de um determinado elemento mecânico, em função da carga aplicada x	43
Figura 3.8 - Diagrama de decisão da distribuição de Weibull em relação ao fator forma	46
Figura 3.9 - Exemplos de variação do valor de β	47
Figura 4.1 - Esquema da montagem experimental.....	40
Figura 4.2 - Bancada experimental	41
Figura 4.3 - Placa de identificação do motor elétrico.....	41
Figura 4.4 - Aparato mecânico da montagem experimental	42
Figura 4.5 - Acelerômetro utilizado na bancada experimental.....	44
Figura 4.6 - Cartão de calibração do acelerômetro utilizado	44

Figura 4.7 - Placa de aquisição utilizada	45
Figura 4.8 - Imagem de uma das telas do <i>software</i> R	45
Figura 4.9 - Posicionamento dos acelerômetros nos mancais	46
Figura 5.1 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 2 .	53
Figura 5.2 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 2	54
Figura 5.3 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 1656	
Figura 5.4 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 16	56
Figura 5.5 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 3659	
Figura 5.6 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 36	59
Figura 5.7 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 6061	
Figura 5.8 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 60	62
Figura 5.9 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 6964	
Figura 5.10 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 69 ...	64
Figura 5.11 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 82	66
Figura 5.12 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 82 ...	67
Figura 5.13 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 98	69
Figura 5.14 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 98 ...	69
Figura 5.15 - Análise gráfica da distribuição normal de Weibull para o sintoma de número 99	72
Figura 5.16 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 99 ...	72
Figura 5.17 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 130	75
Figura 5.18 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 130 .	75
Figura 5.19 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 138	77
Figura 5.20 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 138 .	78
Figura 5.21 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 169	80
Figura 5.22 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 169 .	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Custo da manutenção no Brasil	9
Tabela 1.2 - Indisponibilidade de máquinas e instalações devido à manutenção.....	9
Tabela 2.1 - Parâmetros a serem medidos na manutenção preditiva.....	20
Tabela 4.1 - Especificações técnicas dos rolamentos utilizados	43
Tabela 4.2 - Cargas aplicadas nos rolamentos da bancada experimental.....	46
Tabela 4.3 - Ciclo de operação e medição dos rolamentos.....	47
Tabela 4.4 - Sintomas vibroacústicos no domínio do tempo para sinais de aceleração	48
Tabela 4.5 - Sintomas vibroacústicos no domínio do tempo para sinais de velocidade.....	49
Tabela 4.6 - Sintomas vibroacústicos via TDA dos sinais de aceleração	50
Tabela 4.7 - Sintomas vibroacústicos via TDA dos sinais de velocidade.....	51
Tabela 4.8 - Sintomas vibroacústicos relacionados às bandas de oitava para sinais de aceleração	52
Tabela 4.9 - Sintomas vibroacústicos relacionados às bandas de oitava para sinais de velocidade	53
Tabela 4.10 - Sintomas vibroacústicos relacionados aos harmônicos do motor elétrico	54
Tabela 4.11 - Sintomas vibroacústicos relacionados à análise de envelope do sinal	55
Tabela 4.12 - Sintomas vibroacústicos calculados em função de regiões específicas do espectro de frequência	56
Tabela 4.13 - Sintomas vibroacústicos calculados em função de regiões específicas do espectro de frequência utilizando sinais de velocidade.....	57
Tabela 4.14 - Sintomas vibroacústicos relacionados com a análise em bandas de 1/3 de oitava entre 40 e 12.500 Hz	58
Tabela 5.1 - Análise dos sintomas vibroacústicos no domínio do tempo para sinais de aceleração	52
Tabela 5.2 - Análise dos sintomas vibroacústicos no domínio do tempo para sinais de velocidade	55
Tabela 5.3 - Análise dos sintomas vibroacústicos via TDA dos sinais de aceleração	58
Tabela 5.4 - Análise dos sintomas vibroacústicos via TDA dos sinais de velocidade.....	60
Tabela 5.5 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados às bandas de oitava para sinais de aceleração	63
Tabela 5.6 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados às bandas de oitava para sinais de velocidade	65
Tabela 5.7 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados aos harmônicos do motor elétrico.....	68

Tabela 5.8 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados ao envelope do sinal.....	71
Tabela 5.9 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados a regiões do espectro	74
Tabela 5.10 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados a regiões específicas do espectro de frequência utilizando sinais de velocidade	76
Tabela 5.11 - Análise dos sintomas relacionados às bandas de 1/3 de oitava entre 40 e 12.500 Hz	79
Tabela A1 - Análise dos sintomas vibroacústicos no domínio do tempo para sinais de aceleração	85
Tabela A2 - Análise dos sintomas vibroacústicos no domínio do tempo para sinais de velocidade	86
Tabela A3 - Análise dos sintomas vibroacústicos via TDA dos sinais de aceleração	87
Tabela A4 - Análise dos sintomas vibroacústicos via TDA dos sinais de velocidade	88
Tabela A5 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados às bandas de oitava para sinais de aceleração	89
Tabela A6 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados às bandas de oitava para sinais de velocidade	90
Tabela A7 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados aos harmônicos do motor elétrico	91
Tabela A8 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados ao envelope do sinal	92
Tabela A9 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados a regiões do espectro.....	94
Tabela A10 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados a regiões específicas do espectro de frequência utilizando sinais de velocidade	95
Tabela A11 - Análise dos sintomas relacionados às bandas de 1/3 de oitava entre 40 e 12.500 Hz	96

LISTA DE SÍMBOLOS

f	Frequência do movimento harmônico
ω	Frequência angular
x_0	Amplitude de deslocamento
$x(t)$	Deslocamento no tempo
$\dot{x}(t)$	Derivada do deslocamento, ou velocidade
$\ddot{x}(t)$	Derivada segunda do deslocamento, ou aceleração
m	Massa
k	Rigidez da mola
f_s	Velocidade do eixo
n_e	Número de elementos rolantes do rolamento
φ	Ângulo entre a carga e o plano radial
D	Diâmetro do rolamento
d	Diâmetro do elemento rolante
f_r	Frequência da rede elétrica
n	Número inteiro
R_s	Número de ranhuras do rotor do motor
k_e	Número inteiro de baixa ordem
s	Fator de escorregamento do motor de indução
p	Número de pares de polos do motor
k_x	Número inteiro par ou zero
$X(t)$	Função que define o sinal no domínio do tempo
T	Período
M'_3	Momento estatístico central de terceira ordem
σ	Desvio padrão da amostra
M'_4	Momento estatístico central de quarta ordem

$c(\tau)$	Cepstrum de potência do sinal
τ	Deslocamento no tempo
F	Operador Transformada de Fourier
$ S(f) ^2$	Função densidade espectral de potência do sinal $s(t)$.
$y(iT)$	Valor médio do sinal nos períodos analisados
$x(iT)$	Sinal no domínio do tempo
N	O número de períodos analisados no cálculo da média TDA
M	Número de pontos por período
A	Amplitude do sinal
Ω	Frequência angular portadora
$z(t)$	Sinal analítico
$X(f)$	Espectro de $x(t)$
$\tilde{x}(t)$	Integral de convolução de $x(t)$
\otimes	Integral de convolução
α	Vida característica
δ	Parâmetro de forma
$F(x)$	Probabilidade de falha
x	Carga aplicada
$P(x)$	Probabilidade de sobrevivência
η	Carga característica
β	Fator de forma da curva de Weibull
$f(t)$	Probabilidade de um item falhar em um determinado intervalo de tempo t
$R(t)$	Confiabilidade
$Z(t)$	Taxa de falhas
$E(t)$	Esperança matemática
t_0	Vida mínima
η	Vida característica

C_{10}	Classificação dinâmica de rolamentos
C_0	Classificação estática de rolamentos
C3	Folga maior que a normal em rolamentos

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	8
1.1 Contextualização	8
1.2 Objetivos	14
1.3 Organização da dissertação	15
CAPÍTULO II - REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Tipos de Manutenção	16
2.1.1 Manutenção corretiva	16
2.1.2 Manutenção preventiva	17
2.1.3 Manutenção detectiva	18
2.1.4 Manutenção preditiva	18
2.1.5 Engenharia de manutenção	21
2.1.6 Comparação dos tipos de manutenção	21
2.2 Fundamentos de Vibração	23
2.2.1 Quantificação de vibração de equipamentos rotativos	27
2.2.2 Vibrações de rolamentos	28
2.2.3 Formas de medição de vibrações	32
CAPÍTULO III - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
3.1. Definição dos sintomas vibroacústicos	31
3.1.1 Análise em bandas de frequência	31
3.1.2 Análise de harmônicos superiores do motor elétrico	32
3.1.3 Sintoma no domínio do tempo: valor RMS	32
3.1.4 Sintoma no domínio do tempo: <i>skewness</i>	33
3.1.5 Sintoma no domínio do tempo: <i>kurtosis</i>	34
3.1.6 Sintoma no domínio do tempo: fator de crista	35
3.1.7 Sintoma no domínio do tempo: cepstrum	37
3.1.8 Médias no domínio do tempo	37
3.1.9 Análise de ordem	39
3.1.10 Envelope	39

3.2. Curva de Weibull	42
3.3. Testes de Significância.....	47
3.3.1 Teste AIC.....	48
3.3.2 Teste BIC.....	48
3.3.3 Comparação de AIC e BIC.....	48
CAPÍTULO IV - METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS	40
4.1 Bancada experimental.....	40
4.2 Metodologia de coleta de dados.....	46
CAPÍTULO V - RESULTADOS E ANÁLISES.....	51
5.1 Sintomas no domínio do tempo.....	51
5.2 Sintomas via TDA.....	57
5.3 Sintomas relacionados às bandas de oitava.....	62
5.5 Sintomas relacionados aos harmônicos do motor elétrico.....	67
5.6 Sintomas relacionados à análise de envelope.....	70
5.7 Sintomas relacionados a regiões do espectro	73
5.8 Sintomas relacionados à análise em bandas de 1/3 de oitava.....	78
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	75
6.1 Conclusões	75
6.2 Trabalhos futuros	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
ANEXO I - Especificações técnicas do acelerômetro utilizado	82
APÊNDICE I - Resultados dos critérios AIC e BIC.....	84
APÊNDICE II - Códigos desenvolvidos em MATLAB®	98
APÊNDICE III - Códigos desenvolvidos em R.....	111

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A industrialização crescente e a necessidade do emprego de técnicas científicas cada vez mais aprimoradas nas plantas industriais têm intensificado a exigência de níveis de conhecimento tecnológico cada vez mais aprofundados e requerido mais qualidade na execução dos serviços de manutenção. Atualmente, tem-se contabilizado todos os custos envolvidos em uma linha de produção. Assim, despesas com manutenção de máquinas e equipamentos, perdas de produção, interrupções frequentes na produção para reparos e falhas que poderiam ter sido evitadas, não podem ser sustentadas pela indústria cada vez mais competitiva (Marçal, 2000).

No Documento Nacional de Manutenção (ABRAMAN, 2013), a Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN) estima que o custo de manutenção em relação ao faturamento bruto do país (PIB - Produto Interno Bruto) seja de 4,69 %, correspondendo a um valor aproximado de 206 milhões de reais. A Tab. 1.1 apresenta o comportamento do custo de manutenção em relação ao PIB brasileiro durante o período analisado pela ABRAMAN.

Tabela 1.1 - Custo da manutenção no Brasil

Fonte: adaptado de ABRAMAN (2013)

Ano da pesquisa	Ano base	PIB (em milhões de reais)	Custo total de manutenção (em milhões de reais)	Custo total de manutenção / PIB (%)
2013	2012	4.403.000	206.500,70	4,69
2011	2010	3.675.000	145.162,50	3,95
2009	2008	2.900.000	120.060,00	4,14
2007	2006	2.322.000	90.325,80	3,89
2005	2004	1.769.202	72.537,28	4,10
2003	2002	1.346.028	57.475,39	4,27
2001	2000	1.101.255	49.226,09	4,47
1999	1998	914.188	32.545,09	3,56
1997	1996	778.887	34.193,13	4,39
1995	1994	349.205	14.876,13	4,26

Ainda no Documento Nacional de Manutenção (ABRAMAN, 2013), a ABRAMAN estima que a indisponibilidade de máquinas devido à manutenção seja de 6,15 %, com uma tendência crescente. A Tab. 1.2 apresenta o comportamento da indisponibilidade de máquinas e instalações devido à manutenção durante o período analisado pela ABRAMAN.

Tabela 1.2 - Indisponibilidade de máquinas e instalações devido à manutenção

Fonte: adaptado de ABRAMAN (2013)

Ano da pesquisa	Ano base	Indisponibilidade devido à manutenção (%)
2013	2012	6,15
2011	2010	5,44
2009	2008	5,43
2007	2006	5,30
2005	2004	5,80
2003	2002	5,82
2001	2000	5,15
1999	1998	5,63
1997	1996	4,74

Diante desses fatos apresentados no estudo realizado pela ABRAMAN, verifica-se que, apesar de o custo de manutenção apresentar um comportamento crescente, a indisponibilidade dos equipamentos e instalações também tem crescido. Assim, mesmo tendo um custo alto, a eficácia da manutenção não tem tido reflexo positivo no indicador disponibilidade. Por este motivo, torna-se crucial o desenvolvimento e aplicação de ferramentas e técnicas que possibilitem melhor aproveitamento do custo de manutenção resultando em maior disponibilidade e confiabilidade de máquinas e equipamentos.

A manutenção preditiva corresponde a uma técnica que possibilita o atendimento dos objetivos supracitados porque ela visa, principalmente, a redução de custos operacionais e o aumento da disponibilidade das instalações por meio da utilização das peças e equipamentos por um tempo próximo ao da sua vida útil e consequente diminuição de paradas não programadas.

Segundo Weidlich (2009), a crescente utilização de técnicas de manutenção preditiva pela indústria exige o aprimoramento dos procedimentos capazes de fornecer informações sobre o estado em que um equipamento se encontra. Desta forma, torna-se imperativo saber quando um equipamento ou componente mecânico irá falhar bem como entender o comportamento deste diante dos diferentes regimes de operação. Dentre os procedimentos de análise preditiva existentes para máquinas rotativas, a análise de vibração é um dos métodos mais utilizados e está presente em grande parte das principais indústrias do país.

Por meio da adoção de técnicas preditivas, é possível detectar e diagnosticar de forma antecipada defeitos em desenvolvimento nos equipamentos industriais antes que estes falhem. Assim, é possível a programação pontual das intervenções de manutenção antecipadamente às falhas. Com isto, o estoque de peças sobressalentes e o custo da intervenção são reduzidos, além de serem reduzidas, ou mesmo eliminadas, as perdas de produção provenientes de possíveis paradas não programadas (Meola, 2005).

Pinto (2004) publicou um artigo na *National Instruments* no qual discute caminhos para a elaboração de um programa de manutenção preditiva que seja eficaz para aplicação em máquinas de navios e plataformas de petróleo. Neste estudo, é avaliado para qual tipo de máquina a combinação de técnicas preditivas como análise de óleo lubrificante, monitoramento de parâmetros operacionais e análise de vibração pode ser efetiva, e ainda, apresenta aspectos interessantes relativos ao diagnóstico de falhas em máquinas, por meio da análise de casos reais registrados em navios e plataformas.

O monitoramento de parâmetros técnicos em tempo real é de suma importância na aplicação das técnicas de manutenção preditiva. O conhecimento da condição de integridade de equipamentos e instalações sujeitos a danos promovidos pelas mais diversas condições de operação é a preocupação da avaliação preditiva. Associando os conceitos

das técnicas de medições de vibração aos recursos tecnológicos de comunicação, obtém-se uma combinação significativa para o controle de integridade dos equipamentos em tempo real (Meola, 2005).

O conhecimento em tempo real das condições de operação do equipamento permite que a tomada de decisões sobre uma possível intervenção seja realizada antes que ocorra a parada total do equipamento, evitando, assim, a troca prematura de peças ou a parada de produção por uma falha não tratada antecipadamente.

Os rolamentos são elementos mecânicos presentes na maioria dos equipamentos industriais e, devido as suas condições severas de trabalho como alta rotação, alta temperatura, sobrecarga e até desalinhamento, é comum o surgimento de falhas, como quebras ou danos à superfície do rolamento. Estas falhas podem causar a parada de equipamentos, resultando em perdas econômicas, riscos à qualidade de produtos e até mesmo risco aos seres humanos. Desta forma, é importante tentar identificar o mais cedo possível os sinais da possível existência destas falhas, de modo a minimizar ou eliminar as perdas (Zhao et al., 2016)

Tratando-se de falhas em rolamentos, de acordo com Macfadden (1984), quando uma superfície com defeito de um elemento do rolamento entra em contato com outra superfície do rolamento, este choque produz um impulso que excita ressonâncias no rolamento e na máquina. Estes impulsos irão ocorrer periodicamente com uma frequência que é determinada, unicamente, pela localização do defeito, sendo ele na pista externa, na pista interna ou no elemento girante. Estas frequências podem ser obtidas por meio da medição de vibração em rolamentos e, a partir da análise dos sinais medidos, pode-se concluir sobre onde está concentrado o defeito naquele elemento mecânico. O conhecimento da localização do defeito, por sua vez, auxilia a aplicação de técnicas de análise de causa raiz de falhas, visando a eliminação da reincidência de falhas pelas mesmas causas.

Segundo Tebchirani (2003) apud Meola (2005), tem-se verificado uma redução de até 40% no volume de troca de rolamentos com a adoção da manutenção preditiva. E ainda, por outro lado, garantindo-se a boa condição de funcionamento dos equipamentos industriais, é possível utilizar-se de toda a sua vida útil projetada. Por consequência, diminuiu-se o número de quebras, ou taxa de falhas, do equipamento. Por definição, a confiabilidade é a probabilidade de um equipamento funcionar. Se a taxa de falhas diminui, então, garante-se a confiabilidade do equipamento. Desta forma, pode-se dizer que o equipamento fica mais tempo disponível para a produção, daí o impacto da manutenção preditiva no regime de produção das plantas industriais.

Não é raro encontrar mais que uma falha em um único rolamento, visto que, normalmente, a existência de um defeito fará com que o equipamento não opere mais nas condições esperadas e surjam outros defeitos como consequência. Assim, a identificação de falhas de rolamentos passa a ser uma tarefa mais complexa. Por isso, alguns métodos têm sido propostos com o objetivo de identificação da existência e da natureza de falhas em rolamentos.

Weidlich (2009), em seu trabalho, realizou um experimento com o objetivo de identificar a influência da quantidade de graxa lubrificante aplicada a rolamentos de mancais de motores elétricos. Nesta análise, foram medidos temperatura, vibração mecânica e ruído ultrassônico para os motores avaliados. O objetivo do trabalho supracitado era identificar uma forma assertiva e mais ágil para diagnóstico de defeitos em rolamentos de motores elétricos, visando economia de recursos.

Wang et al. (2017), em seu trabalho, propuseram um algoritmo de detecção de falhas em motorreductores baseados nos métodos de análise de ressonância e análise da *kurtosis*. Neste estudo, foram simulados sintomas vibroacústicos que seriam capazes, via os métodos citados, de precisar a localização de uma falha em um motorreductor, seja em seus elementos de transmissão de torque e redução, seja nos rolamentos. Os resultados obtidos nas simulações foram comparados aos obtidos nos testes experimentais realizados.

Wang et al. (2016) publicaram um compilado de casos onde foi aplicado o método da *kurtosis* em sinais de vibração para identificação e diagnóstico de falhas em máquinas rotativas como uma ferramenta importante para aplicação de manutenção baseada na condição do equipamento.

Ribeiro (2017) realizou um trabalho cujo objetivo era propor uma nova metodologia para detecção e diagnóstico de falhas mecânicas, mediante a análise de vibração em equipamentos rotativos, utilizando um mouse óptico laser como sensor de coleta de dados. A técnica, baseada na análise do domínio do tempo, foi implementada experimentalmente para a detecção de falhas mecânicas em motores elétricos. No trabalho, foi proposto o uso de equações estatísticas no contexto de reconhecimento de padrões para o diagnóstico de falhas mecânicas usando, como entrada, os sinais de vibração.

Loutas et al. (2011) combinaram informações sobre vibração, emissão acústica e nível de contaminação do lubrificante para propor um sistema de monitoramento capaz de informar, em tempo real, as condições de máquinas rotativas. Neste estudo, foram usados sinais medidos que, a partir da aplicação de técnicas específicas para análise de sinais, auxiliaram no diagnóstico das máquinas. As técnicas usadas foram a *Principal Component Analysis* (PCA), para reduzir o número de dados a serem tratados, e a *Independent*

Component Analysis (ICA), para identificar as componentes independentes relacionadas a cada um dos tipos de danos que as caixas de engrenagens apresentavam.

A Transformada de Hilbert-Huang (HHT) é um método de análise em tempo-frequência que foi proposto por Norden Huang e seus colaboradores formalmente em 1998 e, basicamente comporta duas etapas. A primeira etapa, chamada *Empirical Mode Decomposition* (EMD), permite obter um conjunto de funções base de forma adaptativa. A segunda etapa, denominada *Hilbert Spectral Analysis* (HSA), possibilita a obtenção de uma representação no domínio tempo-frequência através do cálculo da transformada de Hilbert para cada uma das funções obtidas na primeira parte. Segundo da Fonseca Pinto (2009), dadas as potencialidades da decomposição EMD, esta etapa é, por vezes, usada de forma autônoma, sem necessariamente recorrer à análise espectral, nestes casos.

Yang et al. (2013) realizaram um estudo onde, por meio da decomposição EMD de imagens térmicas de máquinas rotativas combinada à aplicação de uma técnica intitulada *Support Vector Machine* (SVM), propuseram um modelo capaz de identificar as falhas presentes na máquina analisada.

Zhao et al. (2016) propuseram um modelo baseado em um algoritmo de demodulação de sinais de vibração para identificação e diagnóstico de falhas em mancais de rolamentos sujeitos à condição de variação de rotação.

Segundo Colosimo e Giolo (2006), a análise de sobrevivência é uma das áreas da estatística que mais se desenvolveram nas últimas décadas, devido principalmente ao aprimoramento de técnicas estatísticas combinado com o avanço dos computadores. Pode-se dizer que esta análise engloba um conjunto de métodos e modelos, os quais são destinados à análise estatística de um tipo de dados que ocorrem quando, em um determinado grupo de indivíduos, é registrado o tempo decorrido de cada indivíduo, do instante inicial até a ocorrência de um evento de interesse (muitas vezes chamado de falha), que pode ser a morte do indivíduo, remissão do evento de interesse, tempo até a cura da doença. Na engenharia, o termo análise de sobrevivência é comumente substituído por análise de confiabilidade, e, em muitas vezes, o evento de interesse é a falha de componentes mecânicos ou eletrônicos. Mais detalhes podem ser encontrados em Nelson (2003) e Cook e Lawless (2007).

A distribuição Weibull recebe o nome do seu inventor, Waloddi Weibull, e, segundo Da Luz (2009), é usada extensivamente em engenharia da confiabilidade, análise de sobrevivência e em outras áreas devido a sua versatilidade e simplicidade de aplicação. Em função dos valores dos parâmetros calculados, a distribuição Weibull pode ser usada para modelar uma variedade de comportamentos que envolva vida. São analisados parâmetros

tais como função densidade de probabilidade das curvas dos dados obtidos, confiabilidade e taxa de falhas.

A aplicação da distribuição Weibull não se restringe à engenharia, mas também está presente nas áreas de saúde. A aplicabilidade da distribuição Weibull em dados reais foi investigada por Wahed et al. (2009) para modelar os dados de sobrevivência em um estudo sobre câncer de mama.

Gondim (2008), em seu trabalho, utilizou o método estatístico de Weibull para determinar o momento ideal da troca da ferramenta de corte no processo de torneamento, identificando uma ferramenta de manutenção preditiva.

Segundo Dirikolou et al (2002), a distribuição de Weibull é um modelo estatístico que se mostra adequado à análise de vibrações, pois é capaz de modelar os dados experimentais com diferentes características, indicando a vida útil da máquina e fazendo uma previsão adequada de falhas.

Tais pesquisas motivaram o presente trabalho, onde, por meio da aplicação de análise de sinais tempo-frequência e de manutenção preditiva, pretende-se monitorar em tempo real a vida útil de mancais de rolamentos para se definir uma curva de confiabilidade para os elementos mecânicos em questão.

1.2 Objetivos

Diante das informações expostas no item anterior, o presente trabalho tem os objetivos listados a seguir.

- Monitorar sinais de vibração em mancais de rolamentos;
- Calcular os sintomas vibroacústicos relacionados aos sinais de vibração mensurados por meio da utilização de ferramentas como HHT, análise cepstral e filtragem;
- Realizar um teste estatístico para verificar a aderência dos sintomas vibratórios calculados em relação à curva de Weibull para predição do tempo de falha dos rolamentos;
- Verificar, dentre os sintomas vibroacústicos calculados, qual ou quais deles podem ser usados para prever a vida útil dos mancais de rolamentos.

Para que os objetivos supracitados possam ser atingidos, serão realizadas avaliações experimentais e cálculos estatísticos, os quais serão descritos nos capítulos seguintes deste trabalho.

1.3 Organização da dissertação

O presente documento está organizado segundo os capítulos descritos na sequência.

- Capítulo I: É feita uma contextualização e são apresentados os objetivos do trabalho;
- Capítulo II: É apresentada uma revisão bibliográfica sobre as principais técnicas de manutenção aplicadas, detalhando os objetivos da manutenção preditiva e os possíveis ganhos que ela propicia. Além disso, é feita uma revisão sobre fundamentos de vibração de sistemas lineares, vibração de rolamentos e sensores para medição de vibração;
- Capítulo III: É apresentada uma fundamentação teórica baseada nos sintomas vibroacústicos que serão calculados durante o trabalho. E ainda, a fundamentação aborda a curva de Weibull e os testes usados para verificação da aderência da tendência dos sintomas ao ajuste pela distribuição de Weibull;
- Capítulo IV: É apresentado o detalhamento sobre a metodologia e os procedimentos experimentais adotados no trabalho;
- Capítulo V: São apresentados os resultados e as suas respectivas análises;
- Capítulo VI: São apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros;
- Anexo I;
- Apêndice I.

CAPÍTULO II

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Tipos de Manutenção

A manutenção busca possibilitar às organizações melhores resultados econômicos e técnicos. Por este motivo, os seus objetivos são norteados pelos conceitos de disponibilidade e confiabilidade. Assim, as ações recentes em manutenção buscam o aumento de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, bem como a redução ou otimização de custos por meio da aplicação de técnicas de manutenção que permitam maior capacidade de antecipação às falhas e, conseqüentemente, a redução de perdas nos processos produtivos.

A maneira pela qual é realizada a manutenção nos equipamentos e instalações determina o tipo de manutenção. Nos subitens seguintes, serão apresentados os principais tipos de manutenção definidos pela literatura.

2.1.1 Manutenção corretiva

Segundo Kardec e Nascif (2012), manutenção corretiva é a atuação para correção da falha ou do desempenho menor do que o esperado. Assim, esse tipo de manutenção é

realizado para corrigir ou restaurar as condições de funcionamento de um determinado equipamento ou instalação.

A manutenção corretiva normalmente é dividida em corretiva não planejada e corretiva planejada.

A manutenção corretiva não planejada, ou simplesmente, manutenção emergencial, é realizada após a ocorrência do fato, ou seja, a falha ou o desempenho menor que o esperado já ocorreram. Assim, a intervenção não pode ser programada. Esse tipo de manutenção implica custos altos, visto que podem ocorrer perdas de produção, perdas de qualidade, riscos à segurança e ao meio ambiente, e ainda, os custos indiretos de manutenção são elevados. Segundo Kardec e Nascif (2012), esse tipo de manutenção ainda é mais praticado do que deveria.

A manutenção corretiva planejada é a correção do desempenho menor do que o esperado antes de a falha ocorrer. Normalmente, esse tipo de manutenção é aplicado por decisão gerencial. Segundo Kardec e Nascif (2012), a decisão gerencial sobre a intervenção corretiva planejada ocorre em função dos parâmetros de condição do equipamento monitorados pela manutenção preditiva. Este tipo de manutenção traz como fatores positivos os pontos listados na sequência.

- As condições de segurança são maiores, visto que o risco de a falha afetar o pessoal ou a instalação é menor;
- É possível um planejamento melhor e mais eficaz;
- É possível programar a disponibilidade de sobressalentes, equipamentos e ferramentas para a intervenção;
- Pode-se planejar melhor a disponibilidade de recursos humanos especializados para a intervenção.

2.1.2 Manutenção preventiva

Segundo Kardec e Nascif (2012), manutenção preventiva é a realizada de forma a reduzir ou evitar falhas ou quedas no desempenho de um equipamento ou instalação, obedecendo um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo. A aplicação deste tipo de manutenção é imperativa em setores onde a segurança é fator determinante, como por exemplo, aviação, elevadores para pessoas, entre outros.

Um dos pontos mais críticos da manutenção preventiva é a definição da periodicidade de intervenção, visto que, nem sempre há informações precisas sobre o tempo de vida útil de determinado equipamento. Uma intervenção realizada

antecipadamente à falha ou queda no desempenho de um equipamento pode gerar aumento de custos, devido à intervenção desnecessária. Em contrapartida, uma intervenção tardia, somente após a quebra do equipamento, gera custos de parada de produção. Desta forma, Kardec e Nascif (2012) enunciam, em seu trabalho, que a periodicidade de intervenção deve ser definida baseando-se nas informações apresentadas a seguir.

- Informações fornecidas pelo fabricante do equipamento;
- Dados obtidos em plantas similares operando em condições também similares;
- Histórico da própria empresa;
- Dados presentes na literatura técnica pertinente.

2.1.3 Manutenção detectiva

Segundo Kardec e Nascif (2012), manutenção detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção, comando e controle, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção de uma planta. O objetivo é identificar possíveis causas e evitar falhas ou atuações indevidas destes sistemas, as quais só seriam notadas em caso de necessidade de acionamento dos mesmos.

2.1.4 Manutenção preditiva

Segundo Kardec e Nascif (2012), a manutenção preditiva, também conhecida como manutenção baseada na condição, é a atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento é realizado de forma sistemática. Através de técnicas preditivas, realiza-se o monitoramento da condição de um equipamento ou instalação e, se necessário, é programada uma intervenção corretiva planejada antes que a falha ocorra.

Um dos objetivos da manutenção preditiva é permitir a operação de um equipamento ou instalação pelo maior tempo possível, predizendo a sua condição a partir do acompanhamento de parâmetros técnicos diversos. Ainda segundo Kardec e Nascif (2012), a manutenção preditiva privilegia a disponibilidade visto que diminui o número de intervenções em equipamentos ou sistemas, pois as medições são efetuadas com o equipamento produzindo.

Segundo Gonçalves Neto et al. (2013), a manutenção preditiva compreende atividades que visam prever falhas, tais como o desgaste, a deterioração entre outras, por meio do monitoramento de máquinas.

Segundo Willians et al. (2012) apud Ribeiro (2017), a manutenção preditiva pode ser adaptada a um modelo não invasivo com a coleta de dados elétricos e eletromecânicos, indicando a condição atual de um equipamento.

Neste tipo de manutenção, decide-se pela intervenção no equipamento quando o grau de degradação se aproxima ou atinge um limite estabelecido. Desta forma, torna-se possível programar a intervenção, minimizando os impactos para a produção da empresa.

Kardec e Nascif (2012) enunciam que, para se adotar a manutenção preditiva, é necessário respeitar determinadas condições básicas, as quais são listadas a seguir.

- O equipamento, sistema ou instalação devem permitir a medição do parâmetro a ser monitorado;
- O equipamento, sistema ou instalação devem merecer este tipo de ação, em função dos custos envolvidos no monitoramento;
- As falhas devem ser originadas de causas que possam ser monitoradas e com possibilidade de acompanhamento da progressão das mesmas;
- Deve ser estabelecido um programa sistematizado de acompanhamento, análise dos dados medidos e diagnóstico de falhas.

Segundo Marçal (2000), os parâmetros a serem medidos na manutenção preditiva devem fornecer informações que permitam a inspeção de elementos específicos da máquina ou do tipo de falha. O parâmetro e a forma de monitoramento mais adequada são fatores relevantes e determinantes para que se tenham informações capazes de refletir a condição da máquina. Deve-se, ainda, especificar corretamente a instrumentação a ser usada, para que esta seja adequada à aplicação. Após a análise dos dados mensurados, deve-se obter conclusões sobre a natureza da falha e a sua característica de evolução. Um fator a ser considerado para maior eficácia do monitoramento é a construção de um histórico do equipamento ou instalação, o que permitirá obter informações sobre os modos de falha mais frequentes.

A Tab. 2.1 apresenta exemplos de parâmetros a serem medidos com as suas respectivas naturezas de falha ou defeito a serem detectadas.

Tabela 2.1 - Parâmetros a serem medidos na manutenção preditiva

Fonte: adaptado de Ya'Cubsohn (1983) apud Marçal (2000)

Parâmetro a ser monitorado	Principais naturezas de falha ou defeito a serem detectadas
Amplitude de deslocamento da vibração	Desbalanceamento de cargas, desalinhamento de eixos, folga excessiva, falta de rigidez, falhas no acoplamento, correias mal tensionadas ou gastas, eixos deformados, desajustes, turbulência
Amplitude de velocidade da vibração	Mancais ou engrenagens deterioradas
Amplitude de aceleração da vibração	Estado mecânico dos rolamentos, atrito excessivo entre componentes, falta de lubrificação, instabilidade do filme de lubrificante em mancais de deslizamento
Frequência da vibração	Dado complementar à medição de qualquer característica da vibração, indispensável na determinação de qualquer problema detectado. Para rolamentos, auxilia na determinação do local da falha
Fase da vibração	Desbalanceamento dinâmico, folga excessiva, partes frouxas ou soltas
Nível de ruído	Rolamentos ou engrenagens deterioradas, desgastes, cavitação, turbulência, aumento do atrito
Fugas ou vazamentos	Deterioração de selos, juntas ou gaxetas, perdas de pressão
Espessura	Corrosão ou erosão em tanques e tubulações, desgaste de elementos mecânicos
Temperatura	Lubrificação inadequada, engrenamento, aumento do atrito, sobrecarga, desalinhamento de mancais, produção excessiva de calor em componentes elétricos
Pressão	Danos em rotores, bloqueio de tubulações, válvulas travadas

A manutenção preditiva é adotada em situações onde se deseja diminuir os custos de manutenção por meio da eliminação de intervenções desnecessárias e também pela redução de perdas indesejadas de produção. O custo ainda é diminuído devido ao fato de que são realizadas menos intervenções na planta, impactando menos a produção. Opta-se pela manutenção preditiva também em casos onde se deseja manter o equipamento operando de modo seguro por mais tempo.

2.1.5 Engenharia de manutenção

Segundo Kardec e Nascif (2012), a engenharia de manutenção corresponde ao suporte técnico da manutenção que está dedicado a consolidar a rotina e implantar melhorias no processo de manutenção.

A engenharia de manutenção visa, principalmente, melhorar os resultados da manutenção por meio de ações, dentre as quais, podem-se destacar as listadas a seguir.

- Aumento de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade de equipamentos e instalações;
- Eliminação de problemas crônicos;
- Melhoria de capacitação das equipes;
- Definição de ferramentas eficazes para gestão de manutenção;
- Gestão de documentação técnica;
- Acompanhamento de indicadores;
- Definição do percentual de cada técnica de manutenção a ser aplicada em função da realidade da empresa, buscando o melhor desempenho.

2.1.6 Comparação dos tipos de manutenção

A manutenção é uma atividade estratégica nas empresas, visto que ela deve garantir a disponibilidade dos equipamentos e instalações com confiabilidade, segurança e custos adequados. Entender as vantagens de cada tipo de manutenção e aplicar corretamente o mais adequado é fator de otimização do lucro e dos resultados das empresas.

A Fig. 2.1 apresenta a comparação entre os custos de cada tipo de manutenção, em dólares (US\$), por unidade de potência HP (*Horse Power*) em plantas industriais. Estas informações foram obtidas por meio de um levantamento realizado em indústrias americanas e citado por Pinto (2004). Pela análise da informação apresentada nesta figura, verifica-se que a combinação de manutenção preditiva e manutenção corretiva planejada

possibilita o menor custo dentre os tipos comparados, visto que as perdas de produção por paradas indesejadas são reduzidas.

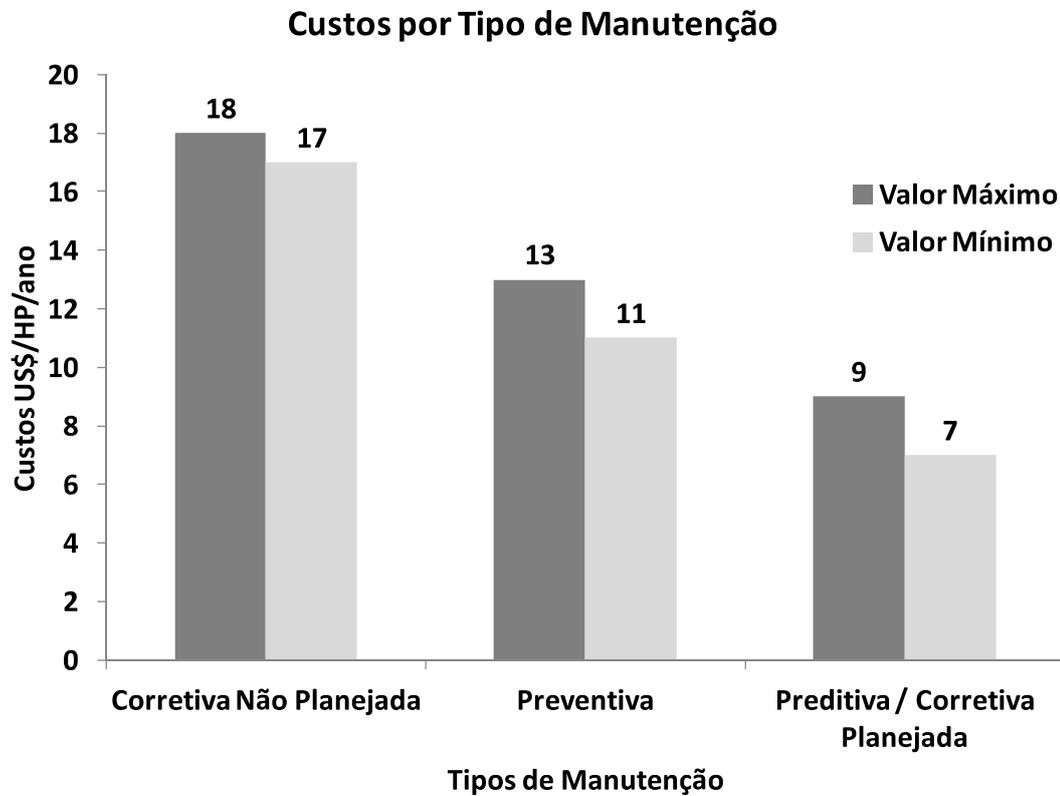


Figura 2.1 - Custos por cada tipo de manutenção em US\$ / HP / ano

Fonte: adaptado de Pinto (2004)

A Fig. 2.2 apresenta a comparação qualitativa entre os tipos de manutenção publicada por Kardec e Nascif (2012). Neste estudo, os autores apresentam que, à medida que se aproxima mais da aplicação da engenharia de manutenção, menor é o custo, devido à eliminação de problemas técnicos crônicos. E ainda, aumentam-se confiabilidade e disponibilidade, além da melhoria de fatores qualitativos não mensuráveis como qualidade de atendimento a chamados da produção, segurança na linha de produção para o pessoal de operação, atendimento aos requisitos de meio ambiente e motivação das equipes de manutenção.



Figura 2.2 - Análise qualitativa dos tipos de manutenção

Fonte: adaptado de Kardec e Nascif (2012)

2.2 Fundamentos de Vibração

Os equipamentos dinâmicos são de fundamental importância no cenário industrial. Nos mais diversos seguimentos industriais, a utilização de máquinas rotativas tais como bombas, compressores, turbinas, dentre outras, revela a necessidade de se conhecer de forma aprofundada os comportamentos desses equipamentos. Nesse contexto, ao longo das últimas décadas, muito tem se evoluído no sentido de compreender os fenômenos responsáveis pelo desempenho dinâmico dos sistemas rotativos. A análise dos modos de vibração tem se destacado como uma eficiente ferramenta no monitoramento dessas condições (De Jesus e Cavalcante, 2011).

É importante destacar a forma na qual a condição de vibração é quantificada em equipamentos rotativos. Segundo De Jesus e Cavalcante (2011), os movimentos oscilatórios de vibração podem ser expressos em função das grandezas deslocamento, velocidade e aceleração, sendo que cada uma delas tem diferentes utilidades na análise dinâmica de equipamentos.

As funções harmônicas são empregadas com frequência na análise de vibrações. A Eq. 2.1 representa a equação de deslocamento de um corpo sob movimento harmônico.

$$x = x_0 \sin(2\pi ft) = x_0 \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

Onde:

- f é a frequência do movimento harmônico;
- ω é a frequência angular correspondente;
- x_0 é a amplitude do deslocamento.

A velocidade \dot{x} e a aceleração \ddot{x} do corpo são definidas a partir da derivada primeira e derivada segunda do deslocamento, conforme apresentado nas Eq. 2.2 e 2.3.

$$\dot{x} = x_0(2\pi f) \cos(2\pi ft) = x_0 \omega \cos(\omega t) \quad (2.2)$$

$$\ddot{x} = -x_0(2\pi f)^2 \sin(2\pi ft) = -x_0 \omega^2 \sin(\omega t) \quad (2.3)$$

Os valores máximos absolutos de deslocamento, velocidade e aceleração de um corpo sob movimento vibratório harmônico ocorrem quando as funções trigonométricas apresentadas nas Eq. 2.1, 2.2 e 2.3 são iguais à unidade. Esses valores máximos absolutos são conhecidos, respectivamente, como amplitude de deslocamento, amplitude de velocidade e amplitude de aceleração, os quais são definidos matematicamente conforme apresentado nas Eq. 2.4, 2.5 e 2.6.

$$x = x_0 \quad (2.4)$$

$$\dot{x} = x_0(2\pi f) \quad (2.5)$$

$$\ddot{x} = x_0(2\pi f)^2 \quad (2.6)$$

Como descreve Ágoston (2014), as vibrações são fenômenos dinâmicos e estão presentes na vida diária. Segundo De Cavalcante e Jesus (2011), os movimentos oscilatórios de vibração se dão pelas grandezas como deslocamento, velocidade e aceleração, conforme representado na Fig. 2.3.

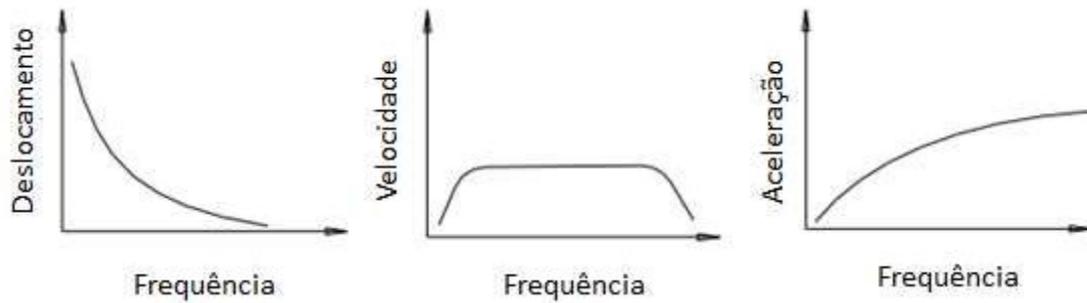


Figura 2.3 - Grandezas usadas para caracterização da vibração

Fonte: Universidade Estadual Paulista - UNESP(2010) apud Aranha (2017)

As grandezas apresentadas na Fig. 2.3 podem ser descritas como:

- Deslocamento: distância do afastamento da massa em relação a sua posição natural, em metros (m);
- Velocidade: taxa de variação temporal (derivada) do deslocamento da massa, definindo como a massa se movimenta, em metros por segundo (m/s);
- Aceleração: taxa de mudança (derivada) da velocidade da massa, em metros por segundo ao quadrado (m/s^2).

O sistema vibratório mais simples de ser analisado é apresentado na Fig. 2.4. Este sistema consiste em uma massa m , acoplada a uma mola k . A massa possui movimento translacional restrito na direção do eixo X , de modo que a sua mudança de posição de uma referência inicial é descrita por x . Por essa razão, o sistema é chamado de sistema de um grau de liberdade. Se a massa m for deslocada da sua posição de equilíbrio e então liberada para vibrar livre de forças externas, é dito que o sistema possui vibração livre. A vibração também pode ser forçada, ou seja, quando uma força atua de forma contínua sobre a massa m ou a base experimentam um movimento contínuo.

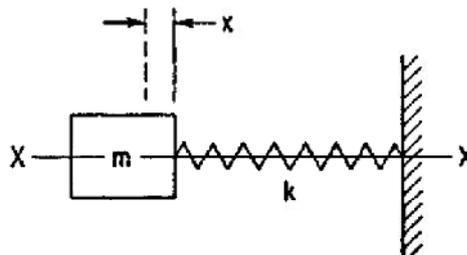


Figura 2.4 - Sistema de um grau de liberdade

Fonte: Harris (2002)

A análise da resposta dinâmica de estruturas mecânicas tem sido alvo de investigação de muitos pesquisadores. Segundo Oliveira (1999), dentre os principais objetivos de tal esforço, destaca-se a caracterização das frequências, modos próprios de vibrar e o estudo da resposta às diferentes excitações. A compreensão dessas características permite aos projetistas ou mantenedores alterarem, de forma consciente, certos parâmetros de um determinado projeto, tais como dimensões ou materiais, de modo a obter ou modificar condições específicas do comportamento de máquinas, motivadas pelos propósitos de redução do custo de fabricação, aumento da confiabilidade, disponibilidade e melhoria do desempenho.

Segundo De Jesus e Cavalcante (2011), sempre houve necessidade de a engenharia testar conceitos em escala reduzida nas mais diversas áreas, para produção e aperfeiçoamento do conhecimento. Nesse cenário, o uso de bancadas experimentais simulando a operação de sistemas reais tem se tornado um método amplamente conhecido e usado para o desenvolvimento de conceitos fundamentais, necessários para a elaboração de projetos de engenharia em geral. Assim, segundo Amorim (2008), a análise de vibrações ganha destaque como uma ferramenta fundamental na investigação e na produção de conhecimento sobre o comportamento de construções mecânicas.

A análise de vibração é um método utilizado para monitoramento da condição de máquinas e equipamentos, onde se faz uso de parâmetros relacionados a possíveis falhas. Desta forma, ela está inserida dentro do contexto da manutenção preditiva. Segundo Gongora et al. (2016), o procedimento para análise de vibração consiste em fixar sensores em pontos específicos do equipamento. Os sensores medem a vibração mecânica da máquina, possibilitando a leitura desta informação por um software específico ou algum equipamento que possua processador e permita a análise dos sinais de vibração medidos.

Segundo Gonçalves Neto et al. (2013), a análise de vibração consiste em identificar características do sinal vibratório que possam ser utilizadas para o conhecimento das características do sistema. O objetivo do sistema de diagnóstico de falhas do sinal de vibração em máquinas rotativas é, principalmente, estudar a regra de mudança de característica dinâmica.

Sequeira (2013), em sua publicação, enuncia que as vibrações originam-se após o desgaste de componentes do equipamento e esses desgastes acarretam uma alteração da distribuição da energia de vibração, podendo levar à parada de um equipamento ou até mesmo a sua destruição.

Segundo Fontoura (2006), a vibração excessiva pode ocorrer em razão da coincidência das frequências de excitação do sistema e das frequências naturais das

máquinas e peças estruturais. Portanto, por meio da análise de frequência, é possível descobrir a causa das vibrações indesejadas.

2.2.1 Quantificação de vibração de equipamentos rotativos

Segundo Rao (2009), qualquer movimento que se repete após um intervalo de tempo pode ser denominado vibração. Silva (2009) concorda com Rao ao afirmar que vibração é um movimento periódico, tal como a oscilação de uma partícula, de um sistema de partículas ou de um corpo rígido, em torno de uma posição de equilíbrio.

Na observação de um fenômeno vibratório, a informação sobre frequência depende do agente causador e do ambiente pelo qual se propaga o sinal. A observação de componentes de um sinal, sob o ponto de vista de amplitude e frequência, levará à identificação dos agentes causadores do fenômeno vibratório. Normalmente, a análise do conteúdo de frequências é realizada através de uma função matemática desenvolvida pelo físico e matemático francês Jean-Baptiste Fourier (1768-1830). A Transformada de Fourier aplicada a um sinal $x(t)$ que se desenvolve no tempo faz sua transposição para o domínio da frequência $X(\omega)$, conforme apresenta a Eq. 2.7.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.7)$$

Segundo Almeida e Góz (2003), existem diversas formas de quantificar o valor da vibração. Normalmente, as mais usadas levam em consideração as amplitudes das oscilações. Como por exemplo, citam-se: zero-a-pico e pico-a-pico. Em função do tempo, medem-se os sinais de vibração segundo os parâmetros valor médio e nível de energia de vibração: valor quadrático médio, também chamado de valor eficaz ou *Root Mean Square* (RMS). A Fig. 2.5 representa graficamente as formas de quantificação de vibração adotadas.

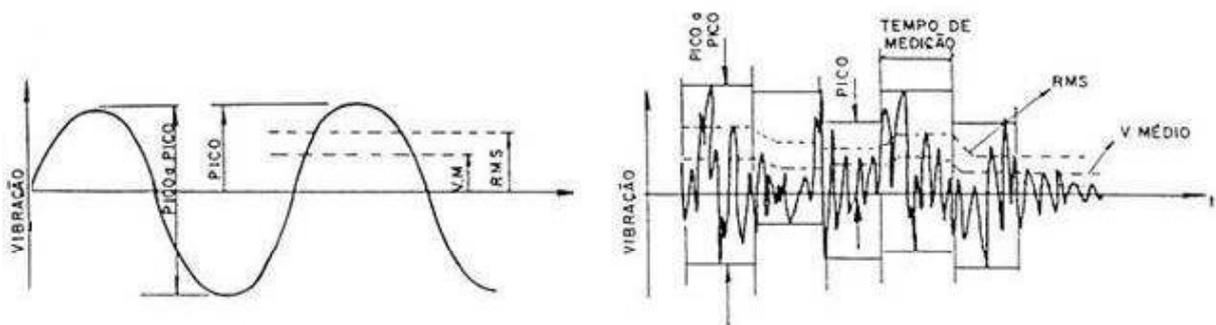


Figura 2.5 - Representação gráfica das formas de quantificação de vibração

Fonte: Almeida e Góz (2003)

2.2.2 Vibrações de rolamentos

Rolamentos correspondem a um dos elementos mecânicos mais usados nos equipamentos e instalações industriais, por isto, as falhas de rolamentos correspondem a uma das principais causas de paradas de máquinas. Apesar de várias empresas já adotarem a medição de sinais de vibração em seus equipamentos, o diagnóstico ainda não tem sido eficaz, visto que a análise dos sinais não tem possibilitado acuidade em relação à natureza das falhas.

Qualquer uma das partes de um rolamento (esferas, pistas, gaiolas etc.) pode apresentar algum tipo de desgaste ou defeito, o qual, com o tempo, pode vir a aumentar, levando à falha completa do componente e podendo, inclusive, gerar falhas de montagem maior nos equipamentos que fazem uso destes rolamentos. A Fig. 2.6 apresenta as partes constituintes de um rolamento de esferas sem blindagem e com gaiola de aço.

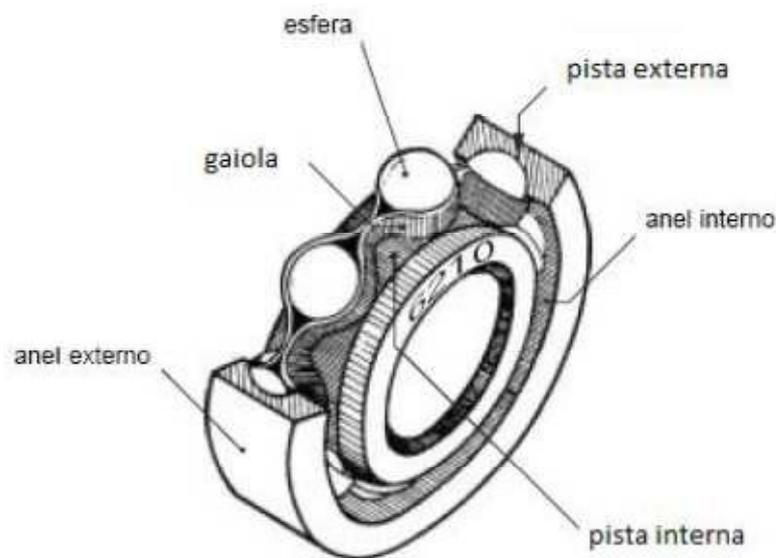


Figura 2.6 - Componentes presentes em um rolamento típico de esferas

Fonte: adaptado de Sobrinho (2009) apud Aleganzi (2012)

Segundo Aleganzi (2012), todo rolamento, antes da propagação da falha, apresenta uma variação na distribuição da sua energia vibratória. Normalmente, a consequência mais facilmente perceptível é o aumento do nível de vibrações. Para o caso de rolamentos, a Fig. 2.7 mostra qualitativamente a evolução de uma falha até o colapso.



Figura 2.7 - Etapas de deterioração de um rolamento

Fonte: Vescovi (2000) apud Alegranzi (2012)

A detecção de falhas via análise de vibrações é possível antes que o sistema apresente sinais que possibilitem a detecção por meio de outras técnicas, como aumento de emissões acústicas e de temperatura, por exemplo. Segundo Alegranzi (2012), isso ocorre porque a vibração é o sintoma que precede os outros acontecimentos como, por exemplo, o ruído, o qual necessita de um aumento considerável de energia para ser perceptível.

A Fig. 2.8 mostra sinais de aceleração típicos produzidos por falhas localizadas nos elementos rolantes de um rolamento, bem como o envelope produzido via análise dos sinais. A análise do envelope fornece mais informações sobre o diagnóstico do que a análise do sinal puro. O diagrama mostra que a falha nos elementos rolantes provoca choques nas pistas interna e externa do rolamento, o que excita frequências de ressonância em todo o rolamento. O mesmo ocorre caso a falha seja na gaiola do rolamento. A amplitude desta excitação depende de fatores como carregamento e tipo do rolamento.

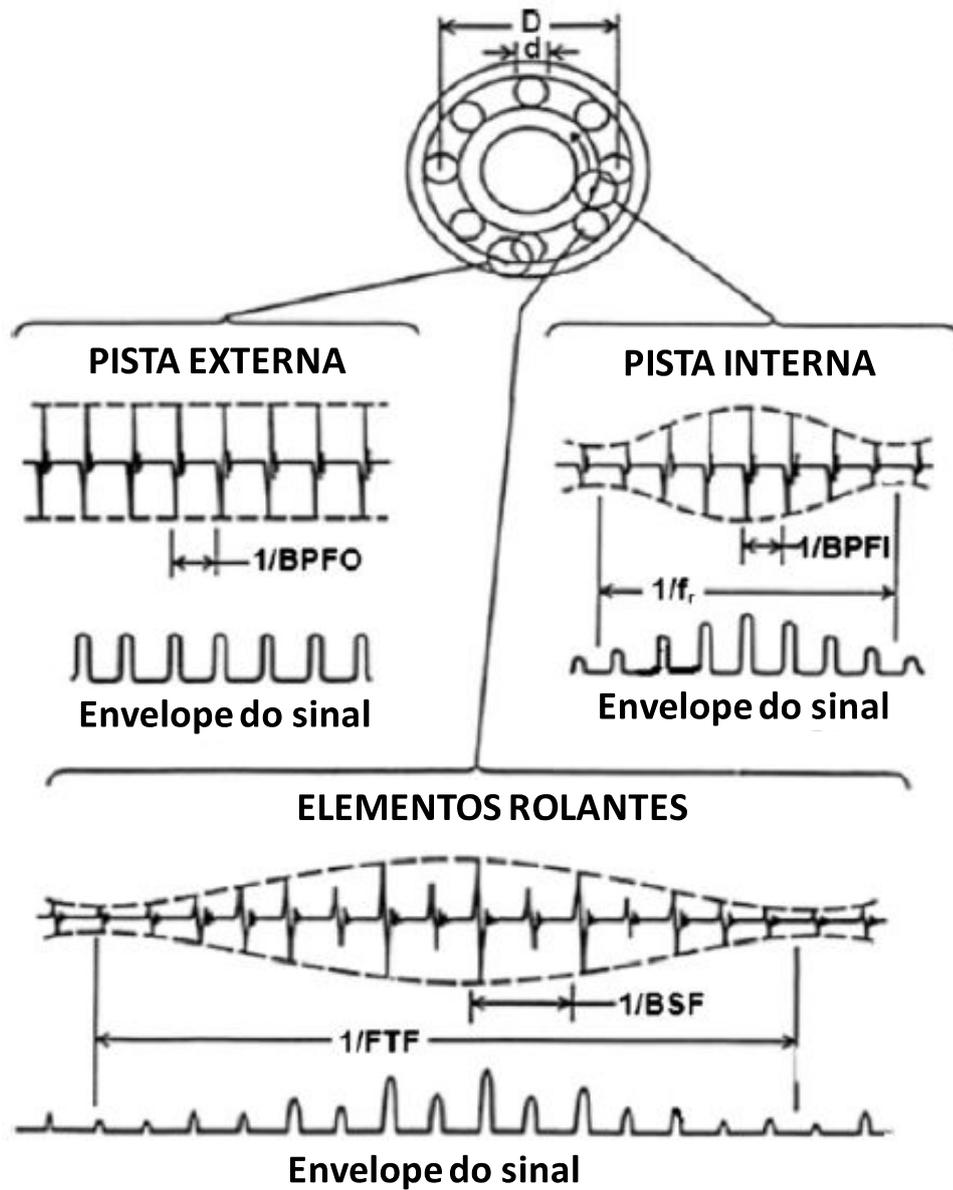


Figura 2.8 - Sinais de vibração típicos para falhas em rolamentos

Fonte: adaptado de Randall e Antoni (2011)

No caso ilustrado na Fig. 2.8, é considerada a aplicação de uma carga unidirecional, na direção vertical, na velocidade nominal de rotação do eixo. As várias frequências que caracterizam os tipos de falhas observadas no rolamento estão descritas nas equações apresentadas a seguir.

Ballpass frequency of the outer race (BPFO) é a frequência de passagem dos elementos rolantes por um defeito na pista externa:

$$BPFO = \frac{n_e f_s}{2} \left\{ 1 - \frac{d}{D} \cos \varphi \right\} \quad (2.8)$$

Ballpass frequency of the inner race (BPFI) é a frequência de passagem dos elementos rolantes por um defeito na pista externa:

$$BPFI = \frac{n_e f_s}{2} \left\{ 1 + \frac{d}{D} \cos \varphi \right\} \quad (2.9)$$

Ball roller spin frequency (BSF) é a frequência de giro dos elementos rolantes:

$$BSF = \frac{D}{2d} \left\{ 1 - \left(\frac{d}{D} \cos \varphi \right)^2 \right\} \quad (2.10)$$

Fundamental train frequency (FTF) é a frequência de giro da gaiola:

$$FTF = \frac{f_s}{2} \left\{ 1 - \frac{d}{D} \cos \varphi \right\} \quad (2.11)$$

Onde:

- f_s é a velocidade do eixo;
- n_e é o número de elementos rolantes do rolamento;
- φ é o ângulo entre a carga e o plano radial;
- D é o diâmetro do rolamento;
- d é o diâmetro do elemento rolante.

Como a frequência BSF é aquela na qual o elemento rolante atinge simultaneamente as duas pistas, interna e externa, do rolamento, em geral, verifica-se a presença de dois picos por período. E ainda, as harmônicas de BSF são frequentemente dominantes no espectro do sinal.

Nos envelopes apresentados na Fig. 2.8, é possível verificar que as curvas de amplitude não são perfeitas nas respectivas frequências. Isto se deve ao fato de que, em um funcionamento normal do sistema mecânico, podem ocorrer pequenas variações no ângulo φ , o que gera variações randômicas no valor das frequências calculadas. Por consequência, devido a essas variações nas frequências, frequentemente o sinal puro não pode ser usado sozinho para diagnóstico, sendo necessária a análise do envelope do sinal.

No geral, as falhas em rolamentos iniciam-se na forma de ranhuras ou estrias, que, devido ao movimento rotacional, geram sinais impulsivos de alta frequência. Falhas nas gaiolas do rolamento, geralmente plásticas, não geram sinais impulsivos de tão alta

frequência. No entanto, o envelope do sinal deve ser usado para analisar ambos os tipos de falhas.

A forma mais adequada para analisar e identificar uma falha em um rolamento depende basicamente do tipo de falha e se ela é localizada em um ponto ou distribuída ao longo do rolamento.

A Fig. 2.9 apresenta um exemplo de falha na pista interna localizada um ponto, a qual pode ser detectada via medição em função do período de trabalho do eixo, ou seja, o sinal de vibração no domínio do tempo sofrerá interferência somente quando a parte danificada da pista atingir a zona de carga do sistema. Desta forma, a análise somente do sinal no tempo não será suficiente para concluir sobre o tipo de falha que o rolamento apresenta.

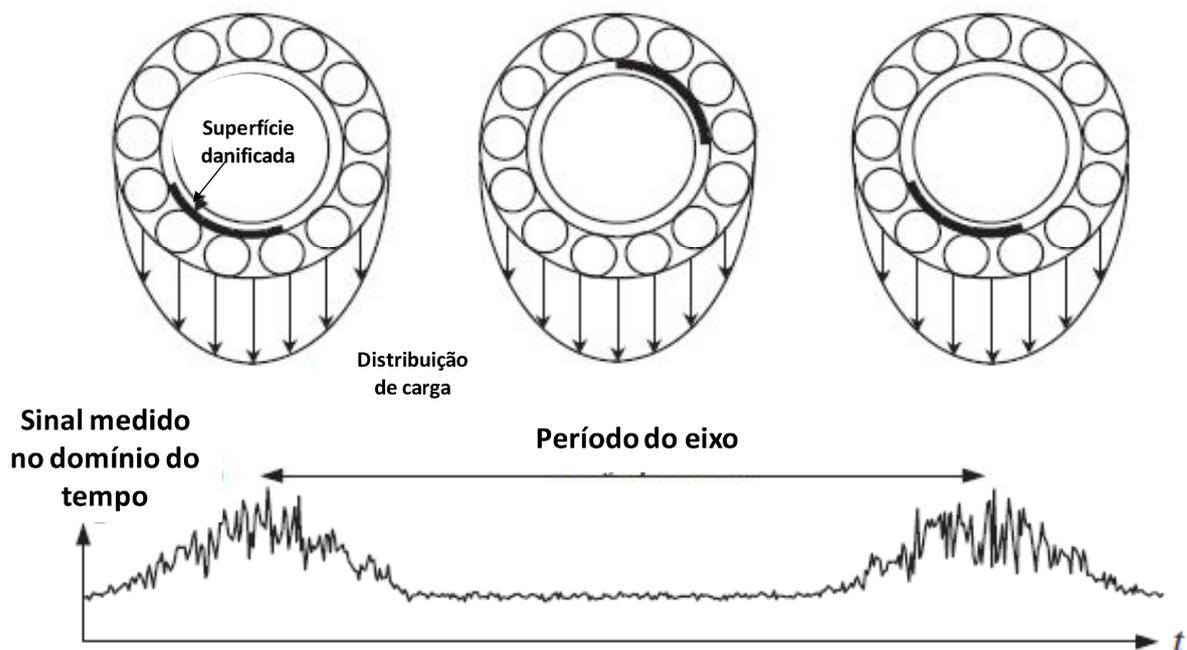


Figura 2.9 - Efeito de uma falha na pista interna do rolamento sobre o sinal no domínio do tempo

Fonte: adaptado de Randall e Antoni (2011)

2.2.3 Formas de medição de vibrações

O conhecimento a respeito da instrumentação a ser utilizada nas coletas de dados é fundamental para se fazer uso das ferramentas corretas exigidas nas medições. Na especificação dos instrumentos e dos processos de medição usados na análise de vibração, é fundamental saber quais as informações requeridas, onde e como obtê-las, como

condicioná-las convenientemente e também ter conhecimento sobre a melhor forma de apresentar os resultados e interpretá-los. Para uma aquisição que realmente ilustre a situação do equipamento estudado, é necessário utilizar sensores apropriados, resolução adequada dos espectros e escolher pontos de coleta realmente representativos do comportamento da máquina.

A medição de vibrações, conforme comentado anteriormente, é uma forma efetiva de se monitorar a condição de máquinas e identificar falhas já existentes em seu estado inicial. A efetividade dessa medição é devida ao fato de ser possível analisar de diversas formas os dados de vibração coletados. É possível realizar leituras de velocidade ou de aceleração, e verificar seu espectro ao longo de uma faixa grande de frequências.

Na prática, a medição de vibração torna-se necessária devido principalmente a três motivos, tais como a demanda crescente de maior produtividade e projetos econômicos que levam a maiores velocidades de operação das máquinas e uso eficiente dos materiais através de estruturas mais leves. Estas tendências geram a ocorrência de ressonâncias de forma mais frequente durante a operação das máquinas e reduzem a confiabilidade do sistema. Assim, a medição periódica dos parâmetros de vibração torna-se essencial para assegurar margens de segurança apropriadas (Trevisan, 2011).

Um sistema de medição de vibração é composto por alguns quesitos básicos. O movimento (ou força dinâmica) de um corpo vibrando é convertido em sinal elétrico por meio de um transdutor de vibração, também chamado *pick-up*. É conhecido como transdutor por transformar um sinal mecânico de vibração (deslocamento, velocidade, aceleração ou força) em um sinal elétrico (tensão ou corrente elétrica) (Sequeira, 2013).

Considerando-se que um sinal de saída (tensão ou corrente elétrica) de um transdutor é de baixa amplitude para ser gravado diretamente, faz-se necessária a utilização de um instrumento de conversão de sinal, o qual é capaz de amplificar o sinal para um valor requerido. A saída do instrumento de conversão de sinal pode ser mostrada em uma tela para inspeção visual ou gravada em um computador para uso posterior. Os dados podem então ser analisados para determinar as características de vibração desejadas da máquina ou equipamento. Em função da característica dos valores medidos, o instrumento de medição de vibração pode ser chamado de vibrômetro, medidor de velocidade, acelerômetro, medidor de fase ou medidor de frequência (Trevisan, 2011)

Os tipos de transdutores mais utilizados para medição de vibração são:

- de resistência variável: movimento mecânico gerado pela vibração produz uma alteração na resistência elétrica (de um reostato, *strain gage* ou semiconductor), que, por sua vez, causa uma alteração no nível de tensão ou

corrente elétrica da saída. A Fig. 2.10 apresenta um exemplo de transdutor de resistência variável para medição de vibração;

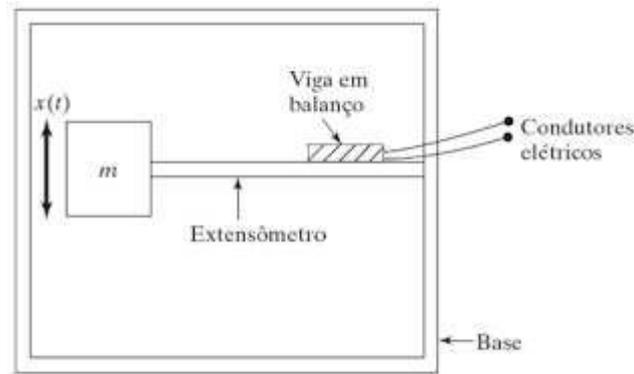


Figura 2.10 - Elastômetro para medição de vibração

Fonte: Rao (2009)

- piezoelétricos: materiais naturais ou fabricados, tais como quartzo, turmalina, sulfato de lítio e sal Rochelle geram carga elétrica quando sujeitos a uma deformação ou tensão mecânica. A carga elétrica desaparece quando a carga mecânica é removida. A Fig. 2.11 apresenta o exemplo de um transdutor piezoelétrico;

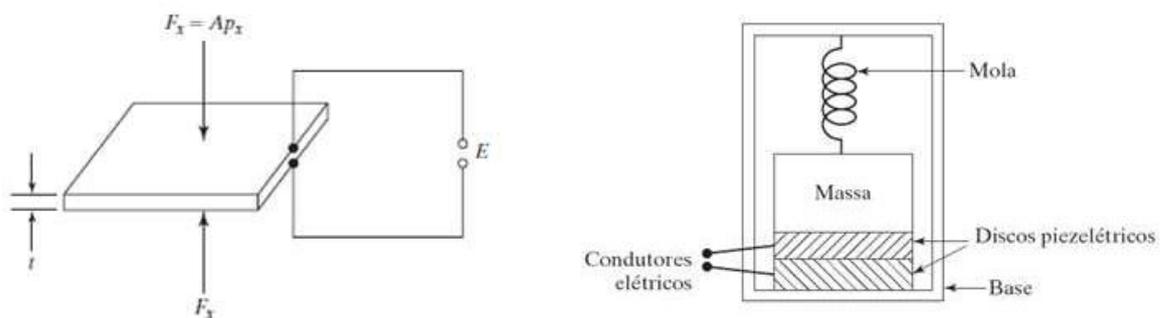


Figura 2.11 - Transdutor piezoelétrico

Fonte: Rao (2009)

- eletrodinâmicos: um condutor elétrico, em forma de bobina, move-se em um campo magnético fazendo com que uma determinada tensão elétrica seja gerada no condutor. Considerando que a tensão elétrica é proporcional à velocidade relativa da bobina, estes transdutores são frequentemente utilizados em *pick-ups* de velocidade, que podem ser classificados segundo duas categorias: vibrômetro (também chamado sismômetro, é um instrumento

que mede o deslocamento de um corpo em vibração) e acelerômetro (instrumento que mede a aceleração de um corpo em vibração).

Na análise dos sinais medidos, o objetivo é determinar a resposta de um sistema sob uma excitação conhecida. Geralmente, o tempo de resposta de um sistema não dá muitas informações adicionais. No entanto, a frequência de resposta mostrará uma ou mais frequências discretas, no entorno das quais a energia está concentrada. Desde que as características dinâmicas dos componentes individuais do sistema sejam conhecidas, pode-se relacionar os componentes das frequências distintas (da frequência de resposta) para os componentes específicos. A Fig. 2.12(a) apresenta um sinal de aceleração no domínio do tempo, sobre o qual não se pode concluir muito. A Fig. 2.12(b), por sua vez, apresenta o sinal sendo analisado no domínio da frequência, sobre o qual se pode concluir que a maior parte da energia está concentrada em torno de 25 Hz.

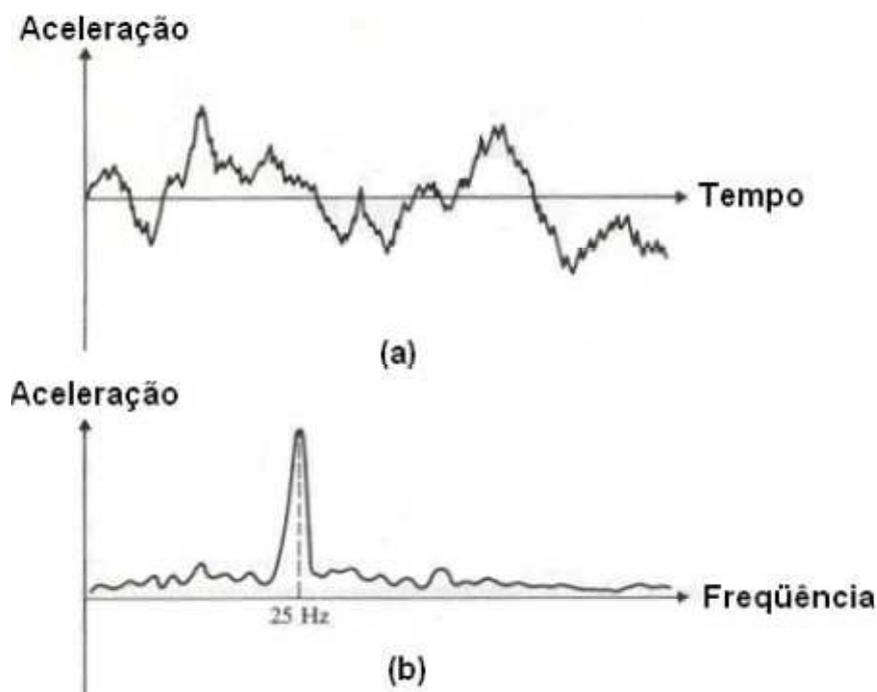


Figura 2.12 - Sinal de aceleração analisado: (a) no domínio do tempo; (b) no domínio da frequência

Fonte: Rao (2009)

CAPÍTULO III

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresentam-se, neste capítulo, os fundamentos teóricos utilizados para a realização desta dissertação. Primeiramente, apresentam-se os cálculos estatísticos utilizados na definição dos sintomas vibroacústicos. Apresenta-se também uma breve explicação sobre Curva de Weibull, que corresponde à ferramenta de previsão de tempo de falhas aplicadas, e os testes *Akaike Information Criterion (AIC)* e *Bayesian Information Criterion (BIC)*, utilizados para determinar a aderência dos sintomas calculados à curva de Weibull.

3.1. Definição dos sintomas vibroacústicos

3.1.1 Análise em bandas de frequência

Tomando-se um sinal no domínio da frequência, procede-se a sua análise em bandas definidas de frequência com o objetivo de se identificar regiões do espectro cuja amplitude seja mais significativa. Uma vez que o espectro é bem distinto, utiliza-se da análise de bandas com o objetivo de verificar a existência de problemas nas máquinas e equipamentos a partir das frequências identificadas.

3.1.2 Análise de harmônicos superiores do motor elétrico

A Eq. 3.1, apresentada por Brito et al. (2002), é utilizada para calcular os harmônicos superiores do motor elétrico, que podem ser transmitidos, via acoplamento mecânico, aos mancais de rolamentos analisados no trabalho.

$$FB_{af} = f_r \left[\frac{(nR_s \pm k_e)(1 - s)}{p \pm k_x} \right] \quad (3.1)$$

Onde:

- f_r é a frequência da rede elétrica, no caso do Brasil, 60 Hz;
- n é um número inteiro
- R_s é o número de ranhuras do rotor do motor;
- k_e é um número inteiro de baixa ordem, neste caso, variando de -3 a 3;
- s é o fator de escorregamento do motor de indução;
- p é o número de pares de polos do motor;
- k_x é um número inteiro par ou zero, neste caso, variando de -8 a 8.

Os valores de k_x e k_e foram obtidos do trabalho de Duarte (2013).

3.1.3 Sintoma no domínio do tempo: valor RMS

O valor RMS, ou valor médio quadrático, também chamado de valor eficaz, representa uma das mais importantes medidas de amplitude, pois considera tanto a cronologia da onda como também o valor de amplitude diretamente ligado à energia contida na onda. Assim, considera-se que o valor RMS está relacionado ao poder destrutivo da onda vibratória. O valor RMS pode ser calculado através da Eq. 3.2.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} \quad (3.2)$$

Onde:

- $X(t)$ é a função que define o sinal no domínio do tempo;
- T é o período.

3.1.4 Sintoma no domínio do tempo: *skewness*

Skewness, ou assimetria, é o grau de desvio, ou afastamento da simetria, de uma distribuição de dados. Se a curva de frequência de uma distribuição possui um prolongamento (cauda) mais longo à direita do que à esquerda em relação à ordenada máxima, diz-se que a distribuição é assimétrica à direita ou assimétrica positiva. Se ocorrer o inverso, diz-se que se trata de uma distribuição assimétrica à esquerda ou negativa. O coeficiente de assimetria é dado pela Eq. 3.3.

$$SK = \frac{M'_3}{(\sigma^2)^{1,5}} \quad (3.3)$$

Onde:

- M'_3 é o momento estatístico central de terceira ordem;
- σ é o desvio padrão da amostra.

A Fig. 3.1 apresenta os diferentes tipos de distribuições em relação à simetria.

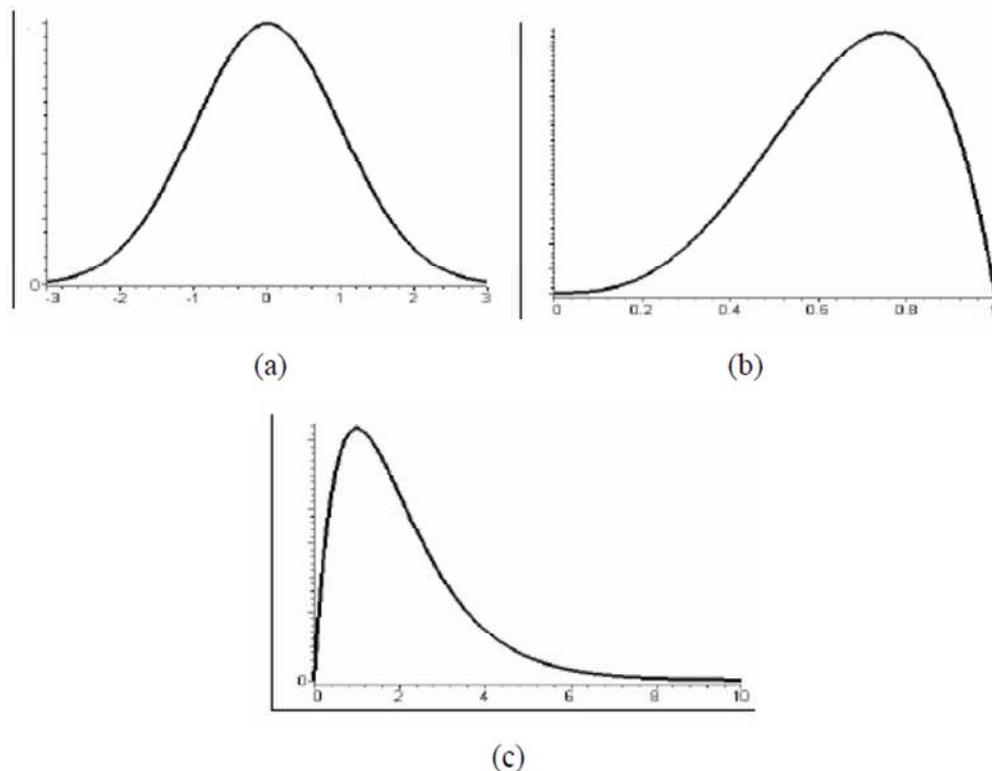


Figura 3.1 - Diferentes tipos de distribuições em relação à simetria: (a) simétrica; (b) assimétrica negativa; (c) assimétrica positiva

Fonte: Duarte (2013)

3.1.5 Sintoma no domínio do tempo: *kurtosis*

Kurtosis, ou curtose, é definida como sendo o grau de achatamento de uma distribuição de dados, considerado, usualmente, em relação à distribuição normal. Este grau de achatamento pode ser calculado utilizando a Eq. 3.4.

$$K = \frac{M'_4}{(\sigma^2)^2} \quad (3.4)$$

Onde:

- M'_4 é o momento estatístico central de quarta ordem.

A distribuição que possui um pico mais alto é chamada leptocúrtica, enquanto que a que possui o topo mais achatado é denominada platicúrtica. Já a distribuição normal, cuja forma é intermediária, é denominada mesocúrtica. A Fig. 3.2 apresenta os tipos de distribuição em relação à *kurtosis*.

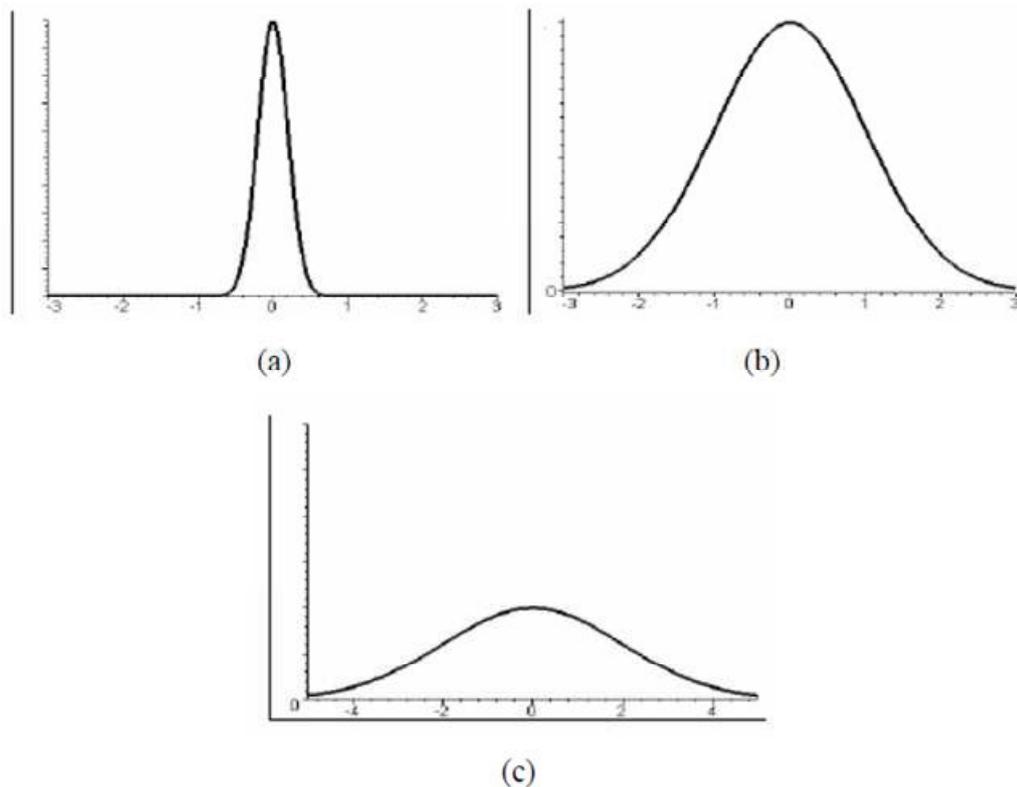


Figura 3.2 - Diferentes tipos de distribuições em relação à *kurtosis*: (a) leptocúrtica; (b) mesocúrtica; (c) platicúrtica

Fonte: Duarte (2013)

A *kurtosis* é bastante aplicada na detecção de falhas incipientes em rolamentos (Büchner, 2001). Muitos sinais aleatórios possuem um comportamento que descrevem com bastante aproximação a função distribuição de Gauss, ou distribuição Normal (Martin e Honarvar, 1984). Segundo esses referidos autores, as rugosidades superficiais de superfícies em boas condições também apresentam este tipo de comportamento, ou seja, a distribuição das alturas das irregularidades da superfície do material segue o padrão de distribuição definida pela função normal. A Fig. 3.3 ilustra o comportamento da curtose com a evolução do desgaste em mancais de rolamentos.

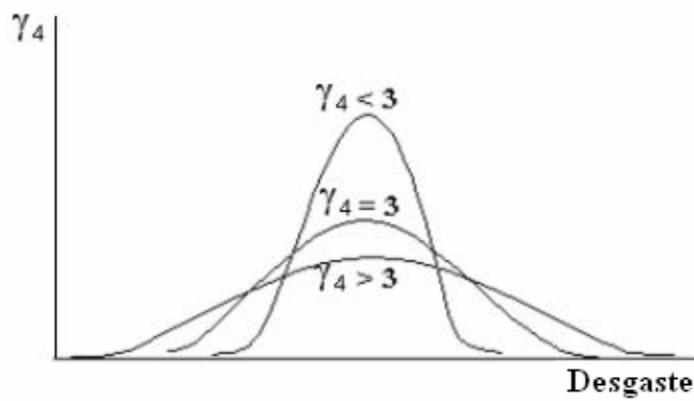


Figura 3.3 - Comportamento da curtose com a evolução do desgaste em mancais de rolamentos

Fonte: Meola (2005)

Um rolamentos em boas condições emite um sinal de vibração de natureza aleatória e seu comportamento tende à distribuição normal ($\gamma_4 \approx 3$). Com o aparecimento de uma falha pontual, o valor da *kurtosis* aumenta significativamente e, com a sua evolução, como no caso do fator de crista, o seu valor volta a diminuir (Bezerra apud Silva, 2004).

3.1.6 Sintoma no domínio do tempo: fator de crista

O Fator de Crista (FC) é um indicador de ocorrências fora da normalidade e, por este motivo, é comumente utilizado para detecção de falhas em rolamentos. A Eq. 3.5 apresenta como o FC é calculado.

$$FC = 10 \log_{10} \frac{\text{Valor PICO}}{\text{Valor RMS}} \quad (3.5)$$

O FC leva em consideração a variação do pico e do valor RMS, em que a relação entre ambos tem o comportamento mostrado na Fig. 3.5, com a evolução do desgaste de mancais de rolamento (Nepumoceno, 1989). Para um rolamento novo e sem defeito, a diferença entre o valor de pico e o nível RMS é de aproximadamente 3 dB. Com o surgimento de um defeito e seu aumento progressivo, esta diferença vai aumentando até atingir um valor de aproximadamente 18 dB, quando em função do desgaste generalizado do rolamento, a diferença entre os níveis começa a diminuir novamente. Estatisticamente, tem-se mostrado que quando esta diferença diminuir para 3 dB, o rolamento deverá ser trocado o mais rápido possível para evitar uma quebra imprevista. A Fig. 3.5 mostra esse comportamento, que corresponde à incursão do FC em função do desgaste do rolamento.

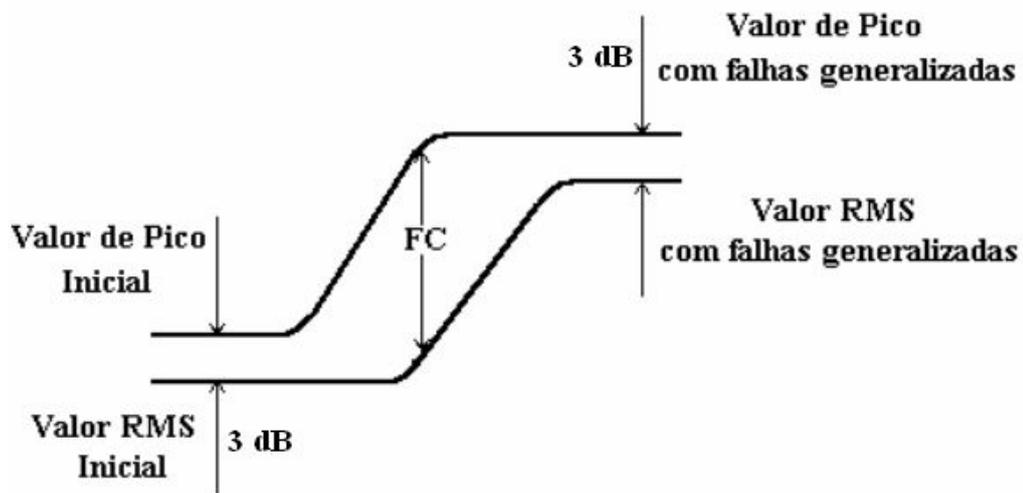


Figura 3.4 - Variação dos valores de pico e RMS em função do desgaste de mancais de rolamentos

Fonte: Meola (2005)

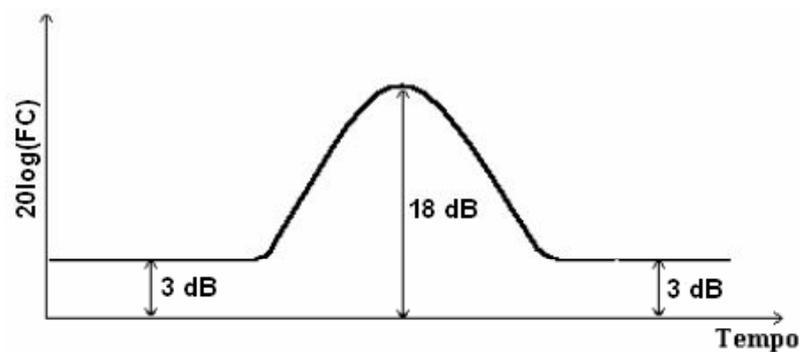


Figura 3.5 - Comportamento do FC em função do tempo

Fonte: Meola (2005)

3.1.7 Sintoma no domínio do tempo: cepstrum

O cepstrum de potência, dado pelo espectro de potência do logaritmo neperiano do espectro de potência do sinal, foi criado originalmente para solucionar o problema geral de deconvolução de dois ou mais sinais e permite que o período de repetição das bandas de modulação seja obtido. Uma definição desta técnica de análise de sinais é definida por Braun (1986) apud Duarte (2013) através da Eq. 3.6.

$$c(\tau) = \mathcal{F}^{-1}\{\ln|S(f)|^2\} \quad (3.6)$$

Onde:

- $c(\tau)$ é o cepstrum de potência do sinal;
- τ é o deslocamento no tempo;
- \mathcal{F} é o operador Transformada de Fourier;
- $|S(f)|^2$ é a função densidade espectral de potência do sinal $s(t)$.

Segundo Braun (1986) apud Duarte (2013), existem dificuldades na reconstrução do sinal original devido à perda de informações de fase contida em $c(\tau)$. O parâmetro τ é usualmente chamado quefrência, mas possui unidades de tempo que informam somente a periodicidade observada no espectro devido à escala logarítmica com ênfase na estrutura harmônica de $s(t)$. Um valor alto de quefrência representa um pequeno espaçamento entre as frequências repetitivas, enquanto um valor baixo de quefrência indica uma flutuação lenta do padrão de repetição, não possuindo relação com as frequências absolutas de $s(t)$. Estas características fazem do cepstrum uma ferramenta de apoio interessante à análise espectral, sendo particularmente útil em sinais que contêm atrasos de fase, ecos ou famílias de harmônicos equiespaçados.

3.1.8 Médias no domínio do tempo

O cálculo de médias no domínio do tempo, do termo em inglês *Time Domain Average* (TDA), consiste no cálculo da média de N segmentos de dados periódicos, conforme mostrado na Fig. 3.6.

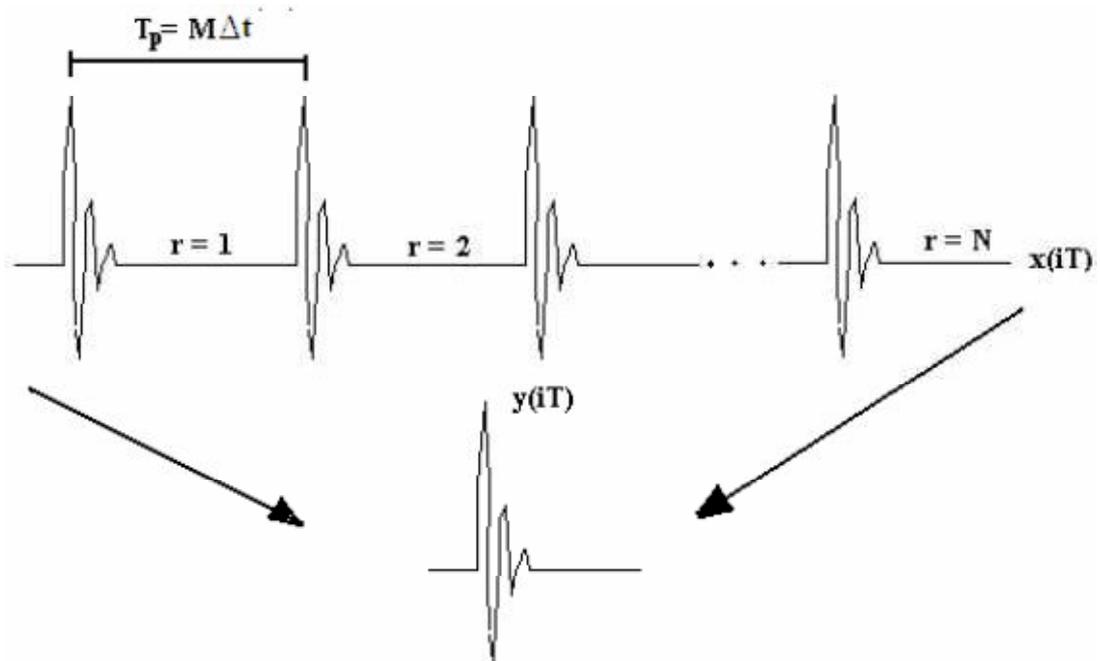


Figura 3.6 - Representação de médias no domínio do tempo

Fonte: Meola (2005)

O cálculo da TDA pode ser realizado conforme a Eq. 3.7.

$$y(iT) = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x(iT - rMT) \quad (3.7)$$

Onde:

- $y(iT)$ é o valor médio do sinal nos períodos analisados;
- $x(iT)$ é o sinal no domínio do tempo;
- N é o número de períodos analisados no cálculo da média;
- M é o número de pontos por período;
- T é o comprimento do período.

Basicamente, a TDA permite promover uma filtragem do tipo linear do sinal, além de proporcionar uma redução de dados, uma vez que somente um período do sinal é retido. Cunha Jr. e Duarte (2000) utilizaram a TDA com sucesso para a redução de dados num procedimento de identificação de falhas em câmbios automotivos.

3.1.9 Análise de ordem

A análise de ordem pode ser aplicada no estudo, projeto e monitoramento de máquinas rotativas. Através da medição e análise de sinais de vibração e ruído gerados, por exemplo, por um sistema composto de componentes rotativos, pode-se adquirir um melhor conhecimento do sistema, associar as características vibroacústicas aos aspectos físicos do sistema e identificar as características que mudam com o tempo e com as condições de operação (Meola, 2005).

A análise de ordem e a análise harmônica têm muito em comum. O termo harmônico refere-se às frequências múltiplas de uma frequência fundamental. Em muitas indústrias, os harmônicos relacionados com a velocidade de rotação das máquinas são tratados como ordens. O harmônico na mesma frequência da velocidade de rotação é definido como sendo de primeira ordem, o harmônico referente a duas vezes a frequência de rotação é definido como de segunda ordem, e assim sucessivamente. Assim, pode-se dizer que a análise de ordem é uma aplicação da análise harmônica para máquinas rotativas (Meola, 2005).

Alguns casos podem ser estudados através de análise de ordem, uma vez que determinadas falhas podem ser relacionados às ordens das componentes de maior relevância. Por exemplo, o desalinhamento ou empenamento de eixo gera uma grande componente de segunda ordem no espectro de frequências.

A técnica básica da análise de ordem envolve a obtenção instantânea da velocidade de rotação do eixo da máquina, adquirida utilizando um tacômetro ou *encoder*. Esta velocidade está relacionada com o sinal de vibração e ruído produzido pela máquina. A partir do sinal mensurado, obtêm-se informações sobre as componentes de ordem relacionadas a determinados defeitos.

3.1.10 Envelope

Um sinal dito modulado em fase é um sinal que contém informações de fase variantes no tempo. A Eq. 3.8 apresenta o exemplo da representação de um sinal com modulação de fase.

$$x(t) = A \sin[\Omega t + \varphi + \beta \sin(\omega t + \Phi)] \quad (3.8)$$

Onde:

- A é a amplitude do sinal;

- Ω é a frequência angular portadora;
- ω é a frequência angular moduladora;
- φ e Φ são ângulos de fase.

Assim, a demodulação de um sinal implica na reconstrução do sinal de maneira que o histórico temporal da variação de fase seja extraída do sinal original.

A Eq. 3.8 pode ser representada na forma complexa conforme apresentado na Eq. 3.9.

$$x(t) = Ae^{j[\Omega t + \varphi + \beta \sin(\omega t + \Phi)]} \quad (3.9)$$

As características de fase do sinal para qualquer instante de tempo podem ser obtidas observando-se o ângulo entre a parte real e imaginária do sinal complexo para o referido instante do tempo. Um sinal complexo que carrega as informações de fase é conhecido como sinal analítico.

Utilizando a fórmula de Euler, a qual está apresentada na Eq. 3.10, o sinal apresentado na Eq. 3.8 pode ser representado na sua forma analítica adicionando-se ao sinal original um sinal senoidal com a fase instantânea do original multiplicada pela unidade imaginária j .

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta \quad (3.10)$$

Em resumo, para se construir um sinal analítico, é necessário determinar uma função que transforme um cosseno em um seno. A função que faz isto é a Transformada de Hilbert, baseada nas relações apresentadas nas Eq. 3.11 e 3.12.

$$H[\sin(t)] = -\cos(t) \quad (3.11)$$

$$H[\cos(t)] = \sin(t) \quad (3.12)$$

Onde H é a Transformada de Hilbert do sinal.

Assim, um sinal analítico $z(t)$ pode ser representado, utilizando a Transformada de Hilbert, conforme apresentado na Eq. 3.13.

$$z(t) = x(t) + jH[x(t)] = x(t) + j\tilde{x}(t) \quad (3.13)$$

O sinal analítico $z(t)$ é composto por um sinal complexo, cuja parte imaginária é a Transformada de Hilbert da parte real. O sinal $z(t)$ pode ser definido conforme mostra a Eq. 3.14.

$$z(t) = 2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \hat{X}(f) e^{jft} df \quad (3.14)$$

Onde:

$$\hat{X}(f) = \begin{cases} 0, & \text{para } X(-f) \\ 2X(f), & \text{para } X(f) \end{cases} \quad (3.15)$$

Onde $X(f)$ representa o espectro de $x(t)$, conforme definido na Eq. 3.16.

$$X(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{jft} dt \quad (3.16)$$

Assim, a forma explícita de $z(t)$ em termos do sinal real $x(t)$ pode ser obtida como mostra na Eq. 3.17 (Cohen, 1995).

$$z(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(t') e^{jf(t-t')} dt' df \quad (3.17)$$

Onde:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{jft} df = \pi \delta(t) + \frac{j}{t} \quad (3.18)$$

Substituindo a Eq. 3.18 na Eq. 3.17, obtém-se a Eq. 3.19.

$$z(t) = x(t) + \frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(t')}{t-t'} dt' \quad (3.19)$$

Assim, a Transformada de Hilbert do sinal $x(t)$ é definida pela Eq. 3.20.

$$\tilde{x}(t) = H\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(t')}{\pi(t-t')} dt' \quad (3.20)$$

Onde $\tilde{x}(t)$ é a integral de convolução apresentada na Eq. 3.21.

$$\tilde{x}(t) = x(t) \otimes \left(\frac{1}{\pi t}\right) \quad (3.21)$$

Onde \otimes representa a integral de convolução.

O módulo do sinal analítico, que é uma ferramenta de deconvolução, é bastante utilizado para o monitoramento de mancais de rolamento, quer seja para a identificação do tipo de falha (Mancuzo, 1999), quer seja para a determinação de valores limites para sintoma (Pereira e Barbosa, 2004).

3.2. Curva de Weibull

A distribuição Weibull é uma distribuição probabilística específica usada extensivamente na análise de dados de vida. Esta distribuição é usada frequentemente em engenharia de confiabilidade, análise de sobrevivência, e em outras áreas devido a sua versatilidade e simplicidade.

É bastante utilizada para descrever o tempo de falha para produtos industrializados, pois é um tipo de distribuição com uma grande variabilidade de formas. Existem outras formas de parametrizar função de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull, mas a expressão mais geral é a da distribuição Weibull a dois parâmetros, dada pela Eq. 3.22.

$$f(t) = \frac{\delta(t - t_0)^{\delta-1}}{(\alpha - t_0)^\delta} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\alpha-t_0}\right)^\delta} \quad (3.22)$$

Para $t > t_0 > 0$, $\alpha > 0$ (vida característica) e $\delta > 0$ (parâmetro de forma).

Em 1951, a *The American Society of Mechanical Engineers* (ASME) publicou no *Jornal de Mecânica Aplicada* um artigo intitulado "Uma Função Estatística de Larga Aplicação", de autoria do engenheiro sueco Ernest Hjalmar Waloddi Weibull, referente ao estudo desenvolvido por ele, baseado em fórmulas semiempíricas, sobre a resistência de aços à tração aplicada em elos de correntes. Estas expressões semiempíricas foram desenvolvidas por Weibull, que em 1939 apresentou o modelo de planejamento estatístico sobre fadiga de material (Gondim, 2008). Neste estudo, Weibull procurava obter uma analogia entre os componentes cristalinos da estrutura do aço e os elos de uma corrente (Kardec e Nascif, 2012).

As equações mostraram-se adequadas para aplicação em leis de falhas em equipamentos sempre que o sistema for composto de vários componentes e a falha seja essencialmente devida à mais grave imperfeição, dentre um grande número de “imperfeições”, na qual a taxa de falhas não precisa ser constante. Desde então, a distribuição de Weibull foi eleita como uma das ferramentas para análise de confiabilidade. Esta análise corresponde a um método estatístico que correlaciona dados específicos de falha com uma distribuição em particular, podendo indicar se a falha é um evento prematuro (falha de partida), aleatório (vida útil) ou ocasionada por desgaste (final de vida) (Gondim, 2008).

Neste contexto, a representação via distribuição de Weibull permite:

- representar falhas típicas de partida (ditas mortalidade infantil), falhas aleatórias e falhas devido ao desgaste;
- obter parâmetros significativos da configuração das falhas;
- uma representação gráfica simples dos dados analisados.

Para aplicação desta distribuição, há uma condição fundamental: dispor de um histórico de manutenção confiável e representativo, do ponto de vista do número de dados disponíveis.

A probabilidade de falha $F(x)$ de um determinado componente mecânico, submetido a uma certa carga, é dada pela Eq. 3.23.

$$F(x) = 1 - e^{-\Phi(x)} \quad (3.23)$$

A Fig. 3.7 apresenta o valor de $F(x)$ em função da carga x .

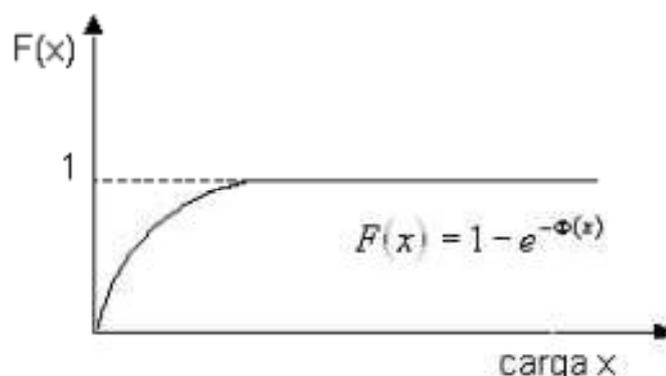


Figura 3.7 - Probabilidade de falha $F(x)$ de um determinado elemento mecânico, em função da carga aplicada x

Fonte: Gondim (2008)

Sendo $F(x)$ a probabilidade de falha do componente, a probabilidade de sobrevivência $P(x)$ deste mesmo componente, quando submetido à carga x , é dada pela Eq. 3.24.

$$P(x) = 1 - F(x) = e^{-\Phi(x)} \quad (3.24)$$

Considerando o caso estudado por Weibull inicialmente, a probabilidade de sobrevivência de uma corrente composta de n elos é mostrada pela Eq. 3.25.

$$P_n(x) = (e^{-\Phi(x)})^n = e^{-n\Phi(x)} \quad (3.25)$$

Weibull determinou $\Phi(x)$ de forma que $F(x)$ fosse sempre crescente com x e fosse ainda nula com uma carga inicial x_0 e adimensional por ser um expoente.

$$\Phi(x) = \left(\frac{x - x_0}{\eta}\right)^\beta \quad (3.26)$$

Onde:

- x_0 representa a carga inicial;
- η representa a carga característica;
- β representa o fator de forma da curva.

Para aplicação na manutenção, a Eq. 3.26 deve ser adequada substituindo-se a carga (x) por tempo (t). Assim, a equação de Weibull para cálculos da probabilidade de falha é dada pela Eq. 3.27.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.27)$$

As principais expressões matemáticas na análise de Weibull estão apresentadas nas Eq. 3.28 a 3.34.

$$f(t) = \beta\eta^{-\beta}(t - t_0)e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.28)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.29)$$

$$P(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.30)$$

$$Z(t) = \left(\frac{\beta}{\eta^\beta}\right) (t - t_0)^{\beta-1} \quad (3.31)$$

$$MTBF = t_0 + \eta\Gamma(1 + \beta^{-1}) \quad (3.32)$$

$$\sigma = \eta\sqrt{\Gamma(1 + 2\beta^{-1}) - \Gamma^2(1 + \beta^{-1})} \quad (3.33)$$

$$E(t) = \frac{1}{\eta}\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (3.34)$$

Onde:

- $f(t)$ é a probabilidade de um item falhar em um determinado intervalo de tempo t ;
- $R(t)$ é a confiabilidade;
- $Z(t)$ é a taxa de falhas;
- $MTBF$ é o *Mean Time Between Failure*, ou traduzindo, é o tempo médio entre falhas;
- σ é o desvio padrão;
- $E(t)$ é a esperança matemática;
- t_0 é a vida mínima, definida como o intervalo de tempo onde o equipamento não apresenta falhas;
- η é a vida característica, definida como o intervalo de tempo entre t_0 e t no qual ocorrem 63,2 % das falhas;
- β é o fator de forma: indica a forma da curva e a características das falhas.

Quando:

- a. $\beta < 1$ indica falhas de partida;
- b. $\beta = 1$ indica falhas aleatórias;
- c. $\beta > 1$ indica falhas por desgaste.

Monchy (1987) indica que, para valores de β entre 1,5 e 2,5, tem-se falhas por fadiga; entre 3 e 4, falhas por desgaste, corrosão ou porque o material ultrapassou o patamar de deformação plástica. Quando β tende a infinito, todas as falhas ocorrerão em um

intervalo de tempo que tende a zero, ou seja, num dado instante de tempo, todos os equipamentos estarão funcionando e, no instante seguinte, todos poderão falhar.

A Fig. 3.8 mostra o diagrama de decisão com base no fator forma de Weibull, indicando como proceder a partir de um determinado valor encontrado.

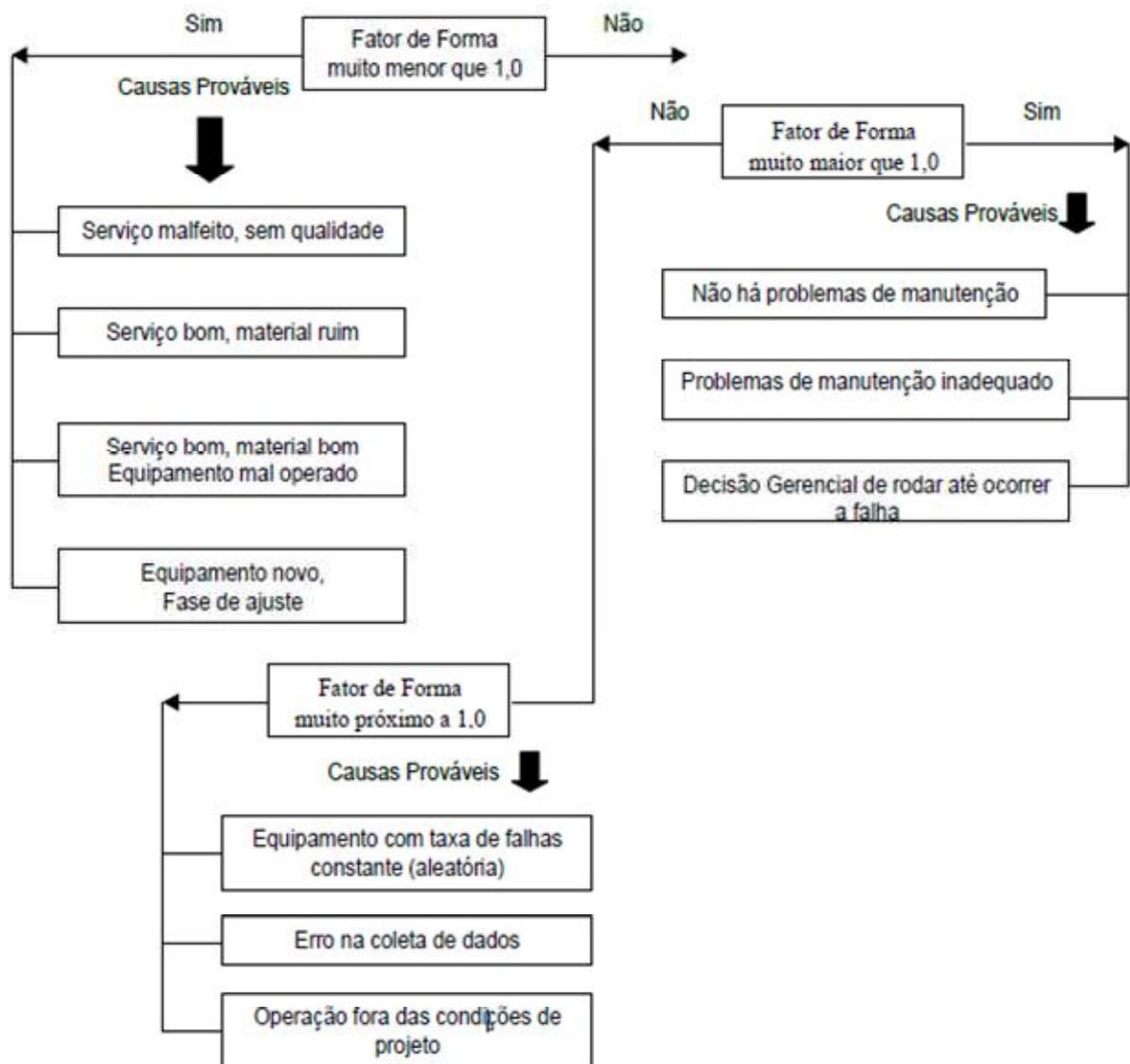


Figura 3.8 - Diagrama de decisão da distribuição de Weibull em relação ao fator forma

Fonte: Gondim (2008)

Uma particularidade interessante pode ser observada alterando-se o valor de β , pois, nessas situações, a função densidade de probabilidade de Weibull toma formas de outras distribuições. Em função de β , a distribuição de Weibull pode ser igual ou se aproximar de outras distribuições, como mostra a Fig. 3.9.

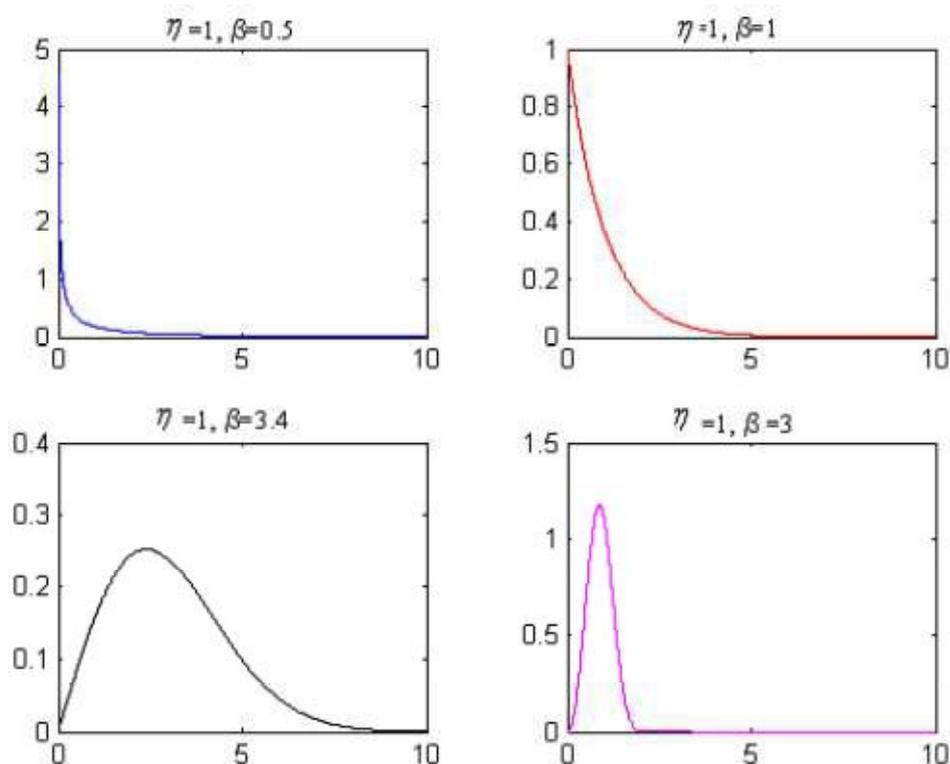


Figura 3.9 - Exemplos de variação do valor de β

Fonte: Gondim (2008)

Segundo Ross (1987), quando:

- $\eta = 1$ e $\beta = 0,5$: Weibull se aproxima da distribuição exponencial;
- $\eta = 1$ e $\beta = 1$: Weibull é idêntica à distribuição exponencial;
- $\eta = 1$ e $\beta = 3,4$: Weibull se aproxima da distribuição normal;
- $\eta = 1$ e $\beta = 3$: Weibull se aproxima da distribuição Rayleigh.

3.3. Testes de Significância

A escolha do modelo apropriado, do ponto de vista estatístico, é um tópico extremamente importante na análise de dados (Bozdangan, 1987). Busca-se o modelo mais adequado, ou seja, o modelo que envolva o mínimo de parâmetros possíveis a serem estimados e que explique bem o comportamento da variável resposta. Nesta linha, diversos critérios para seleção de modelos são apresentados na literatura (ver Bozdogan, 1987; Wolfinger, 1993, Littel et. al, 2002).

Dentre os critérios para seleção de modelos, os critérios baseados no máximo da função de verossimilhança (MFV) são os mais utilizados, com maior ênfase o Teste da

Razão de Verossimilhança (TRV), o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério Bayesiano de Schwarz (BIC).

3.3.1 Teste AIC

O Critério de Informação de Akaike (AIC) admite a existência de um modelo real, porém desconhecido, mas que é capaz de descrever os dados. Em 1973, Akaike desenvolveu o teste AIC, que se origina da minimização da informação (ou distância) de Kullback-Leibler (K-L) como base para a seleção de modelos. A informação K-L corresponde a uma medida da distância entre o modelo verdadeiro e um modelo candidato. No entanto, este modelo verdadeiro quase sempre refere-se a uma abstração.

De fato, deseja-se obter um modelo adequado, capaz de representar satisfatoriamente o mecanismo que gerou os dados em questão. Por conseguinte, necessita-se de uma medida da distância entre um modelo adequado e os vários modelos candidatos, para ter evidências de um modelo que se destaque. Em determinadas situações, é possível conseguir dois ou mais modelos que se destacam. Akaike desenvolveu uma estimativa da informação K-L, baseada na Função de Log-Verossimilhança (FLV) em seu ponto máximo, acrescida de uma penalidade associada ao número de parâmetros do modelo. Entre os vários modelos candidatos, deve ser escolhido aquele que apresentar o menor valor de AIC (Dal Bello, 2010).

3.3.2 Teste BIC

O Critério Bayesiano de Schwarz (BIC) tem como pressuposto a existência de um modelo verdadeiro capaz de descrever a relação entre a variável dependente e as diversas variáveis explanatórias dos diversos modelos analisados. Assim, o critério é definido como a estatística que maximiza a probabilidade de se identificar o verdadeiro modelo dentre os avaliados. O modelo com menor BIC é considerado o de melhor ajuste (Bozdongan, 1983).

3.3.3 Comparação de AIC e BIC

Utilizando-se o AIC, admite-se que dentre os modelos avaliados, nenhum é considerado o que realmente descreve a relação entre a variável dependente e as variáveis explanatórias, ou o modelo verdadeiro, e então, tenta-se escolher o modelo que minimize a divergência (K-L). Com o BIC, está implícito que existe o modelo que descreve a relação

entre as variáveis envolvidas e o critério tenta maximizar a probabilidade de escolha do verdadeiro modelo.

Alguns *softwares* permitem o cálculo dos valores AIC e BIC de forma simplificada, apenas fornecendo o conjunto de dados a serem analisados já modelados. Uma vez determinados os valores de AIC e BIC para os modelos candidatos, o modelo considerado mais adequado é aquele que apresentar o menor valor de AIC e BIC.

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS

4.1 Bancada experimental

Para realização da parte experimental, foi montada uma bancada composta de componentes mecânicos (mancais de rolamentos, motor e acoplamento), sensores, uma placa de aquisição e um microcomputador com um software para aquisição e tratamento dos dados. A Fig. 4.1 representa o esquema da montagem experimental.

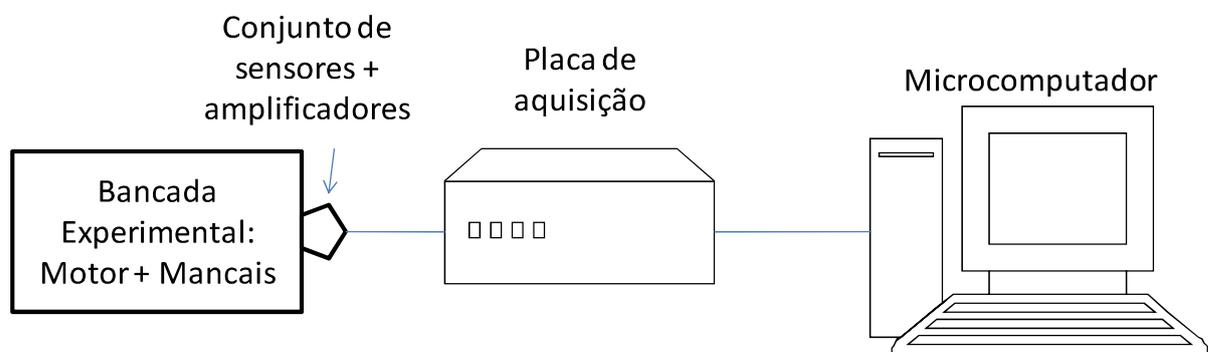


Figura 4.1 - Esquema da montagem experimental

Fonte: elaborado pela autora

A Fig. 4.2 apresenta a imagem da bancada utilizada para o estudo.



Figura 4.2 - Bancada experimental

Fonte: elaborado pela autora

A bancada é composta pelos seguintes itens:

- Um motor de indução do tipo rotor de gaiola de esquilo, fabricante WEG. A Fig. 4.3 apresenta a placa de identificação do motor elétrico utilizado;



Figura 4.3 - Placa de identificação do motor elétrico

Fonte: elaborado pela autora

- Um aparato mecânico composto de um acoplamento do tipo elástico, um eixo, cinco mancais de rolamentos e roldanas para aplicação de carga. Para facilitar a identificação, os rolamentos foram numerados, de 1 a 5. A Fig. 4.4 apresenta o detalhe do aparato mecânico utilizado. A Tab. 4.1 apresenta as especificações técnicas dos rolamentos utilizados;

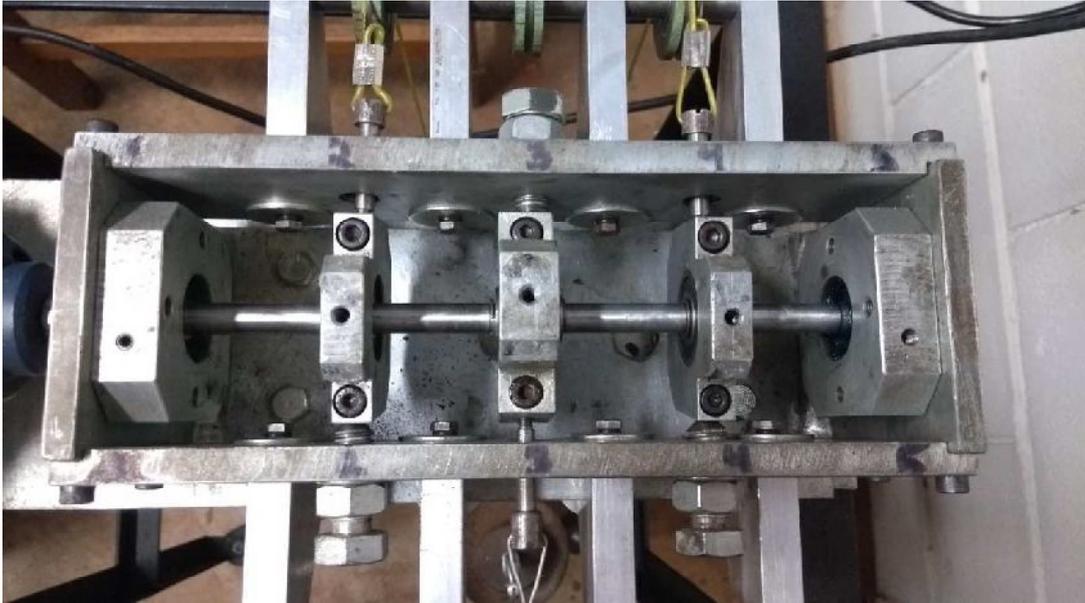


Figura 4.4 - Aparato mecânico da montagem experimental

Fonte: elaborado pela autora

Tabela 4.1 - Especificações técnicas dos rolamentos utilizados

Fonte: adaptado de GBR (2013)

Número do Rolamento na Montagem	Código do Rolamento	Características
1 e 5	1200	Rolamento axial autocompensador Carreira dupla de esferas Largura: 9 mm Furo do eixo: 10 mm Diâmetro externo: 30 mm C_{10} : 5,7 kN C_0 : 1,2 kN Limite de rotação 29500 rpm
2 e 4	6200	Rolamento de esferas Largura: 9 mm Furo do eixo: 10 mm Diâmetro externo: 30 mm C_{10} : 5,4 kN C_0 : 2,3 kN Limite de rotação: 36000 rpm Duas vedações em borracha sintética Folga: C3
3	6202	Rolamento de esferas Largura: 11 mm Furo do eixo: 15 mm Diâmetro externo: 35 mm C_{10} : 8 kN C_0 : 3,7 kN Limite de rotação: 28000 rpm Duas vedações em borracha sintética Folga: C3

- Uma base mecânica fabricada em metalon para suportar o motor e o aparato mecânico. Para garantir que o sistema fosse o mais imune possível a

interferências de vibrações externas, foram acrescentados amortecedores mecânicos de borracha na parte inferior da base mecânica;

- Dois acelerômetros piezoelétricos fabricados pela PCB Electronics. A Fig. 4.5 apresenta o modelo de acelerômetro utilizado. A Fig. 4.6, por sua vez, apresenta o cartão de calibração do sensor utilizado;



Figura 4.5 - Acelerômetro utilizado na bancada experimental

Fonte: PCB (2017)



Figura 4.6 - Cartão de calibração do acelerômetro utilizado

Fonte: elaborado pela autora

- Uma placa de aquisição modelo USB-9162, fabricante *National Instruments*. A Fig. 4.7 apresenta o modelo de placa de aquisição utilizada;



Figura 4.7 - Placa de aquisição utilizada

Fonte: elaborado pela autora

- Um programa de monitoramento em tempo real elaborado em linguagem C++ para aquisição e armazenamento dos dados coletados;
- Um *software* específico para análise estatística dos dados coletados. Foi utilizado o *software* livre R, versão x64 3.4.1. A Fig. 4.8 apresenta uma tela do *software* utilizado para análise dos dados;

Figura 4.8 - Imagem de uma das telas do *software* R

Fonte: elaborado pela autora

- Um microcomputador marca Dell, modelo Optiplex 7010, para executar o software.

4.2 Metodologia de coleta de dados

Os acelerômetros foram posicionados nos mancais a 90° e 45° em relação à referência, conforme mostra a Fig. 4.9.

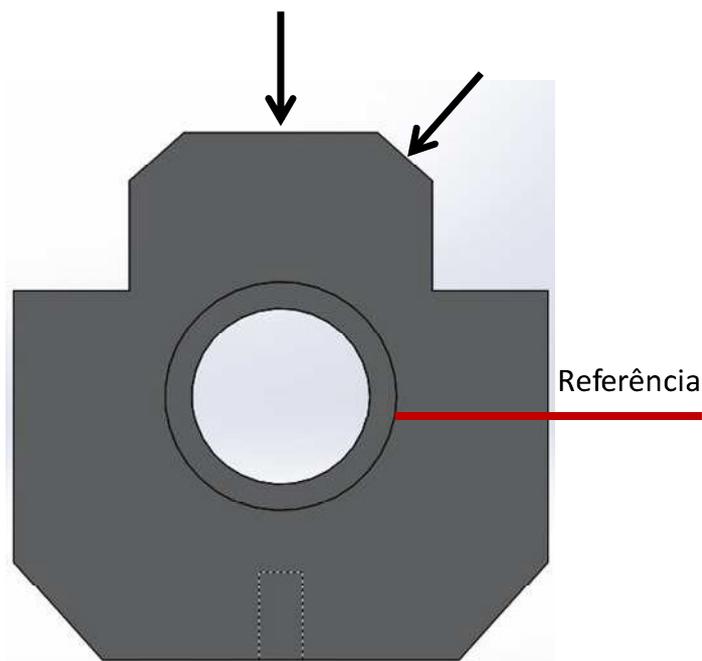


Figura 4.9 - Posicionamento dos acelerômetros nos mancais

Fonte: elaborado pela autora

Para simular uma situação o mais próxima da real possível, foram aplicadas cargas desbalanceadas nos rolamentos 2, 3 e 4. A Tab. 4.2 apresenta as cargas aplicadas nos rolamentos.

Tabela 4.2 - Cargas aplicadas nos rolamentos da bancada experimental

Fonte: elaborado pela autora

Rolamento	Carga (N)
2	195
3	154
4	49

Durante a realização dos experimentos, foram coletados os dados de vibração dos rolamentos 2, 3 e 4. O sistema mecânico foi acionado em ciclos temporais e, após a conclusão destes ciclos, foram coletados dados de vibração para os rolamentos.

A Tab. 4.3 apresenta o detalhe dos ciclos de operação e medição para os rolamentos.

Tabela 4.3 - Ciclo de operação e medição dos rolamentos

Fonte: elaborado pela autora

Tempo de Funcionamento	Rolamento Monitorado
26:20 h	3
05:04 h	2
04:01 h	4
06:50 h	3
02:10 h	2
02:37 h	3
02:08 h	4
01:37 h	2
07:09 h	3
02:27 h	4
02:43 h	3
01:55 h	4
04:36 h	2
03:18 h	3
11:15 h	3
15:07 h	4
03:16 h	3
00:55 h	2
04:40 h	3
01:02 h	4

Uma vez coletados os dados, são calculados os sintomas vibroacústicos que serão posteriormente analisados em comparação com a distribuição de Weibull.

Para facilitar a análise, os sintomas vibroacústicos calculados foram distribuídos em onze grupos.

O primeiro grupo corresponde aos sintomas vibroacústicos calculados no domínio do tempo para os sinais de aceleração medidos. A Tab. 4.4 lista os sintomas pertencentes a este grupo.

Tabela 4.4 - Sintomas vibroacústicos no domínio do tempo para sinais de aceleração

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Descrição
1	Nível RMS em função do desvio padrão (nível de sinal AC)
2	Skewness (assimetria)
3	Kurtosis (curtose)
4	Fator de Crista
5	$K_4 = 10 \log_{10}(RMS \cdot Kurtosis)$
6	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 100 Hz a 12.000 Hz
7	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 1.000 Hz a 12.000 Hz
8	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 1.500 Hz a 12.000 Hz
9	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 2.000 Hz a 12.000 Hz
10	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 100 Hz a 12.000 Hz
11	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 1.000 Hz a 12.000 Hz
12	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 1.500 Hz a 12.000 Hz
13	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 2.000 Hz a 12.000 Hz
14	Nível RMS em função da amplitude do sinal (nível do sinal DC)

O segundo grupo corresponde aos sintomas vibroacústicos calculados no domínio do tempo para os sinais de velocidade. Lembrando que, devido à relação matemática existente, para se obter os sinais de velocidade, deve-se integrar os sinais de aceleração medidos. A Tab. 4.5 lista os sintomas pertencentes a este grupo.

Tabela 4.5 - Sintomas vibroacústicos no domínio do tempo para sinais de velocidade

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Descrição
15	Nível RMS em função do desvio padrão (nível de sinal AC)
16	Skewness (assimetria)
17	Kurtosis (curtose)
18	Fator de Crista
19	$K_4 = 10 \log_{10}(RMS \cdot Kurtosis)$
20	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 100 Hz a 12.000 Hz
21	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 1.000 Hz a 12.000 Hz
22	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 1.500 Hz a 12.000 Hz
23	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 2.000 Hz a 12.000 Hz
24	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 100 Hz a 12.000 Hz
25	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 1.000 Hz a 12.000 Hz
26	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 1.500 Hz a 12.000 Hz
27	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 2.000 Hz a 12.000 Hz

O terceiro grupo corresponde aos sintomas vibroacústicos calculados via TDA dos sinais de aceleração. A Tab. 4.6 lista os sintomas pertencentes a este grupo.

Tabela 4.6 - Sintomas vibroacústicos via TDA dos sinais de aceleração

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Descrição
28	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 40 Hz
29	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 200 Hz
30	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 1.000 Hz
31	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 2.000 Hz
32	TDA filtrado na banda de 1.000 Hz a 4.000 Hz
33	TDA filtrado com filtro passa alta em 500 Hz
34	TDA filtrado com filtro passa alta em 1.000 Hz
35	TDA filtrado com filtro passa alta em 2.000 Hz
36	TDA filtrado com filtro passa alta em 3.000 Hz
37	TDA filtrado com filtro passa alta em 4.000 Hz
38	TDA filtrado com filtro passa alta em 5.000 Hz
39	TDA filtrado com filtro passa alta em 6.000 Hz
40	TDA filtrado com filtro passa alta em 7.000 Hz
41	Nível RMS do TDA global
42	Diferença entre o nível RMS do sinal global e o nível RMS do TDA global
43	Razão entre o nível RMS do sinal global e o nível RMS do TDA global
44	Nível RMS do sinal global

O quarto grupo corresponde aos sintomas vibroacústicos calculados via TDA dos sinais de velocidade. A Tab. 4.7 lista os sintomas pertencentes a este grupo.

Tabela 4.7 - Sintomas vibroacústicos via TDA dos sinais de velocidade

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Descrição
45	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 40 Hz
46	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 200 Hz
47	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 1.000 Hz
48	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 2.000 Hz
49	TDA filtrado na banda de 1.000 Hz a 4.000 Hz
50	TDA filtrado com filtro passa alta em 500 Hz
51	TDA filtrado com filtro passa alta em 1.000 Hz
52	TDA filtrado com filtro passa alta em 2.000 Hz
53	TDA filtrado com filtro passa alta em 3.000 Hz
54	TDA filtrado com filtro passa alta em 4.000 Hz
55	TDA filtrado com filtro passa alta em 5.000 Hz
56	TDA filtrado com filtro passa alta em 6.000 Hz
57	TDA filtrado com filtro passa alta em 7.000 Hz
58	Nível RMS do TDA global
59	Diferença entre o nível RMS do sinal global e o nível RMS do TDA global
60	Razão entre o nível RMS do sinal global e o nível RMS do TDA global

O quinto grupo corresponde aos sintomas vibroacústicos relacionados às bandas de oitava para os sinais de aceleração. A Tab. 4.8 lista os sintomas pertencentes a este grupo.

Tabela 4.8 - Sintomas vibroacústicos relacionados às bandas de oitava para sinais de aceleração

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Descrição
61	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 1º harmônico
62	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 2º harmônico
63	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 4º harmônico
64	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 8º harmônico
65	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 16º harmônico
66	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 32º harmônico
67	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 64º harmônico
68	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 128º harmônico
69	Nível RMS do sinal filtrado na banda entre a frequência fundamental e 8.100 Hz
70	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado a ½ de harmônico
71	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao ¼ de harmônico

O sexto grupo corresponde aos sintomas relacionados às bandas de oitava tendo como frequência fundamental a rotação do motor para os sinais de velocidade. A Tab. 4.9 lista os sintomas pertencentes a este grupo.

Tabela 4.9 - Sintomas vibroacústicos relacionados às bandas de oitava para sinais de velocidade

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Descrição
72	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 1º harmônico
73	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 2º harmônico
74	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 4º harmônico
75	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 8º harmônico
76	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 16º harmônico
77	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 32º harmônico
78	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 64º harmônico
79	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 128º harmônico
80	Nível RMS do sinal filtrado na banda entre a frequência fundamental e 8.100 Hz
81	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado a ½ de harmônico
82	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao ¼ de harmônico

O sétimo grupo corresponde aos sintomas relacionados aos harmônicos do motor elétrico. A Tab. 4.10 lista os sintomas pertencentes a este grupo.

Tabela 4.10 - Sintomas vibroacústicos relacionados aos harmônicos do motor elétrico

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Descrição
83	Primeiro conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator
84	Segundo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator
85	Terceiro conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator
86	Quarto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator
87	Quinto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator
88	Sexto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator
89	Sétimo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator
90	Oitavo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator
91	Primeiro conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor
92	Segundo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor
93	Terceiro conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor
94	Quarto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor
95	Quinto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor
96	Sexto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor
97	Sétimo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor
98	Oitavo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor

O oitavo grupo corresponde aos sintomas relacionados à análise do envelope do sinal. A Tab. 4.11 lista os sintomas pertencentes a este grupo.

Tabela 4.11 - Sintomas vibroacústicos relacionados à análise de envelope do sinal

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Descrição
99	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-baixa em 100 Hz
100	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-baixa em 100 Hz
101	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 1.000 Hz e 3.000 Hz
102	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 1.000 Hz e 3.000 Hz
103	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 2.000 Hz e 6.000 Hz
104	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 2.000 Hz e 6.000 Hz
105	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa alta em 2.000 Hz
106	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa alta em 2.000 Hz
107	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa alta em 4.000 Hz
108	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa alta em 4.000 Hz
109	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa alta em 6.000 Hz
110	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa alta em 6.000 Hz
111	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa alta em 8.000 Hz
112	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa alta em 8.000 Hz
113	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa alta em 10.000 Hz
114	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa alta em 10.000 Hz
115	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa alta em 12.000 Hz
116	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa alta em 12.000 Hz

O nono grupo corresponde aos sintomas calculados em função de regiões específicas do espectro de frequência. A Tab. 4.12 lista os sintomas pertencentes a este grupo.

Tabela 4.12 - Sintomas vibroacústicos calculados em função de regiões específicas do espectro de frequência

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Descrição
117	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 40 Hz
118	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 200 Hz
119	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 1.000 Hz
120	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 2.000 Hz
121	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-banda entre 1.000 e 4.000 Hz
122	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 500 Hz
123	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 1.000 Hz
124	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 2.000 Hz
125	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 3.000 Hz
126	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 4.000 Hz
127	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 5.000 Hz
128	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 6.000 Hz
129	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 7.000 Hz
130	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-banda entre 500 e 7.000 Hz

O décimo grupo corresponde aos sintomas calculados em função de regiões específicas do espectro de frequência utilizando sinais de velocidade. A Tab. 4.13 lista os sintomas pertencentes a este grupo.

Tabela 4.13 - Sintomas vibroacústicos calculados em função de regiões específicas do espectro de frequência utilizando sinais de velocidade

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Descrição
131	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 40 Hz
132	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 200 Hz
133	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 1.000 Hz
134	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 2.000 Hz
135	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-banda entre 1.000 e 4.000 Hz
136	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 500 Hz
137	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 1.000 Hz
138	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 2.000 Hz
139	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 3.000 Hz
140	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 4.000 Hz
141	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 5.000 Hz
142	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 6.000 Hz
143	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa alta em 7.000 Hz
144	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-banda entre 500 e 7.000 Hz

O décimo primeiro grupo corresponde aos sintomas relacionados com a análise em bandas de 1/3 de oitava entre 40 e 12.500 Hz. A Tab. 4.14 lista os sintomas pertencentes a este grupo.

Tabela 4.14 - Sintomas vibroacústicos relacionados com a análise em bandas de 1/3 de oitava entre 40 e 12.500 Hz

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Descrição
145	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 40 Hz
146	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 63 Hz
147	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 80 Hz
148	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 100 Hz
149	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 125 Hz
150	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 160 Hz
151	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 200 Hz
152	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 250 Hz
153	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 315 Hz
154	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 400 Hz
155	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 500 Hz
156	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 630 Hz
157	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 800 Hz
158	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 1.000 Hz
159	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 1.250 Hz
160	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 1.600 Hz
161	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 2.000 Hz
162	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 2.500 Hz
163	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 3.150 Hz
164	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 4.000 Hz
165	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 5.000 Hz
166	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 6.000 Hz
167	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 8.000 Hz
168	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 10.000 Hz
169	Filtro de 1/3 de oitava centrado em 12.000 Hz

Uma vez calculados os sintomas para os dados coletados, foi realizado o ajuste destes sintomas em relação à distribuição de Weibull para verificar qual(is) poderiam ser

representados pela curva desta distribuição. Para verificar a aderência destes sintomas à distribuição, foram aplicados os critérios de seleção AIC e BIC.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Sintomas no domínio do tempo

Em relação aos sintomas no domínio do tempo analisados, foi verificada a aderência de cada um dos sintomas à distribuição Weibull, segundo os valores de AIC e BIC obtidos.

Na Tab. 5.1 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos sintomas do primeiro grupo. Os resultados são apresentados por colunas para os três rolamentos analisados, considerando as duas posições de fixação dos acelerômetros.

A codificação adotada para apresentação dos resultados na Tab. 5.1, bem como nas subsequentes será descrita a seguir.

- **AIC**: resultado do teste AIC obtido para o sintoma calculado a partir dos sinais medidos no rolamento analisado;
- **BIC**: resultado do teste BIC obtido para o sintoma calculado a partir dos sinais medidos no rolamento analisado;
- **45° e 90°**: posições de instalação dos acelerômetros nos rolamentos;
- **W**: indica que, para aquele rolamento, o sintoma segue, ao longo do tempo, o comportamento da curva de Weibull;

- N: indica que, para aquele rolamento, o sintoma segue, ao longo do tempo, o comportamento da distribuição Normal.

Os valores numéricos obtidos para os critérios de seleção AIC e BIC estão descritos no Apêndice I.

Tabela 5.1 - Análise dos sintomas vibroacústicos no domínio do tempo para sinais de aceleração

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Sintoma	Rolamento 2				Rolamento 3				Rolamento 4			
		90°		45°		90°		45°		90°		45°	
		AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
1	Nível RMS em função do desvio padrão (nível de sinal AC)	W	W	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
2	Skewness (assimetria)	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
3	Kurtosis (curtose)	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
4	Fator de Crista	N	N	W	W	N	N	N	N	W	W	W	W
5	$K_4 = 10 \log_{10}(RMS \cdot Kurtosis)$	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
6	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 100 Hz a 12.000 Hz	W	W	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
7	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 1.000 Hz a 12.000 Hz	W	W	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
8	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 1.500 Hz a 12.000 Hz	W	W	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
9	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 2.000 Hz a 12.000 Hz	W	W	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
10	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 100 Hz a 12.000 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
11	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 1.000 Hz a 12.000 Hz	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N	W	W
12	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 1.500 Hz a 12.000 Hz	W	W	N	N	N	N	N	N	N	N	W	W
13	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 2.000 Hz a 12.000 Hz	W	W	N	N	N	N	N	N	N	N	W	W
14	Nível RMS em função da amplitude do sinal (nível do sinal DC)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Analisando-se os resultados apresentados na Tab. 5.1, verifica-se que, conforme os dados mensurados e avaliados, os sintomas de número 2, 3 e 5 podem ser representados pela distribuição de Weibull. E ainda, neste caso, os critérios AIC e BIC obtiveram desempenho semelhante como ferramenta para seleção da distribuição que melhor descrevia o comportamento dos sintomas.

A Fig. 5.1 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 2. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 90° no rolamento de número 3.

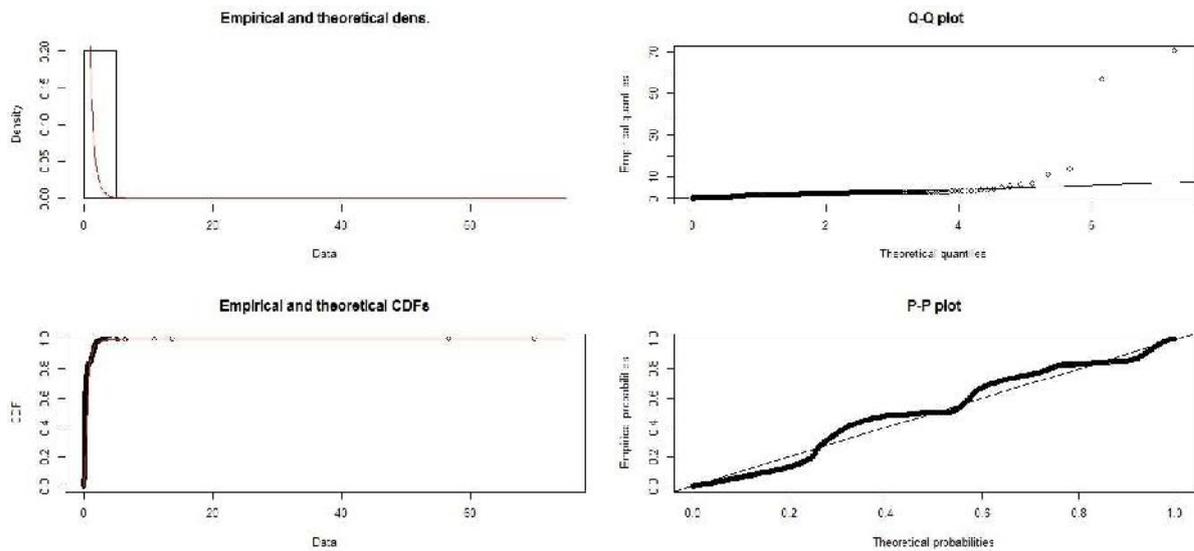


Figura 5.1 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 2

Fonte: elaborado pela autora

A Fig. 5.2 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 2. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 90° no rolamento de número 3.

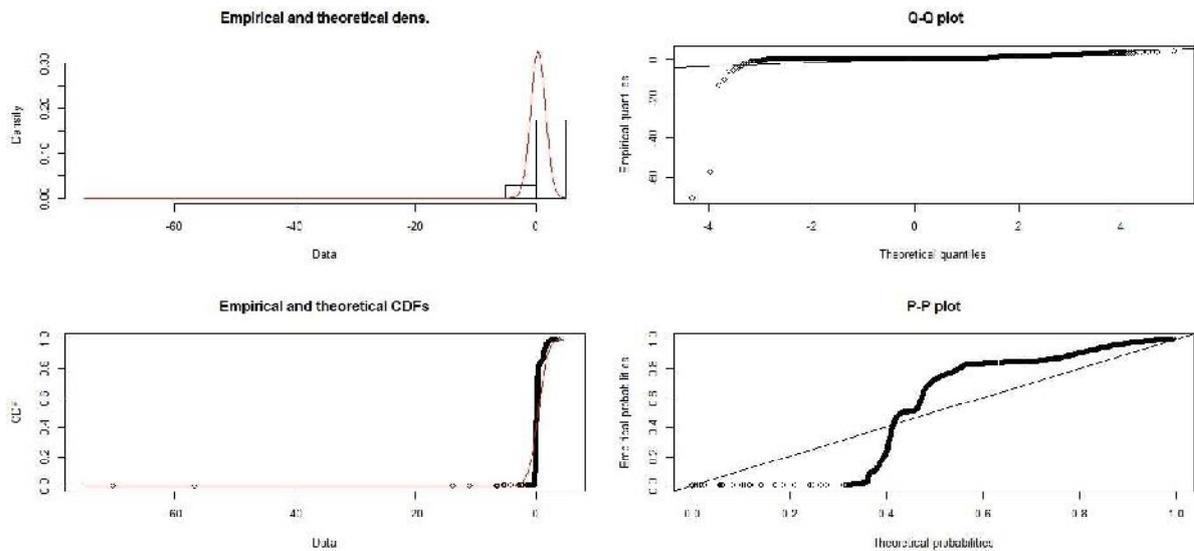


Figura 5.2 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 2

Fonte: elaborado pela autora

Observando as Fig. 5.1 e 5.2, verifica-se, no primeiro quadrante, as densidades de probabilidade empírica e teórica. A empírica corresponde aos dados reais, curva em preto. A teórica, por sua vez, corresponde ao modelo ajustado, curva em vermelho. Comparando as curvas obtidas para as Fig. 5.1 e 5.2, o melhor formato é aquele para a curva de Weibull, conforme verificado pelos critérios AIC e BIC. E ainda, analisando o segundo quadrante, os gráficos dos quartis, o ajuste pela distribuição normal apresentou o resultado menos satisfatório, uma vez que este ajuste apresentou mais divergência do real em relação ao teórico nas extremidades da curva ajustada.

Na Tab. 5.2 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos sintomas do segundo grupo. Os resultados são apresentados por colunas para os três rolamentos analisados, considerando as duas posições de fixação dos acelerômetros.

Tabela 5.2 - Análise dos sintomas vibroacústicos no domínio do tempo para sinais de velocidade

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Sintoma	Rolamento 2				Rolamento 3				Rolamento 4			
		90°		45°		90°		45°		90°		45°	
		AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
15	Nível RMS em função do desvio padrão (nível de sinal AC)	N	N	N	N	N	N	W	W	N	N	W	W
16	Skewness (assimetria)	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
17	Kurtosis (curtose)	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W	W	W
18	Fator de Crista	N	N	W	W	N	N	N	N	N	N	N	N
19	$K_4 = 10 \log_{10}(RMS \cdot Kurtosis)$	W	W	N	N	N	N	W	W	N	N	W	W
20	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 100 Hz a 12.000 Hz	W	W	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
21	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 1.000 Hz a 12.000 Hz	W	W	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
22	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 1.500 Hz a 12.000 Hz	W	W	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
23	Máximo do Cepstrum do sinal na faixa de 2.000 Hz a 12.000 Hz	W	W	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
24	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 100 Hz a 12.000 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
25	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 1.000 Hz a 12.000 Hz	W	W	N	N	W	W	W	W	N	N	W	W
26	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 1.500 Hz a 12.000 Hz	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N	W	W
27	Soma do Cepstrum do sinal na faixa de 2.000 Hz a 12.000 Hz	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N	W	W

Analisando-se os resultados apresentados na Tab. 5.2, verifica-se que, conforme os dados mensurados e avaliados, o sintoma de número 16 pode ser representado pela distribuição de Weibull. E ainda, neste caso, os critérios AIC e BIC obtiveram desempenho semelhante como ferramenta para seleção da distribuição que melhor descrevia o comportamento dos sintomas.

A Fig. 5.3 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 16. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 45° no rolamento de número 3.

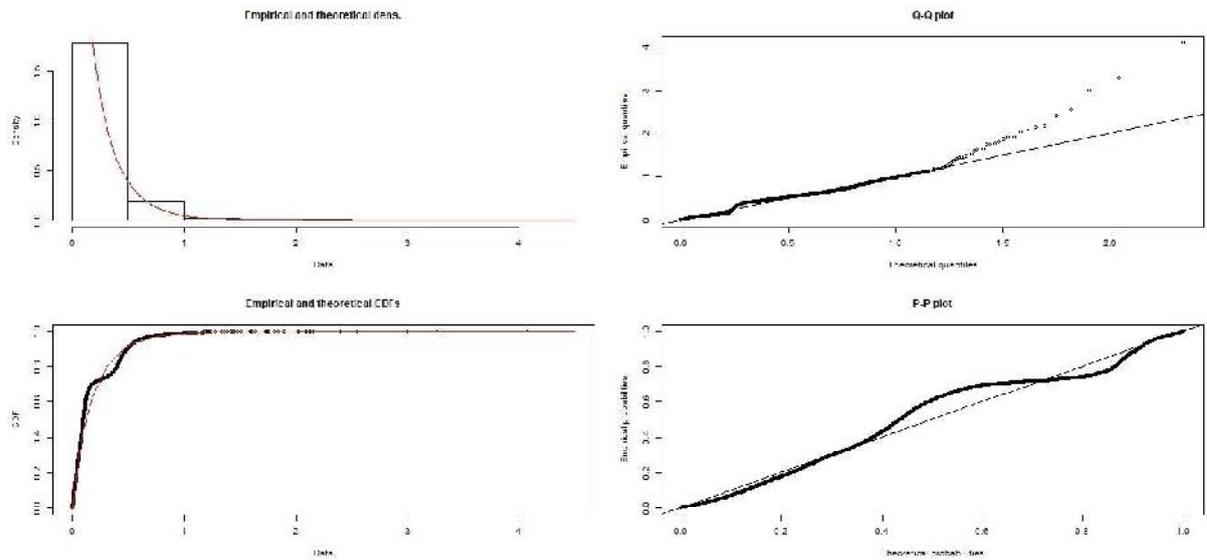


Figura 5.3 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 16

Fonte: elaborado pela autora

A Fig. 5.4 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 16. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 45° no rolamento de número 3.

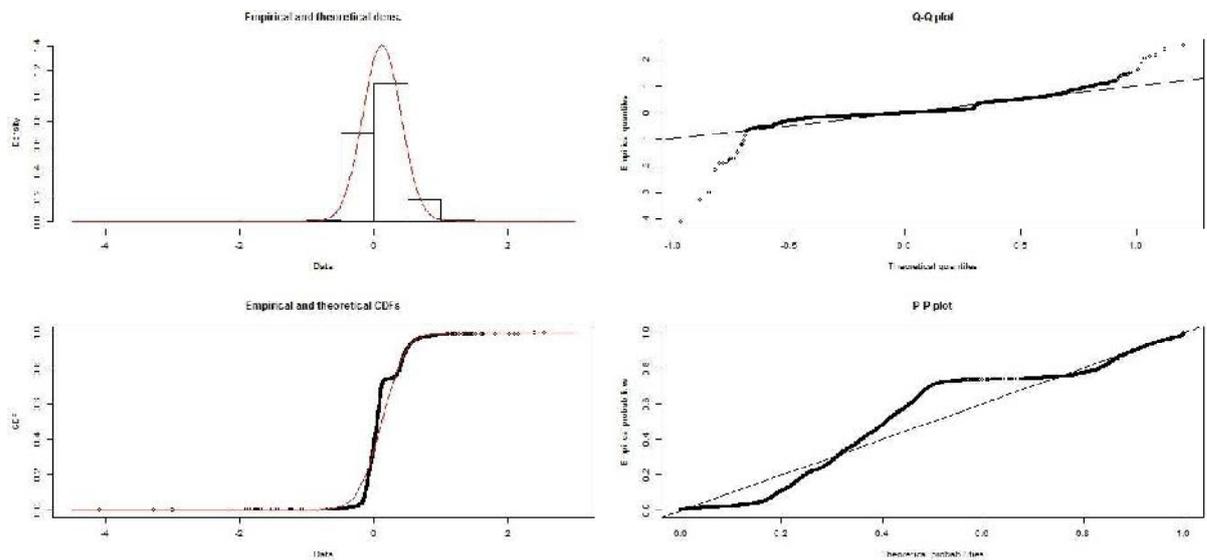


Figura 5.4 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 16

Fonte: elaborado pela autora

Observando as Fig. 5.3 e 5.4, verifica-se, no primeiro quadrante, as densidades de probabilidade empírica e teórica. A empírica corresponde aos dados reais, curva em preto. A

teórica, por sua vez, corresponde ao modelo ajustado, curva em vermelho. Comparando as curvas obtidas para as Fig. 5.3 e 5.4, o melhor formato é aquele para a curva de Weibull, conforme verificado pelos critérios AIC e BIC. E ainda, analisando o segundo quadrante, os gráficos dos quartis, o ajuste pela distribuição normal apresentou o resultado menos satisfatório, uma vez que este ajuste apresentou mais divergência do real em relação ao teórico nas extremidades da curva ajustada.

5.2 Sintomas via TDA

Em relação aos sintomas calculados via TDA, foi verificada a aderência de cada um dos sintomas à distribuição Weibull, segundo os valores de AIC e BIC obtidos.

Na Tab. 5.3 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos sintomas do terceiro grupo. Os resultados são apresentados por colunas para os três rolamentos analisados, considerando as duas posições de fixação dos acelerômetros.

Tabela 5.3 - Análise dos sintomas vibroacústicos via TDA dos sinais de aceleração

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Sintoma	AIC	BIC										
28	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 40 Hz	N	N	W	W	N	N	W	W	W	W	W	W
29	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 200 Hz	N	N	W	W	N	N	W	W	W	W	W	W
30	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 1.000 Hz	N	N	W	W	N	N	W	W	W	W	N	N
31	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 2.000 Hz	N	N	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
32	TDA filtrado na banda de 1.000 Hz a 4.000 Hz	N	N	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
33	TDA filtrado com filtro passa-alta em 500 Hz	N	N	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
34	TDA filtrado com filtro passa-alta em 1.000 Hz	N	N	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
35	TDA filtrado com filtro passa-alta em 2.000 Hz	N	N	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
36	TDA filtrado com filtro passa-alta em 3.000 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
37	TDA filtrado com filtro passa-alta em 4.000 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
38	TDA filtrado com filtro passa-alta em 5.000 Hz	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W	W	W
39	TDA filtrado com filtro passa-alta em 6.000 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
40	TDA filtrado com filtro passa-alta em 7.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
41	Nível RMS do TDA global	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
42	Diferença entre o nível RMS do sinal global e o nível RMS do TDA global	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
43	Razão entre o nível RMS do sinal global e o nível RMS do TDA global	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N	N	N
44	Nível RMS do sinal global	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Analisando-se os resultados apresentados na Tab. 5.3, verifica-se que, conforme os dados mensurados e avaliados, o sintoma de número 36 pode ser representado pela distribuição de Weibull. E ainda, neste caso, os critérios AIC e BIC obtiveram desempenho semelhante como ferramenta para seleção da distribuição que melhor descrevia o comportamento dos sintomas.

A Fig. 5.5 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 36. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma

calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 45° no rolamento de número 3.

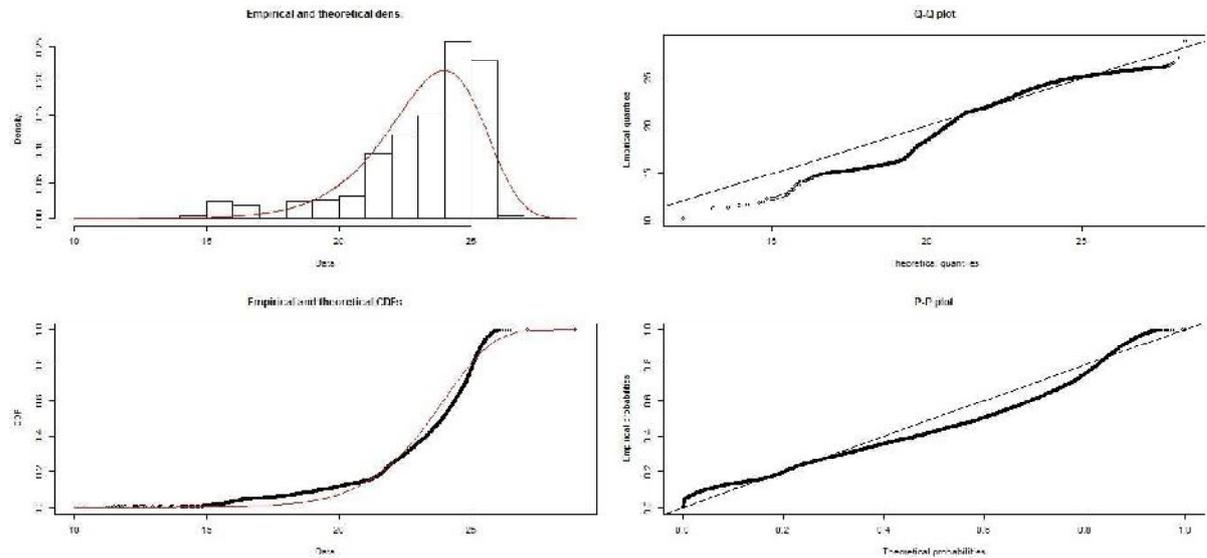


Figura 5.5 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 36

Fonte: elaborado pela autora

A Fig. 5.6 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 36. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 45° no rolamento de número 3.

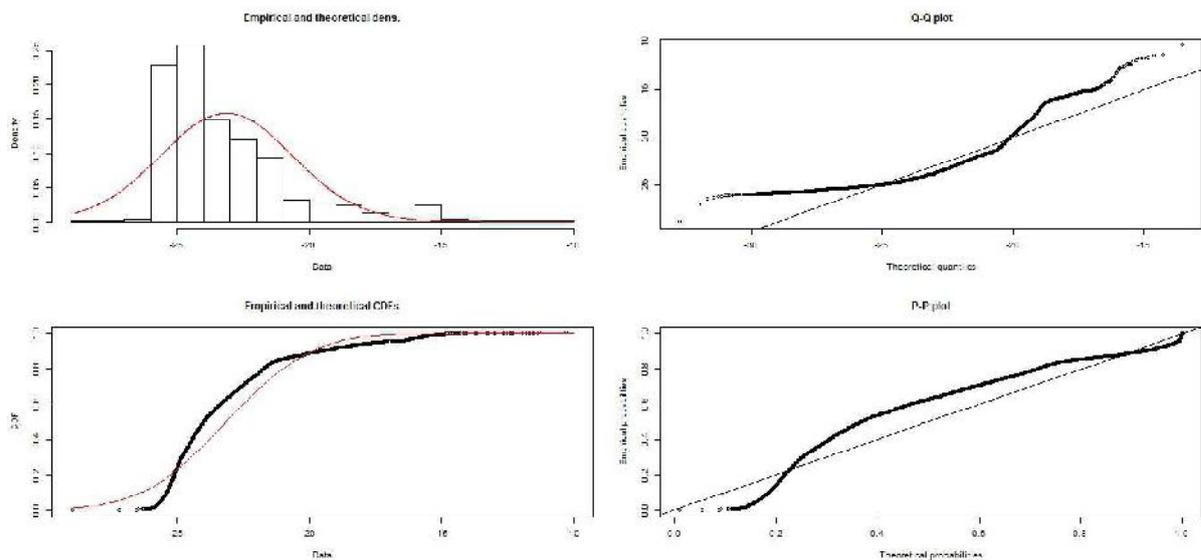


Figura 5.6 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 36

Fonte: elaborado pela autora

Observando as Fig. 5.5 e 5.6, verifica-se, no primeiro quadrante, as densidades de probabilidade empírica e teórica. A empírica corresponde aos dados reais, curva em preto. A teórica, por sua vez, corresponde ao modelo ajustado, curva em vermelho. Comparando as curvas obtidas para as Fig. 5.5 e 5.6, o melhor formato é aquele para a curva de Weibull, conforme verificado pelos critérios AIC e BIC. E ainda, analisando o segundo quadrante, os gráficos dos quartis, o ajuste pela distribuição normal apresentou o resultado menos satisfatório, uma vez que este ajuste apresentou mais divergência do real em relação ao teórico nas extremidades da curva ajustada.

Na Tab. 5.4 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos sintomas do quarto grupo. Os resultados são apresentados por colunas para os três rolamentos analisados, considerando as duas posições de fixação dos acelerômetros.

Tabela 5.4 - Análise dos sintomas vibroacústicos via TDA dos sinais de velocidade

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Sintoma	Rolamento 2				Rolamento 3				Rolamento 4			
		90°		45°		90°		45°		90°		45°	
		AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
45	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 40 Hz	N	N	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
46	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 200 Hz	N	N	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
47	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 1.000 Hz	N	N	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
48	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 2.000 Hz	N	N	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
49	TDA filtrado na banda de 1.000 Hz a 4.000 Hz	N	N	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
50	TDA filtrado com filtro passa-alta em 500 Hz	N	N	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
51	TDA filtrado com filtro passa-alta em 1.000 Hz	N	N	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
52	TDA filtrado com filtro passa-alta em 2.000 Hz	N	N	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
53	TDA filtrado com filtro passa-alta em 3.000 Hz	N	N	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
54	TDA filtrado com filtro passa-alta em 4.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	W	W
55	TDA filtrado com filtro passa-alta em 5.000 Hz	W	W	W	W	N	N	N	N	W	W	W	W
56	TDA filtrado com filtro passa-alta em 6.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
57	TDA filtrado com filtro passa-alta em 7.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
58	Nível RMS do TDA global	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
59	Diferença entre o nível RMS do sinal global e o nível RMS do TDA global	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
60	Razão entre o nível RMS do sinal global e o nível RMS do TDA global	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N	N	N

Analisando-se os resultados apresentados na Tab. 5.4, verifica-se que, conforme os dados mensurados e avaliados, nenhum dos sintomas analisados pode ser representado pela distribuição de Weibull. E ainda, neste caso, os critérios AIC e BIC obtiveram desempenho semelhante como ferramenta para seleção da distribuição que melhor descrevia o comportamento dos sintomas.

A Fig. 5.7 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 60. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 45° no rolamento de número 2.

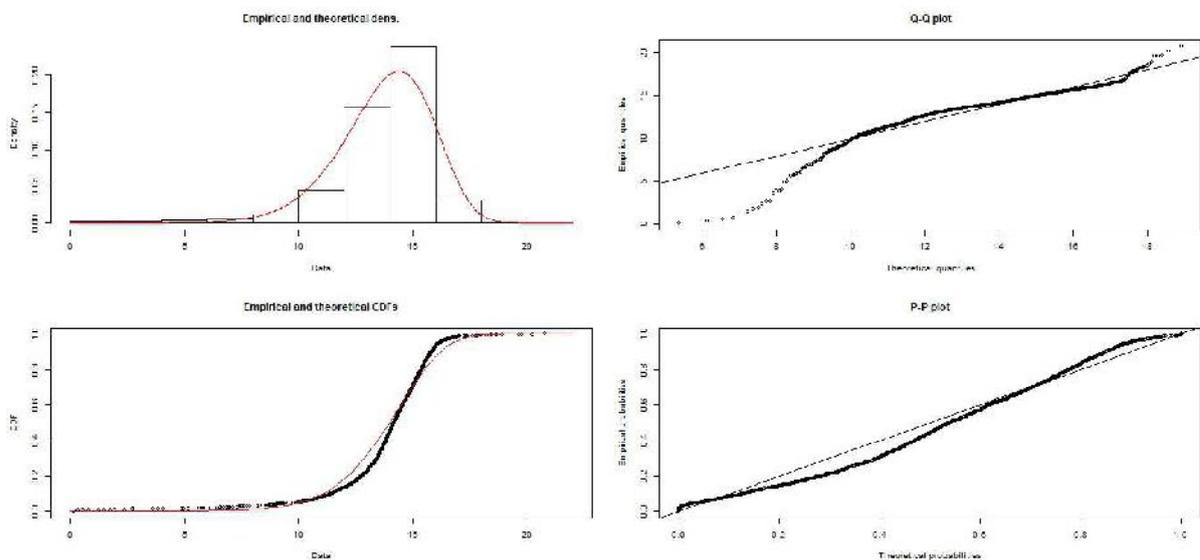


Figura 5.7 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 60

Fonte: elaborado pela autora

A Fig. 5.8 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 60. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 45° no rolamento de número 2.

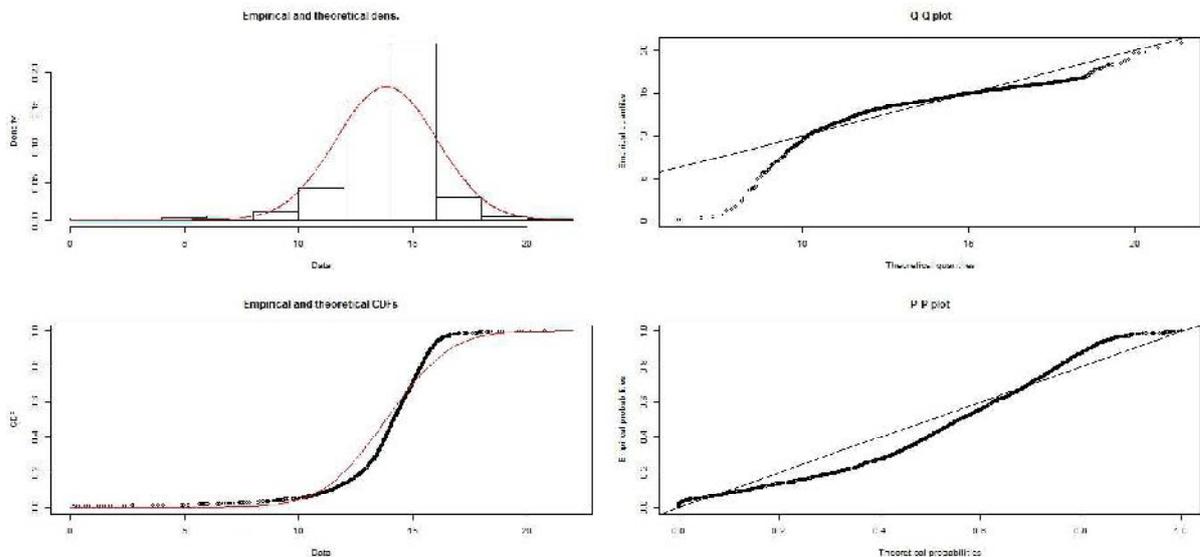


Figura 5.8 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 60

Fonte: elaborado pela autora

Observando as Fig. 5.7 e 5.8, verifica-se, no primeiro quadrante, as densidades de probabilidade empírica e teórica. A empírica corresponde aos dados reais, curva em preto. A teórica, por sua vez, corresponde ao modelo ajustado, curva em vermelho. Comparando as curvas obtidas para as Fig. 5.5 e 5.6, o melhor formato é aquele para a curva normal, conforme verificado pelos critérios AIC e BIC. E ainda, analisando o segundo quadrante, os gráficos dos quartis, o ajuste pela distribuição de Weibull apresentou o resultado menos satisfatório, uma vez que este ajuste apresentou mais divergência do real em relação ao teórico nas extremidades da curva ajustada.

5.3 Sintomas relacionados às bandas de oitava

Em relação aos sintomas relacionados às bandas de oitava, foi verificada a aderência de cada um dos sintomas à distribuição Weibull, segundo os valores de AIC e BIC obtidos.

Na Tab. 5.5 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos sintomas do quinto grupo. Os resultados são apresentados por colunas para os três rolamentos analisados, considerando as duas posições de fixação dos acelerômetros.

Tabela 5.5 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados às bandas de oitava para sinais de aceleração

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Sintoma	Rolamento 2				Rolamento 3				Rolamento 4			
		90°		45°		90°		45°		90°		45°	
		AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
61	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 1º harmônico	N	N	W	W	W	W	N	N	N	N	W	W
62	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 2º harmônico	N	N	W	W	W	W	N	N	N	N	W	W
63	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 4º harmônico	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
64	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 8º harmônico	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
65	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 16º harmônico	N	N	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
66	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 32º harmônico	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N
67	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 64º harmônico	W	W	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
68	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 128º harmônico	W	W	W	W	N	N	W	W	N	N	W	W
69	Nível RMS do sinal filtrado na banda entre a frequência fundamental e 0,100 Hz	W	W	W	W	N	N	W	W	N	N	W	W
70	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado a ½ de harmônico	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
71	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao ¼ de harmônico	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Analisando-se os resultados apresentados na Tab. 5.5, verifica-se que, conforme os dados mensurados e avaliados, nenhum dos sintomas analisados pode ser representado pela distribuição de Weibull. E ainda, neste caso, os critérios AIC e BIC obtiveram desempenho semelhante como ferramenta para seleção da distribuição que melhor descrevia o comportamento dos sintomas.

A Fig. 5.9 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 69. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 90° no rolamento de número 4.

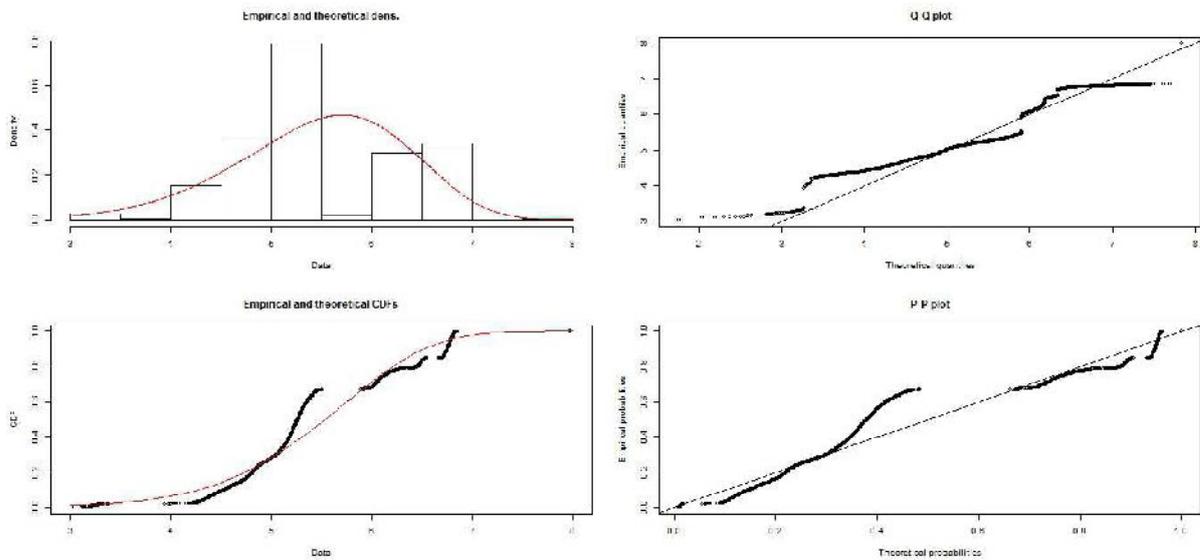


Figura 5.9 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 69

Fonte: elaborado pela autora

A Fig. 5.10 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 69. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 90° no rolamento de número 4.

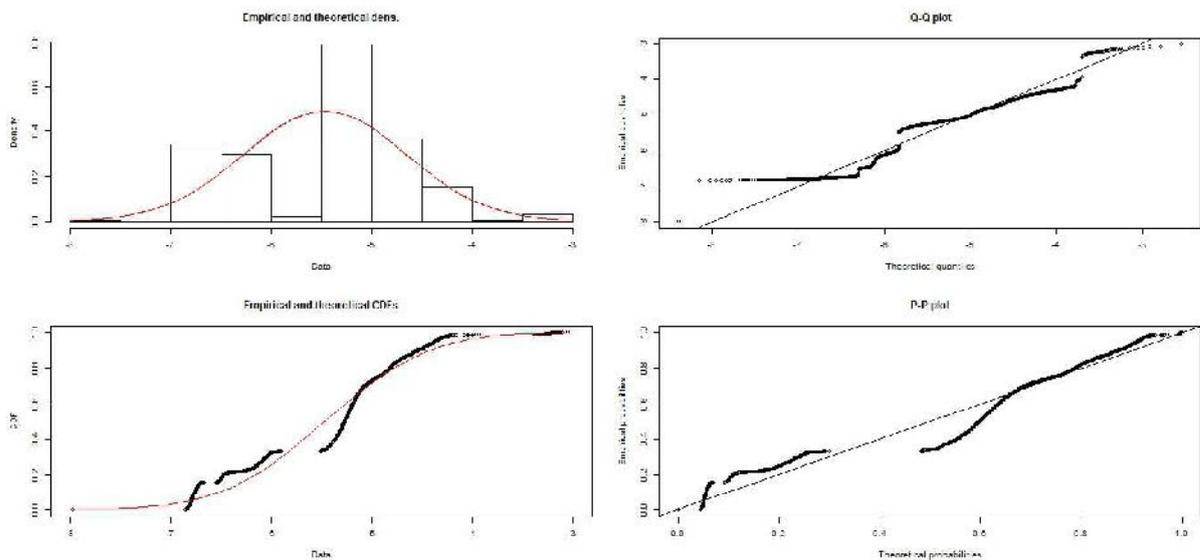


Figura 5.10 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 69

Fonte: elaborado pela autora

Observando as Fig. 5.9 e 5.10, verifica-se, no primeiro quadrante, as densidades de probabilidade empírica e teórica. A empírica corresponde aos dados reais, curva em preto. A teórica, por sua vez, corresponde ao modelo ajustado, curva em vermelho. Comparando as curvas obtidas para as Fig. 5.9 e 5.10, o melhor formato é aquele para a curva normal, conforme verificado pelos critérios AIC e BIC. E ainda, analisando o segundo quadrante, os gráficos dos quartis, o ajuste pela distribuição de Weibull apresentou o resultado menos satisfatório, uma vez que este ajuste apresentou mais divergência do real em relação ao teórico nas extremidades da curva ajustada.

Na Tab. 5.6 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos sintomas do sexto grupo. Os resultados são apresentados por colunas para os três rolamentos analisados, considerando as duas posições de fixação dos acelerômetros.

Tabela 5.6 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados às bandas de oitava para sinais de velocidade

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Sintoma	Rolamento 2				Rolamento 3				Rolamento 4			
		90°		45°		90°		45°		90°		45°	
		AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
72	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 1º harmônico	N	N	N	N	N	N	W	W	N	N	W	W
73	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 2º harmônico	N	N	N	N	N	N	W	W	N	N	W	W
74	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 4º harmônico	N	N	N	N	N	N	W	W	N	N	W	W
75	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 8º harmônico	N	N	N	N	N	N	W	W	N	N	W	W
76	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 16º harmônico	N	N	N	N	N	N	W	W	N	N	W	W
77	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 32º harmônico	N	N	N	N	N	N	W	W	N	N	W	W
78	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 64º harmônico	N	N	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
79	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 128º harmônico	N	N	N	N	N	N	W	W	N	N	W	W
80	Nível RMS do sinal filtrado na banda entre a frequência fundamental e 3100 Hz	N	N	N	N	N	N	W	W	N	N	W	W
81	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado a 1/2 de harmônico	N	N	N	N	N	N	W	W	N	N	W	W
82	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 1/4 de harmônico	N	N	N	N	N	N	W	W	N	N	W	W

Analisando-se os resultados apresentados na Tab. 5.6, verifica-se que, conforme os dados mensurados e avaliados, nenhum dos sintomas analisados pode ser representado pela distribuição de Weibull. E ainda, neste caso, os critérios AIC e BIC obtiveram

desempenho semelhante como ferramenta para seleção da distribuição que melhor descrevia o comportamento dos sintomas.

A Fig. 5.11 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 82. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 90° no rolamento de número 3.

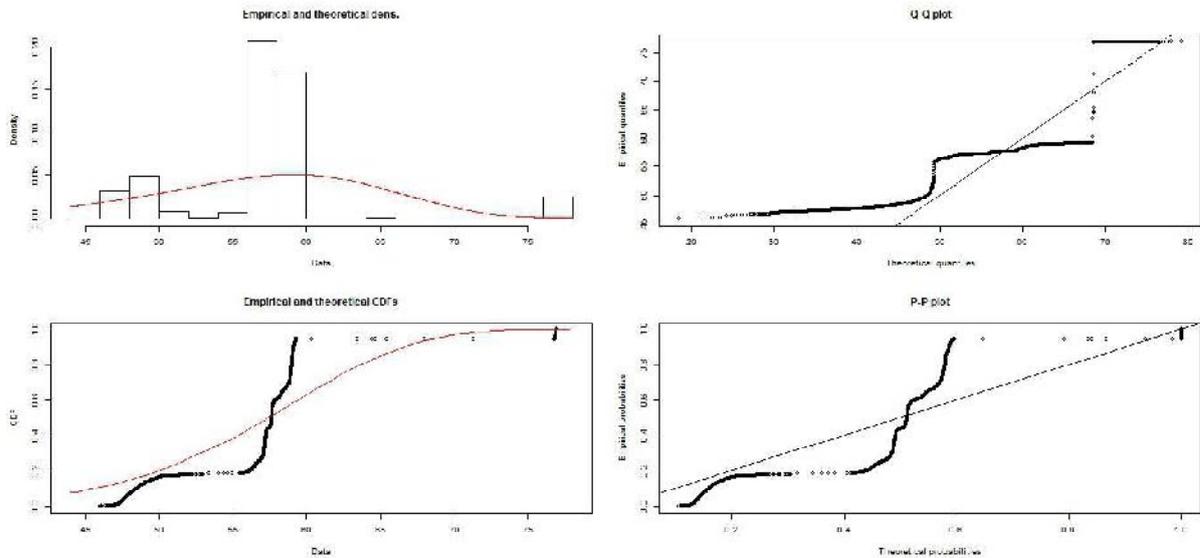


Figura 5.11 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 82

Fonte: elaborado pela autora

A Fig. 5.12 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 82. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 90° no rolamento de número 3.

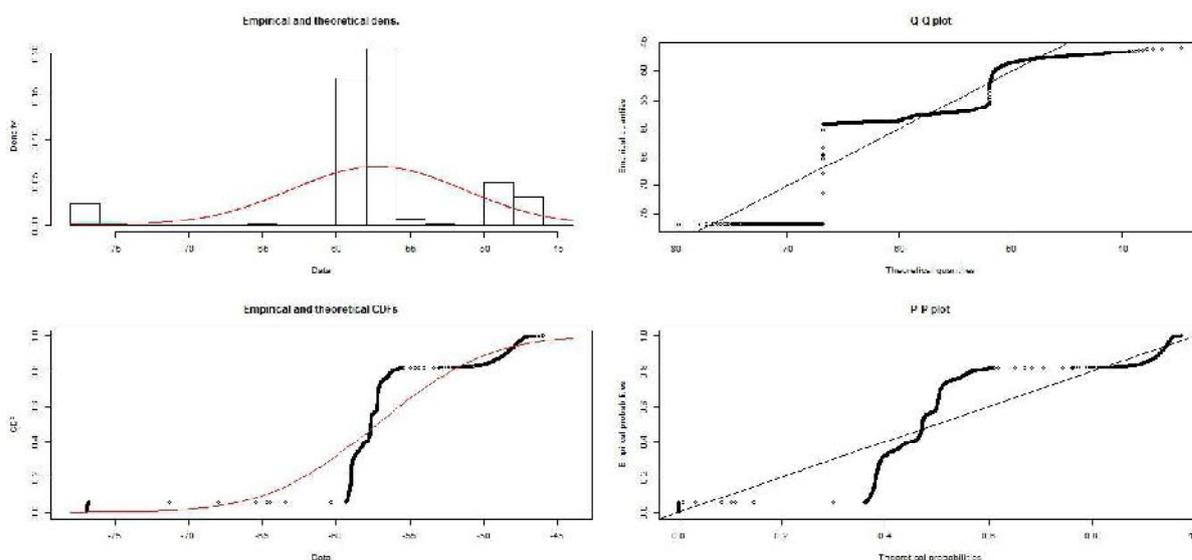


Figura 5.12 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 82

Fonte: elaborado pela autora

Observando as Fig. 5.11 e 5.12, verifica-se, no primeiro quadrante, as densidades de probabilidade empírica e teórica. A empírica corresponde aos dados reais, curva em preto. A teórica, por sua vez, corresponde ao modelo ajustado, curva em vermelho. Comparando as curvas obtidas para as Fig. 5.11 e 5.12, o melhor formato é aquele para a curva normal, conforme verificado pelos critérios AIC e BIC. E ainda, analisando o segundo quadrante, os gráficos dos quartis, o ajuste pela distribuição de Weibull apresentou o resultado menos satisfatório, uma vez que este ajuste apresentou mais divergência do real em relação ao teórico nas extremidades da curva ajustada.

5.5 Sintomas relacionados aos harmônicos do motor elétrico

Em relação aos sintomas relacionados aos harmônicos gerados pelo motor elétrico, foi verificada a aderência de cada um dos sintomas à distribuição Weibull, segundo os valores de AIC e BIC obtidos.

Na Tab. 5.7 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos sintomas do sétimo grupo. Os resultados são apresentados por colunas para os três rolamentos analisados, considerando as duas posições de fixação dos acelerômetros.

Tabela 5.7 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados aos harmônicos do motor elétrico

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Sintoma	Rolamento 2				Rolamento 3				Rolamento 4			
		90°		45°		90°		45°		90°		45°	
		AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
83	Primeiro conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
84	Segundo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N
85	Terceiro conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator	N	N	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
86	Quarto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator	W	W	W	W	N	N	N	N	N	N	N	N
87	Quinto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator	W	W	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
88	Sexto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator	N	N	N	N	N	N	W	W	W	W	W	W
89	Sétimo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	W	W
90	Oitavo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator	W	W	W	W	N	N	N	N	W	W	W	W
91	Primeiro conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
92	Segundo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
93	Terceiro conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
94	Quarto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
95	Quinto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
96	Sexto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
97	Sétimo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
98	Oitavo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N	N	N

Analisando-se os resultados apresentados na Tab. 5.7, verifica-se que, conforme os dados mensurados e avaliados, nenhum dos sintomas analisados pode ser representado pela distribuição de Weibull. E ainda, neste caso, os critérios AIC e BIC obtiveram desempenho semelhante como ferramenta para seleção da distribuição que melhor descrevia o comportamento dos sintomas.

A Fig. 5.13 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 98. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 45° no rolamento de número 3.

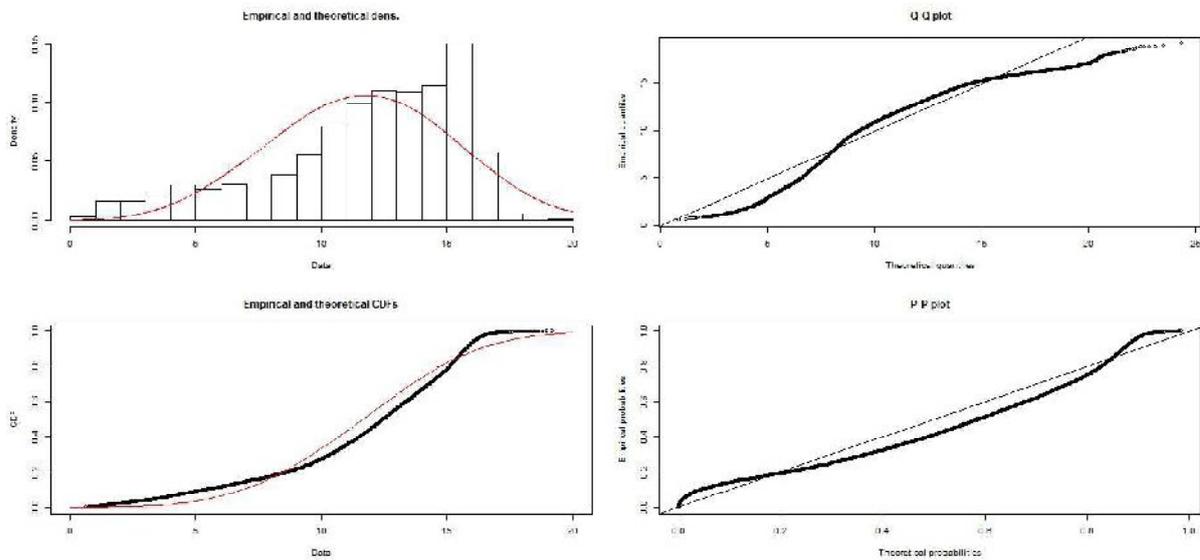


Figura 5.13 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 98
 Fonte: elaborado pela autora

A Fig. 5.14 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 98. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 45° no rolamento de número 3.

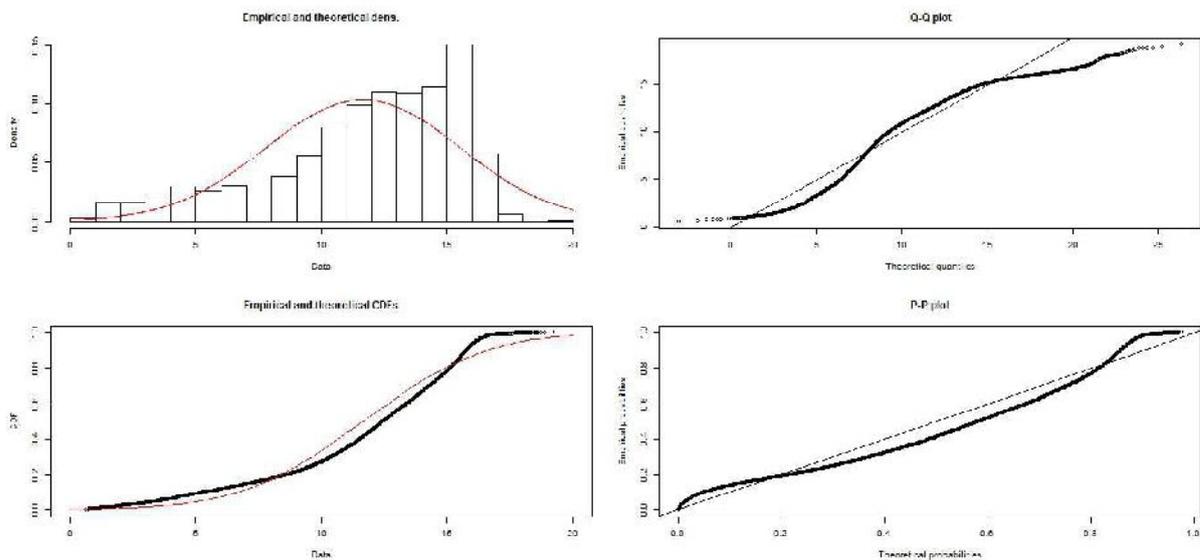


Figura 5.14 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 98
 Fonte: elaborado pela autora

Observando as Fig. 5.13 e 5.14, verifica-se, no primeiro quadrante, as densidades de probabilidade empírica e teórica. A empírica corresponde aos dados reais, curva em preto. A teórica, por sua vez, corresponde ao modelo ajustado, curva em vermelho. Comparando as curvas obtidas para as Fig. 5.13 e 5.14, o melhor formato é aquele para a curva normal, conforme verificado pelos critérios AIC e BIC. E ainda, analisando o segundo quadrante, os gráficos dos quartis, o ajuste pela distribuição de Weibull apresentou o resultado menos satisfatório, uma vez que este ajuste apresentou mais divergência do real em relação ao teórico nas extremidades da curva ajustada.

5.6 Sintomas relacionados à análise de envelope

Em relação aos sintomas relacionados à análise do envelope dos sinais, foi verificada a aderência de cada um dos sintomas à distribuição Weibull, segundo os valores de AIC e BIC obtidos.

Na Tab. 5.8 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos sintomas do oitavo grupo. Os resultados são apresentados por colunas para os três rolamentos analisados, considerando as duas posições de fixação dos acelerômetros.

Tabela 5.8 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados ao envelope do sinal

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Sintoma	Rolamento 2				Rolamento 3				Rolamento 4			
		90°		45°		90°		45°		90°		45°	
		AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
99	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-baixa em 100 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
100	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-baixa em 100 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N
101	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 1.000 Hz e 2.000 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
102	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 1.000 Hz e 2.000 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N
103	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 2.000 Hz e 6.000 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
104	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 2.000 Hz e 6.000 Hz	W	W	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
105	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-alta em 2.000 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
106	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-alta em 2.000 Hz	W	W	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
107	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-alta em 4.000 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
108	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-alta em 4.000 Hz	W	W	W	W	N	N	W	W	N	N	N	N
109	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-alta em 6.000 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
110	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-alta em 6.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
111	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-alta em 8.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
112	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-alta em 8.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
113	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-alta em 10.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
114	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-alta em 10.000 Hz	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N	N	N
115	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-alta em 12.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
116	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-alta em 12.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Analisando-se os resultados apresentados na Tab. 5.7, verifica-se que, conforme os dados mensurados e avaliados, os sintomas de número 99, 101 e 103 podem ser representados pela distribuição de Weibull. E ainda, neste caso, os critérios AIC e BIC obtiveram desempenho semelhante como ferramenta para seleção da distribuição que melhor descrevia o comportamento dos sintomas.

A Fig. 5.15 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 99. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma

calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 45° no rolamento de número 4.

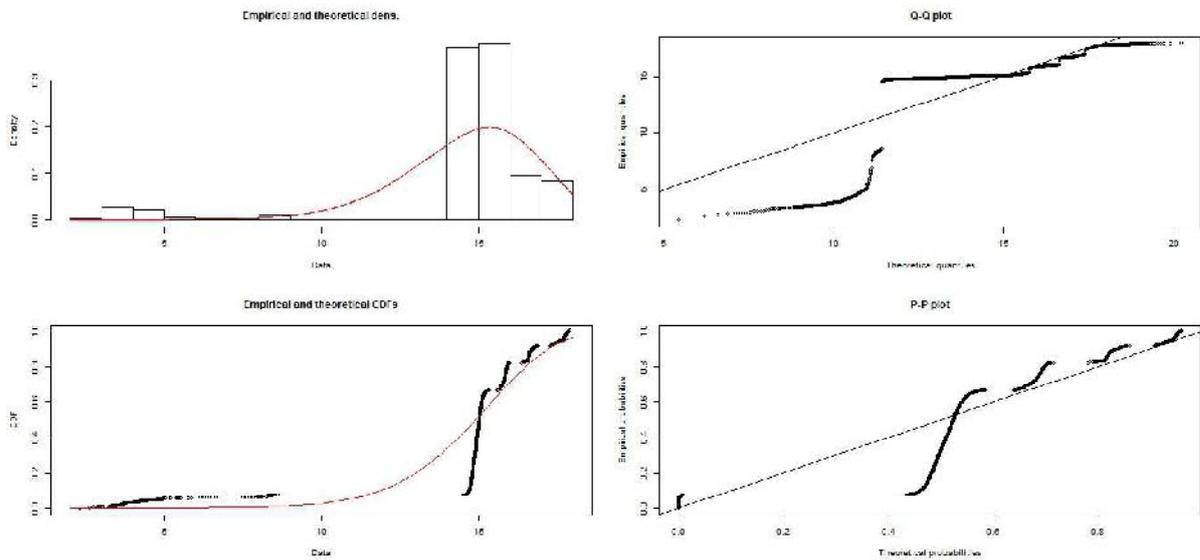


Figura 5.15 - Análise gráfica da distribuição normal de Weibull para o sintoma de número 99

Fonte: elaborado pela autora

A Fig. 5.16 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 99. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 45° no rolamento de número 4.

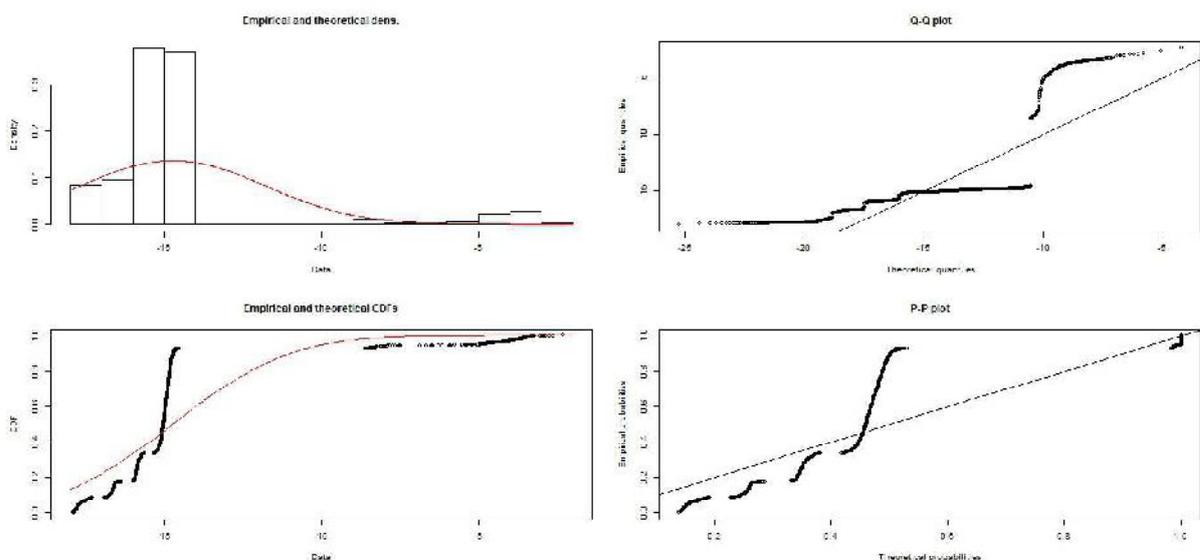


Figura 5.16 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 99

Fonte: elaborado pela autora

Observando as Fig. 5.15 e 5.16, verifica-se, no primeiro quadrante, as densidades de probabilidade empírica e teórica. A empírica corresponde aos dados reais, curva em preto. A teórica, por sua vez, corresponde ao modelo ajustado, curva em vermelho. Comparando as curvas obtidas para as Fig. 5.15 e 5.16, o melhor formato é aquele para a curva de Weibull, conforme verificado pelos critérios AIC e BIC. E ainda, analisando o segundo quadrante, os gráficos dos quartis, o ajuste pela distribuição normal apresentou o resultado menos satisfatório, uma vez que este ajuste apresentou mais divergência do real em relação ao teórico nas extremidades da curva ajustada.

5.7 Sintomas relacionados a regiões do espectro

Em relação aos sintomas relacionados a regiões específicas do espectro de frequência dos sinais, foi verificada a aderência de cada um dos sintomas à distribuição Weibull, segundo os valores de AIC e BIC obtidos.

Na Tab. 5.9 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos sintomas do nono grupo. Os resultados são apresentados por colunas para os três rolamentos analisados, considerando as duas posições de fixação dos acelerômetros.

Tabela 5.9 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados a regiões do espectro

Fonte: elaborado pela autora

Número do Sintoma	Sintoma	Rolamento 2				Rolamento 3				Rolamento 4			
		90°		45°		90°		45°		90°		45°	
		AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
117	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 40 Hz	W	W	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
118	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 200 Hz	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	W	W
119	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 1.000 Hz	N	N	W	W	W	W	N	N	N	N	W	W
120	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 2.000 Hz	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N
121	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-banda entre 1.000 e 4.000 Hz	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N
122	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 500 Hz	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N
123	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 1.000 Hz	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N
124	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 2.000 Hz	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N
125	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 3.000 Hz	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N
126	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 4.000 Hz	N	N	W	W	W	W	W	W	N	N	N	N
127	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 5.000 Hz	N	N	W	W	W	W	N	N	N	N	W	W
128	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 6.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
129	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 7.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
130	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-banda entre 500 e 7.000 Hz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Analisando-se os resultados apresentados na Tab. 5.9, verifica-se que, conforme os dados mensurados e avaliados, nenhum dos sintomas analisados pode ser representado pela distribuição de Weibull. E ainda, neste caso, os critérios AIC e BIC obtiveram desempenho semelhante como ferramenta para seleção da distribuição que melhor descrevia o comportamento dos sintomas.

A Fig. 5.17 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 130. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 45° no rolamento de número 3.

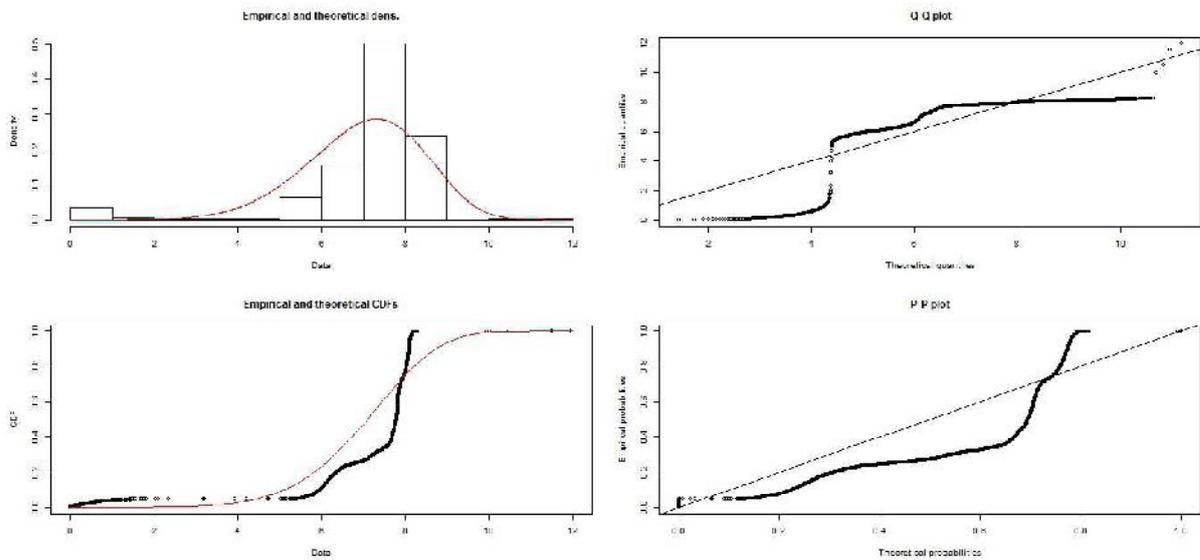


Figura 5.17 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 130
 Fonte: elaborado pela autora

A Fig. 5.18 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 130. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 45° no rolamento de número 3.

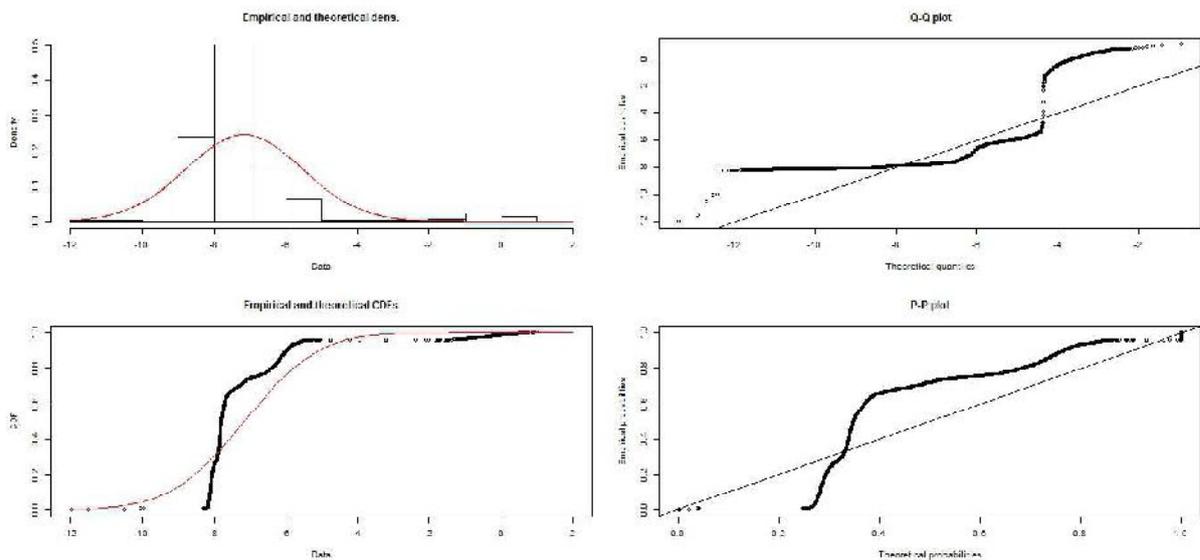


Figura 5.18 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 130
 Fonte: elaborado pela autora

Analisando-se os resultados apresentados na Tab. 5.10, verifica-se que, conforme os dados mensurados e avaliados, nenhum dos sintomas analisados pode ser representado pela distribuição de Weibull. E ainda, neste caso, os critérios AIC e BIC obtiveram desempenho semelhante como ferramenta para seleção da distribuição que melhor descrevia o comportamento dos sintomas.

A Fig. 5.19 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 138. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 90° no rolamento de número 4.

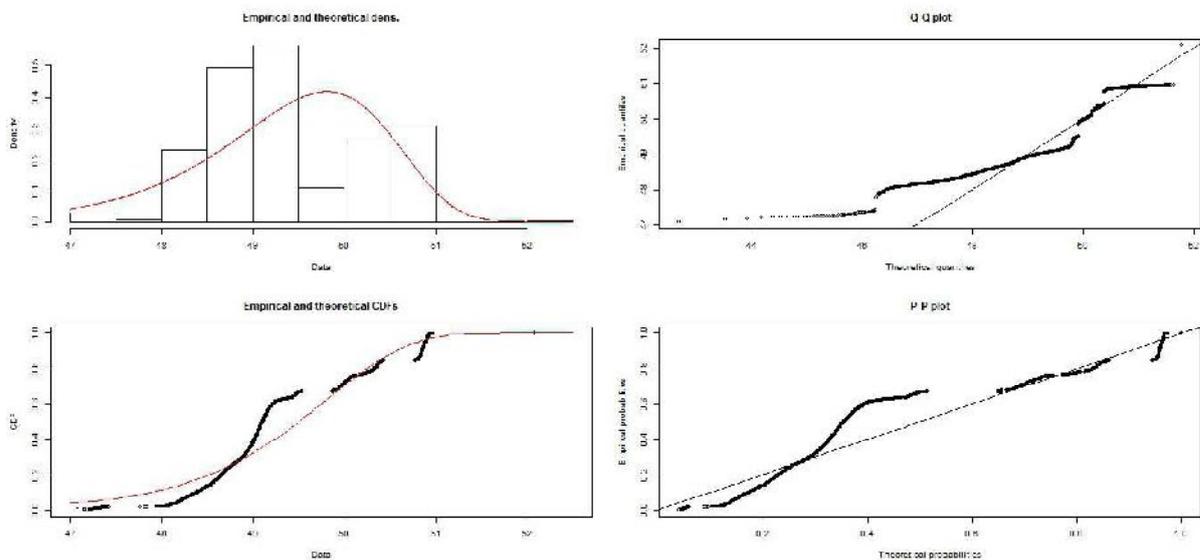


Figura 5.19 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 138

Fonte: elaborado pela autora

A Fig. 5.20 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 138. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 90° no rolamento de número 4.

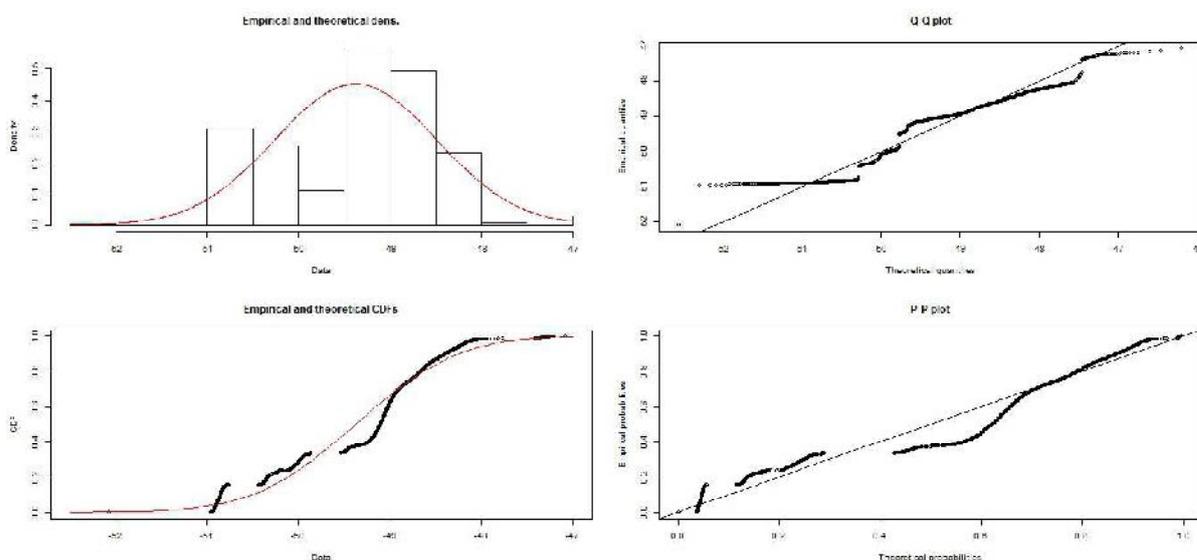


Figura 5.20 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 138

Fonte: elaborado pela autora

Observando as Fig. 5.19 e 5.20, verifica-se, no primeiro quadrante, as densidades de probabilidade empírica e teórica. A empírica corresponde aos dados reais, curva em preto. A teórica, por sua vez, corresponde ao modelo ajustado, curva em vermelho. Comparando as curvas obtidas para as Fig. 5.19 e 5.20, o melhor formato é aquele para a curva normal, conforme verificado pelos critérios AIC e BIC. E ainda, analisando o segundo quadrante, os gráficos dos quartis, o ajuste pela distribuição de Weibull apresentou o resultado menos satisfatório, uma vez que este ajuste apresentou mais divergência do real em relação ao teórico nas extremidades da curva ajustada.

5.8 Sintomas relacionados à análise em bandas de 1/3 de oitava

Em relação aos sintomas relacionados com a análise em bandas de 1/3 de oitava entre 40 e 12.500 Hz, foi verificada a aderência de cada um dos sintomas à distribuição Weibull, segundo os valores de AIC e BIC obtidos.

Na Tab. 5.11 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos sintomas do décimo primeiro grupo. Os resultados são apresentados por colunas para os três rolamentos analisados, considerando as duas posições de fixação dos acelerômetros.

Analisando-se os resultados apresentados na Tab. 5.11, verifica-se que, conforme os dados mensurados e avaliados, nenhum dos sintomas analisados pode ser representado pela distribuição de Weibull. E ainda, neste caso, os critérios AIC e BIC obtiveram desempenho semelhante como ferramenta para seleção da distribuição que melhor descrevia o comportamento dos sintomas.

A Fig. 5.21 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 169. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 90° no rolamento de número 4.

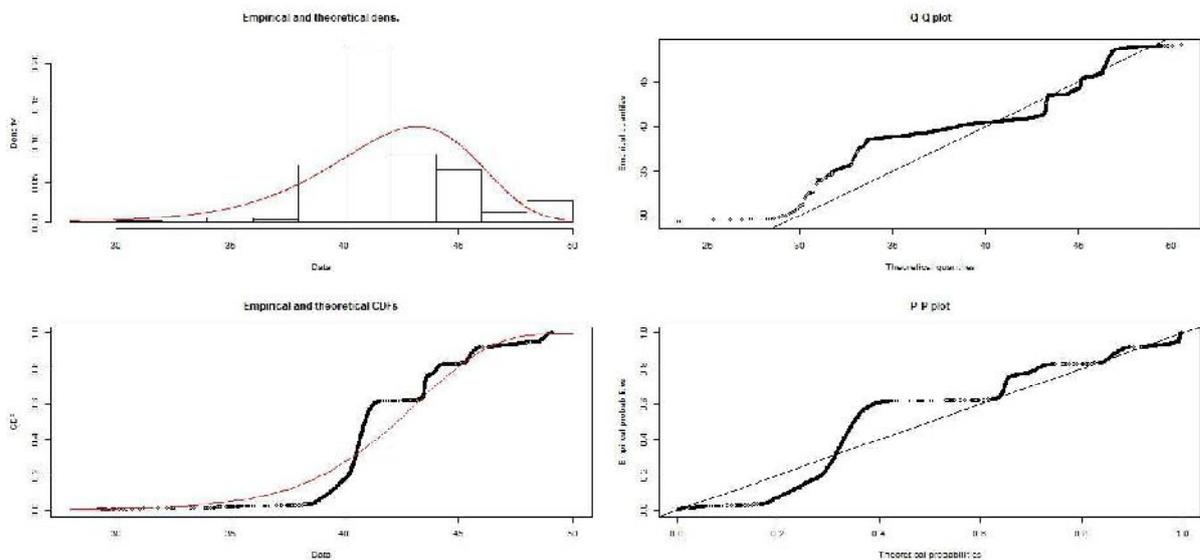


Figura 5.21 - Análise gráfica da distribuição de Weibull obtida para o sintoma de número 169

Fonte: elaborado pela autora

A Fig. 5.22 apresenta um exemplo de análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 169. Nesta imagem, está representada a análise do sintoma calculado para os dados medidos pelo acelerômetro posicionado a 90° no rolamento de número 4.

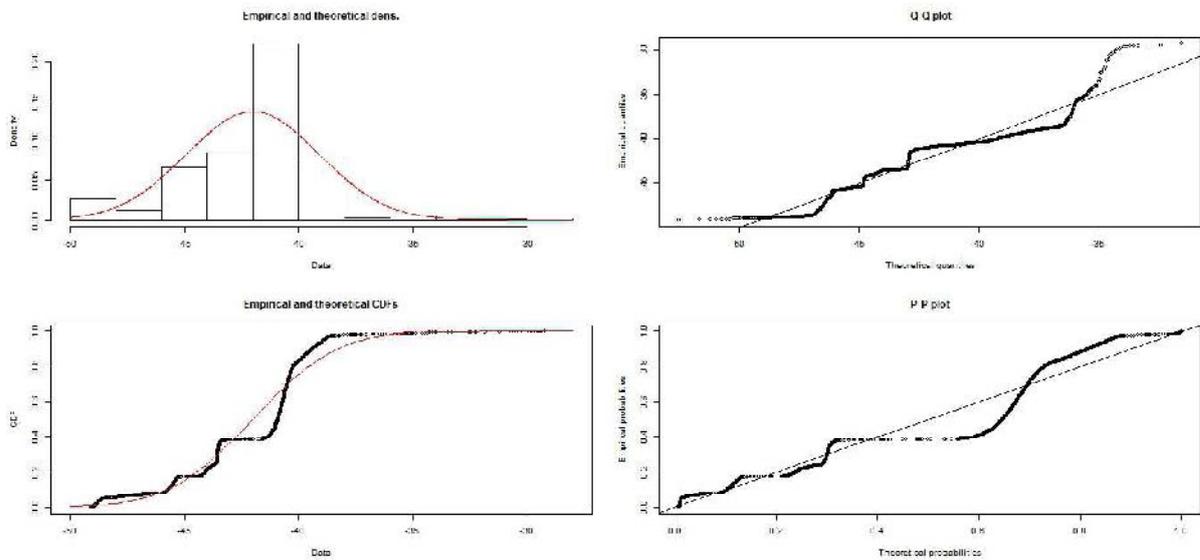


Figura 5.22 - Análise gráfica da distribuição normal obtida para o sintoma de número 169

Fonte: elaborado pela autora

Observando as Fig. 5.21 e 5.22, verifica-se, no primeiro quadrante, as densidades de probabilidade empírica e teórica. A empírica corresponde aos dados reais, curva em preto. A teórica, por sua vez, corresponde ao modelo ajustado, curva em vermelho. Comparando as curvas obtidas para as Fig. 5.21 e 5.22, o melhor formato é aquele para a curva normal, conforme verificado pelos critérios AIC e BIC. E ainda, analisando o segundo quadrante, os gráficos dos quartis, o ajuste pela distribuição de Weibull apresentou o resultado menos satisfatório, uma vez que este ajuste apresentou mais divergência do real em relação ao teórico nas extremidades da curva ajustada.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A utilização de ferramentas estatísticas elaboradas na predição de tempo de falhas de equipamentos e máquinas representa uma possibilidade de se atingir o objetivo da manutenção preditiva que é utilizar o equipamento pelo maior tempo possível, evitando trocas antecipadas ou tardias, o que, em ambas as situações, geraria gastos desnecessários.

O monitoramento da vibração de equipamentos mecânicos fornece dados para que, com a aplicação da metodologia mais apropriada, possa ser realizada a predição da condição de saúde de uma determinada máquina em função do tempo.

Diante deste contexto, o presente trabalho propôs a aplicação de uma metodologia para predição do tempo de falhas de equipamentos a partir do monitoramento da vibração dos mesmos e posterior análise de quais sintomas vibroacústicos seriam capazes de fornecer informações com esse propósito. A partir da análise de informações obtidas experimentalmente sobre a vibração de um conjunto de mancais de rolamentos, foram calculados os sintomas vibroacústicos propostos e foi analisada a sua aderência à curva de Weibull. Assim, diante do exposto, as principais conclusões foram:

- Os sintomas acústicos no domínio do tempo skewness, kurtosis e K4 seguem o comportamento da distribuição de Weibull, podendo ser utilizados para representação do tempo de falhas de uma máquina ou equipamento em função do tempo;
- O sintoma acústico TDA com filtro passa alta 3000 Hz segue comportamento da distribuição de Weibull, podendo ser utilizado para representação do tempo de falhas de uma máquina ou equipamento em função do tempo;
- Os sintomas acústicos relacionados ao envelope do sinal: nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-baixa em 100 Hz, nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 1000 e 2000 Hz, nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 2000 e 4000 Hz; seguem o comportamento da distribuição de Weibull, podendo ser utilizados para representação do tempo de falhas de uma máquina ou equipamento em função do tempo;
- Os critérios de seleção de modelo adotados, AIC e BIC, obtiveram desempenho semelhante na seleção da distribuição estatística que melhor se ajustava ao comportamento dos sintomas no domínio do tempo.

6.2 Trabalhos futuros

Complementarmente aos estudos realizados no presente trabalho, sugerem-se as seguintes ações futuras:

- Melhoria da confiabilidade da metodologia proposta, por meio da aplicação de técnicas como lógica *fuzzy*, redes neurais, SVM, ICA, PCA e Weibull modificada;
- Avaliação de um sistema mecânico mais complexo, incluindo elementos mecânicos tais como engrenagens e rolamentos de rolos cônicos, e variando-se a carga e a rotação simulando um sistema mais próximo aos reais presentes nos diferentes segmentos industriais;
- Proposição de um modelo de análise e implementação do mesmo em um sistema mecânico real de uma indústria;
- Aplicação de critérios estatísticos para definição de qual seria o tamanho mínimo da amostra de dados para início de confecção das curvas de predição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMAN - Documento Nacional 2013. Disponível em: <http://www.abraman.org.br/Arquivos/403/403.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2017

ÁGOSTON, K. **Fault detection with vibration transducers**. Procedia Technology, Tirgu Mures, v. 12, p. 119-124, Jan. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.464>

ALEGRANZI, S. B. **Construção e adequação de uma bancada de ensaios para investigações de técnicas não destrutivas de detecção de falhas incipientes em rolamentos**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ALMEIDA, Márcio Tadeu; GÓZ, Ricardo Damiano Sales. **Análise de Vibrações I - Medidas e Diagnósticos**. Apostila do Curso de Análise de Vibração da FUPAI, Itajubá - MG, 2000.

AMORIM, W. P. **Redução de atributos utilizando análise discriminante de Fisher com aplicações na detecção de defeitos em couro bovino**. 2008. 57 p. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2008.

BOZDOGAN, Hamparsum. **Model selection and Akaike's information criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions**. Psychometrika, v. 52, n. 3, p. 345-370, 1987. <https://doi.org/10.1007/BF02294361>

BRITO, Jorge Nei; PEDERIVA, R.; GARCIA, E. M. **Desenvolvimento de um Sistema Especialista para Diagnóstico de Problemas em Motores Elétricos**. In: II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM, João Pessoa - PB. 2002.

COLOSIMO, Enrico Antônio; GIOLO, Suely Ruiz. **Análise de sobrevivência aplicada**. Edgard Blucher, 2006.

COOK, Richard J.; LAWLESS, Jerald. **The statistical analysis of recurrent events**. Springer Science & Business Media, 2007.

CUNHA JR, Sebastião Simões; DUARTE, Marcus Antonio Viana. **Uso da tda - média no domínio do tempo como ferramenta de identificação de falhas em câmbios automotivos**. In: CONNEM 2000, Natal - RN CONEM 2000.

DA FONSECA PINTO, R. **Novas abordagens ao estudo de sinais biomédicos: Análise em tempo-frequência e Transformada de Hilbert-Huang**. Tese (Doutorado) - Departamento de Física, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.

DAL BELLO, Luiz Henrique Abreu. **Modelagem em experimentos mistura-processo para otimização de processos industriais**. Tese (Doutorado) - Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

DE JESUS, S. S.; CAVALCANTE, P. F. **Utilização de bancadas de ensaio para estudo do comportamento dinâmico de máquinas rotativas-vibrações mecânicas**. Holos, Natal, v. 3, p. 18-40, maio 2011. <https://doi.org/10.15628/holos.2011.590>

DUARTE, J. B. **Inteligência artificial aplicada no controle de qualidade em linhas de produção**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

FONTOURA, D. S. **Uso de modelos numéricos e medições em problemas de vibração excessiva**. 2006. 63 p. Monografia (Graduação em Engenharia Naval) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

GONÇALVES NETO, W. et al. **Manutenção preditiva através de análises em equipamentos rotativos monitorado por sensores de vibração**. Revista de Controle e Automação, Campi-nas, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2013.

GONGORA, W. S. et al. **Neural approach to fault detection in three-phase induction motors**. IEEE Latin America Transactions, New York, v. 14, n. 3, p. 1279-1288, 2016. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7459610>

HARRIS, Cyril M.; PIERSOL, Allan G. **Harris' shock and vibration handbook**. New York: McGraw-Hill, 2002.

KARDEC, A.; NASCIF, J.A. **Manutenção - função estratégica**. 4.^a ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda., 2012.

LITTELL, R. C.; MILLIKEN, G. A. ;STROUP, W. W & WOLFINGER, R. D. **SAS System for Mixed Models**. Cary: Statistical Analysis System Institute, 2002. 633p.

LOUTAS, T. H. et al. **The combined use of vibration, acoustic emission and oil debris on-line monitoring towards a more effective condition monitoring of rotating machinery**. Mechanical systems and signal processing, v. 25, n. 4, p. 1339-1352, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.11.007>

MARÇAL, Rui Francisco Martins. **Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibração e lógica Fuzzy**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

MEOLA, T. **Monitoramento em tempo real da qualidade de sinais de vibrações, utilizando inteligência artificial**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

MONCHY, François. **La fonction maintenance: Formation à la gestion de la maintenance industrielle**. Masson, 1987.

NELSON, Wayne B. **Recurrent events data analysis for product repairs, disease recurrences, and other applications**. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2003.

OLIVEIRA, A. Gonçalves de. **Técnicas de Caracterização de Excitações em Máquinas Rotativas**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 1999.

PINTO, L. A. V. **Análise de vibração de máquinas em navios e plataformas offshore**. Anais do 20^o Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore, COPPE / UFRJ, 2004

RANDALL, Robert B.; ANTONI, Jerome. **Rolling element bearing diagnostics - a tutorial**. Mechanical systems and signal processing, v. 25, n. 2, p. 485-520, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.017>

RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. 4.^a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall: 2009. 448 p.

RIBEIRO, D. A. **Análise de vibração em motores elétricos com mouse óptico.** Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Sistema e Automação, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

ROSS, S. M. **Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists.** Cap. 10. Quinn Woodbine, 1987, 492p. 85

SEQUEIRA, C. **Sensores para medições de vibrações mecânicas-acelerómetros.** Revista Manutenção, Porto, v. 116, p. 4-6, 2013.

SILVA, Samuel da. **Vibrações Mecânicas.** Notas de aula - 2ª Versão. Universidade do Oeste do Paraná. Foz do Iguaçu - PR, 2009.

TEBCHIRANI, Tárík Linhares. **Manutenção Classe Mundial - Manutenção Preditiva por Análise de Vibrações.** Disciplina Projetos V, CEFET-PR, 2003.

TREVISAN, R. **Utilização de medições ultrassônicas de vibração e da emissão acústica para implantação de lubrificação base-condição visando a prevenção de falhas em mancais de rolamentos.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

TSU, T. C.; MUGELE, R. A.; MCCLINTOCK, F. A. **A Statistical Distribution Function of Wide Applicability.** *Journal of Applied Mechanics*-Transactions of the Asme, v. 19, n. 2, p. 233-234, 1952.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Vibração e ruído em manutenção preditiva.** 2010. Disponível em: <http://www.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_12.pf>. Acesso em: 10 fev. 2017.

WAHED, Abdus S.; LUONG, The Minh; JEONG, Jong-Hyeon. **A new generalization of Weibull distribution with application to a breast cancer data set.** *Statistics in medicine*, v. 28, n. 16, p. 2077-2094, 2009. <https://doi.org/10.1002/sim.3598>

WANG, Tianyang et al. **Compound faults detection in gearbox via meshing resonance and spectral kurtosis methods.** *Journal of Sound and Vibration*, v. 392, p. 367-381, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.12.041>

WANG, Yanxue et al. **Spectral kurtosis for fault detection, diagnosis and prognostics of rotating machines: A review with applications.** *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 66, p. 679-698, 2016.

WEIBULL, WALODDI. **Estimation of Distribution Parameters by a Combination of Best Linear Order Statistic Method and Maximum Likelihood**, USSAF AFML-TR-67-105, april, 1967.

WEIDLICH, F. **Avaliação da lubrificação de rolamentos de motores elétricos por ultrassom**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

WOLFINGER, Russ. **Covariance structure selection in general mixed models**. Communications in statistics-Simulation and computation, v. 22, n. 4, p. 1079-1106, 1993. <https://doi.org/10.1080/03610919308813143>

YA'CUBSOHN, R. V. **El Diagnostico de fallas por analisis vibratorio**. Editora Die Techik Ltda. São Paulo, 1983.

YANG, Bo-Suk et al. **Thermal image enhancement using bi-dimensional empirical mode decomposition in combination with relevance vector machine for rotating machinery fault diagnosis**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 38, n. 2, p. 601-614, 2013.

ZHAO, Dezun et al. **Compound faults detection of rolling element bearing based on the generalized demodulation algorithm under time-varying rotational speed**. Journal of Sound and Vibration, v. 378, p. 109-123, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.05.022>

GBR - Catálogo de peças, 2013. Disponível em:
<http://www.gbrparts.com/arquivo/catalogo/488e524543d3d5ae7ba28049e05df48a.pdf> 2013
Acesso: 20 mai. 2017

PCB Electronics - Catálogo de peças, 2017. Disponível em:
<https://www.pcb.com/products.aspx?m=352C33>. Acesso: 20 mai. 2017

ANEXO I

Especificações técnicas do acelerômetro utilizado

Model Number 352C33		ICP® ACCELEROMETER		Revision: H ECN #: 28610
Performance	ENGLISH	SI		OPTIONAL VERSIONS
Sensitivity(± 10 %)	100 mV/g	10.2 mV/(m/s ²)		Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.
Measurement Range	± 50 g pk	± 490 m/s ² pk		HT - High temperature, extends normal operation temperatures [3]
Frequency Range(± 5 %)	0.5 to 10,000 Hz	0.5 to 10,000 Hz		Frequency Range(5 %) 6 to 10,000 Hz 6 to 10,000 Hz
Frequency Range(± 10 %)	0.3 to 15,000 Hz	0.3 to 15,000 Hz		Frequency Range(10 %) 4.5 to 15,000 Hz 4.5 to 15,000 Hz
Resonant Frequency	± 50 kHz	± 50 kHz		Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz) 0.0009 g rms 0.009 m/s ² rms
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	0.00015 g rms	0.0015 m/s ² rms	[1]	Temperature Range(Operating) -65 to +325 °F -54 to +163 °C
Non-Linearity	± 1 %	± 1 %	[4]	Excitation Voltage 22 to 30 VDC 22 to 30 VDC
Transverse Sensitivity	± 5 %	± 5 %	[5]	Discharge Time Constant 0.07 to 0.15 sec 0.07 to 0.15 sec
Environmental				Spectral Noise(1 Hz) 107 µg/√Hz 1050 (µm/s ²)/√Hz
Overload Limit(Shock)	± 5000 g pk	± 49,000 m/s ² pk		Spectral Noise(10 Hz) 58 µg/√Hz 570 (µm/s ²)/√Hz
Temperature Range(Operating)	-65 to +200 °F	-54 to +93 °C	[3]	Spectral Noise(100 Hz) 41 µg/√Hz 400 (µm/s ²)/√Hz
Temperature Response	See Graph	See Graph	[3][6]	Spectral Noise(1 kHz) 9.8 µg/√Hz 96 (µm/s ²)/√Hz
Base Strain Sensitivity	0.003 g/µε	0.029 (m/s ²)/µε	[1]	Output Bias Voltage 10 to 15 VDC 10 to 15 VDC [2]
Electrical				Supplied Accessory : Model ACS-68 Single Axis Amplitude Response Calibration from 5 Hz to upper 5% plotted on dB scale replaces Model ACS-1
Excitation Voltage	18 to 30 VDC	18 to 30 VDC		J - Ground Isolated
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA		Frequency Range(5 %) 9 kHz 9 kHz
Output Impedance	≤ 200 ohm	≤ 200 ohm		Frequency Range(10 %) 14 kHz 14 kHz
Output Bias Voltage	7 to 12 VDC	7 to 12 VDC		Resonant Frequency ≥ 40 kHz ≥ 40 kHz
Discharge Time Constant	1.0 to 2.5 sec	1.0 to 2.5 sec		Electrical Isolation(Base) >10 ⁸ ohm >10 ⁸ ohm
Settling Time(within 10% of bias)	<10 sec	<10 sec		Size - Hex x Height 0.44 in x 0.67 in 11.2 mm x 17.0 mm
Spectral Noise(1 Hz)	39 µg/√Hz	380 (µm/s ²)/√Hz	[1]	Weight 0.21 oz 6.0 gm
Spectral Noise(10 Hz)	11 µg/√Hz	110 (µm/s ²)/√Hz	[1]	T - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE P1451.4
Spectral Noise(100 Hz)	3.4 µg/√Hz	33 (µm/s ²)/√Hz	[1]	TLA - TEDS LMS International - Free Format
Spectral Noise(1 kHz)	1.4 µg/√Hz	14 (µm/s ²)/√Hz	[1]	TLB - TEDS LMS International - Automotive Format
Physical				TLC - TEDS LMS International - Aeronautical Format
Sensing Element	Ceramic	Ceramic		TLD - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE 1451.4
Sensing Geometry	Shear	Shear		Temperature Range(Memory Access) -10 to +200 °F -23 to +93 °C
Housing Material	Titanium	Titanium		Excitation Voltage 20 to 30 VDC 20 to 30 VDC
Sealing	Hermetic	Hermetic		Output Bias Voltage 7.5 to 13 VDC 7.5 to 13 VDC
Size (Hex x Height)	0.44 in x 0.62 in	11.2 mm x 15.7 mm		W - Water Resistant Cable
Weight	0.20 oz	5.8 gm	[1]	Electrical Connector Sealed Integral Cable Side Sealed Integral Cable Side
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack		Electrical Connection Position Side Side
Electrical Connection Position	Side	Side		
Mounting Thread	10-32 Female	10-32 Female		
Mounting Torque	10 to 20 in-lb	113 to 226 N-cm		
	Typical Sensitivity Deviation vs Temperature			
CE [6]				
All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.				
NOTES:				
[1] Typical.				
[2] TEDS option adds 1.0 VDC to bias voltage.				
[3] 200°F to 325°F data valid with HT option only.				
[4] Zero-based, least-squares, straight line method.				
[5] Transverse sensitivity is typically ± 5%.				
[6] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.				
SUPPLIED ACCESSORIES:				
Model 080A Adhesive Mounting Base (1)				
Model 080A109 Petro Wax (1)				
Model 081B05 Mounting Stud (10-32 to 10-32) (1)				
Model ACS-1 NIST traceable frequency response (10 Hz to upper 5% point). (1)				
Model M081B05 Mounting Stud 10-32 to M6 X 0.75 (1)				
Entered	Engineer	Sales	Approved	Spec Number
Date: 4/15/08	Date: 4/15/08	Date: 4/15/08	Date: 4/15/08	13118
				Phone: 716-684-0001 Fax: 716-685-3886 E-Mail: vibration@pcb.com
3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043				

APÊNDICE I

Resultados dos critérios AIC e BIC

Tabela A3 - Análise dos sintomas vibroacústicos via TDA dos sinais de aceleração

Fonte: elaborado pela autora

Nº Sintoma	Sintoma	Rolamento 2 - Ac 90°				Rolamento 2 - Ac 45°				Rolamento 3 - Ac 90°				Rolamento 3 - Ac 45°				Rolamento 4 - Ac 90°				Rolamento 4 - Ac 45°			
		AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal																				
28	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 40 Hz	9906,68	9960,81	9917,51	9971,64	11183,5	11036,9	11194,3	11047,7	52942,7	53152	52956,5	53165,8	47387	47517,2	47400,8	47531,1	17644,6	17598,5	17656,7	17610,6	18091,7	18060,4	18103,8	18072,5
29	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 200 Hz	9539,83	9637,67	9550,65	9648,49	11120	11047,6	11130,8	11058,4	51870	52224,6	51883,9	52238,4	45922,1	46113,2	45936	46127	16897,7	17013,3	16909,8	17025,4	17358,5	17467,6	17370,6	17479,7
30	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 1.000 Hz	9118,62	9190,02	9129,45	9200,84	11242	11269	11252,8	11279,9	50734,2	51148,9	50748,1	51162,7	43346,7	43636,9	43362,5	43650,8	15856,2	16130,5	15868,3	16142,6	16316,7	16579,1	16328,8	16591,2
31	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 2.000 Hz	8967,13	9007,25	8977,96	9018,07	11269	11326	11279,8	11336,9	50504,5	50933,2	50518,3	50947	42762,3	43070,6	42776,2	43084,4	15482,7	15809,4	15494,8	15821,5	15855,3	16185,3	15867,4	16197,4
32	TDA filtrado na banda de 1.000 Hz a 4.000 Hz	8158,71	8233,49	8169,53	8234,31	12056,4	12254,3	12067,2	12265,1	49784,6	49428,1	49798,4	49441,9	36469	38148	36482,9	38161,8	11991,3	12562,1	12003,4	12574,2	12723,1	13351,9	12735,2	13263,9
33	TDA filtrado com filtro passa-alta em 500 Hz	8224,66	8008,83	8235,48	8019,66	11807,7	11999,9	11818,5	12010,8	49583,9	49528,9	49597,7	49542,7	37592,6	38987,1	37606,4	39000,9	12474,1	13393,9	12486,2	13406	12883,3	13611	12895,4	13623,1
34	TDA filtrado com filtro passa-alta em 1.000 Hz	8076,63	7760,9	8087,46	7771,72	11995,2	12211,8	12010,1	12222,6	49408,4	49060,8	49422,3	49074,7	35811	37605,7	35824,9	37619,5	11498,5	12243,8	11510,6	12255,9	12452,3	12882,5	12464,4	12894,6
35	TDA filtrado com filtro passa-alta em 2.000 Hz	7954,83	7574,27	7965,65	7585,09	12181,5	12396,2	12192,4	12407,1	49176,5	48495	49190,3	48508,9	33824,8	36086,4	33838,6	36100,2	10788,9	10884,6	10801	10896,7	12438,1	12404,9	12450,2	12417
36	TDA filtrado com filtro passa-alta em 3.000 Hz	7908,22	7511,33	7919,04	7522,15	12284,2	12490,9	12295	12501,7	49009,5	48106,3	49023,4	48120,2	32254,8	34814,1	32268,6	34827,9	10594,8	10185,2	10606,9	10197,3	12590,6	12334,9	12602,7	12347
37	TDA filtrado com filtro passa-alta em 4.000 Hz	7891,99	7501,31	7902,81	7512,13	12359,5	12553	12370,3	12563,8	48894,1	47803	48907,9	47816,8	30867,2	33610,1	30881	33623,9	10581,7	9849,92	10593,8	9862,01	12799,1	12424,6	12811,2	12436,7
38	TDA filtrado com filtro passa-alta em 5.000 Hz	7898,95	7542,84	7909,77	7553,66	12425	12599	12435,8	12609,9	48825,2	47555,4	48839	47569,3	29694,8	32507	29708,7	32520,9	10680,1	9762,33	10692,2	9774,42	13111,2	12665,5	13123,3	12677,6
39	TDA filtrado com filtro passa-alta em 6.000 Hz	7945,08	7669,09	7955,9	7679,91	12490,8	12634,8	12501,6	12645,6	48805,5	47350,4	48819,3	47364,2	28925,2	31632,5	28939	31646,4	10855,2	9858,52	10867,3	9870,61	13625,9	13139,9	13638	13151,9
40	TDA filtrado com filtro passa-alta em 7.000 Hz	8118,46	7997,62	8129,28	8008,44	12567,9	12660,8	12578,7	12671,6	48857,6	47193,7	48871,4	47207,6	29069,2	31381,2	29083	31395	11018,9	10059,4	11030,9	10071,5	14575,9	14085,5	14588	14097,6
41	Nível RMS do TDA global	8721,39	8723,52	8732,21	8734,34	11298,8	11399,6	11309,6	11410,5	50173,4	50598,1	50187,2	50611,9	42055,2	42441,7	42069,1	42455,5	14660	15134,5	14672,1	15146,6	14747,9	15220,4	14760	15232,5
42	Diferença entre o nível RMS do sinal global e o nível RMS do TDA global	7516,17	7822,72	7526,99	7833,54	9270,39	11577,4	9281,21	11588,3	41212,5	47356,9	41226,4	47370,7	29343,9	31024,3	29357,7	31038,1	10120,2	9576,87	10132,3	9588,96	12320,7	12909	12332,8	12921,1
43	Razão entre o nível RMS do sinal global e o nível RMS do TDA global	6270,75	7083,68	6281,57	7094,5	6807,97	7014,3	6818,79	7025,12	40374,6	40374,6	40246,1	40388,4	40579,9	40544,3	40593,7	40558,1	15030,5	15278,6	15042,6	15290,7	14427	14811,7	14439,1	14823,7
44	Nível RMS do sinal global	7354,48	7808,64	7365,3	7819,47	9166,36	11508	9177,18	11518,9	40113,3	47295,6	40127,1	47309,5	23344,7	29257,6	23358,5	29271,5	7758,11	7570,96	7770,2	7583,05	11090,5	12320,7	11102,6	12332,8

Tabela A4 - Análise dos sintomas vibroacústicos via TDA dos sinais de velocidade

Fonte: elaborado pela autora

Nº Sintoma	Sintoma	Rolamento 2 - Ac 90°				Rolamento 2 - Ac 45°				Rolamento 3 - Ac 90°				Rolamento 3 - Ac 45°				Rolamento 4 - Ac 90°				Rolamento 4 - Ac 45°									
		AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal																						
45	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 40 Hz	9477,61	9421,2	9488,43	9432,02	11525,8	11002,9	11536,6	11013,7	5353,2	51902,6	53567	51916,4	45344,3	45543,8	45358,1	45557,6	16836	16916,6	16848,1	16928,7	17310,3	17389,8	17322,4	17401,8						
46	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 200 Hz	9339,77	9455,66	9350,59	9469,48	11580,8	11120,5	11591,6	11131,3	53406,1	51801,1	53419,9	51814,9	45055,6	45448,9	45069,4	45462,7	16554,4	16817,5	16566,5	16829,6	16892,4	17183,3	16904,5	17195,4						
47	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 1.000 Hz	9125,03	9187,51	9135,85	9198,33	11820,1	11372,1	11831	11383	52916,5	50977,5	52930,3	50991,3	42527,8	43400,4	42541,7	43414,2	15719,9	16201	15732	16213,1	16089,2	16590,5	16101,3	16602,6						
48	TDA filtrado com filtro passa-baixa em 2.000 Hz	9063,69	9081,24	9074,52	9092,06	11858,4	11406,1	11869,3	11416,9	52829,3	50821,5	52843,1	50835,3	41984	42964,8	41997,8	42978,6	15548,3	16063	15560,4	16075,1	15901,5	16446,8	15913,6	16458,9						
49	TDA filtrado na banda de 1.000 Hz a 4.000 Hz	8678,17	8252,19	8688,99	8263,01	12592	12128,8	12602,8	12139,7	52540,7	49780,4	52554,5	49794,2	36842,1	38792	36856	38805,9	13773,7	14538,5	13785,8	14550,6	13973,7	14910,5	13985,8	14922,6						
50	TDA filtrado com filtro passa-alta em 500 Hz	8799,57	8586,19	8810,39	8597,01	12384,3	11931,1	12395,1	11941,9	52638	50105,6	52651,8	50119,4	38609	40258,6	38622,9	40272,4	14416,8	15221,2	14428,9	15233,3	14692,1	15577,9	14704,2	15590						
51	TDA filtrado com filtro passa-alta em 1.000 Hz	8712,65	8363,52	8723,47	8374,34	12525,8	12063,1	12536,6	12074	52582,9	49881,7	52596,7	49895,5	37428,6	39279,9	37442,4	39293,7	13938,2	14762,7	13950,3	14774,8	14147,8	15094,8	14159,9	15106,9						
52	TDA filtrado com filtro passa-alta em 2.000 Hz	8620,57	8174,98	8631,39	8185,8	12626,3	12152,2	12637,1	12163,1	52485,4	49693,1	52499,2	49706,9	36764,3	38744,3	36778,1	38758,2	13366,4	14224,9	13378,5	14237	13550	14507	13562	14519,1						
53	TDA filtrado com filtro passa-alta em 3.000 Hz	8564,07	8084,8	8574,9	8095,62	12669,5	12187,5	12680,3	12198,3	52415,4	49592,7	52429,3	49606,5	36566,5	38599,1	36580,3	38613	12972,3	13875,3	12984,4	13887,4	13207	14134,7	13219	14146,8						
54	TDA filtrado com filtro passa-alta em 4.000 Hz	8523,74	8020,93	8534,56	8031,75	12694,7	12204,9	12705,5	12215,7	52363,8	49513,6	52377,6	49527,5	36437,9	38511,6	36451,7	38525,4	12653	13603,2	12665,1	13615,3	12954,6	13857	12966,7	13869,1						
55	TDA filtrado com filtro passa-alta em 5.000 Hz	8492,35	7967,49	8503,17	7978,31	12710,9	12212,5	12721,7	12223,3	52323,9	49436,1	52337,7	49449,9	36293,1	38411,9	36306,9	38425,7	12382,5	13374,8	12394,6	13386,9	12752	13632,2	12764,1	13644,3						
56	TDA filtrado com filtro passa-alta em 6.000 Hz	8466,03	7921,17	8476,86	7932	12719,9	12210,6	12730,7	12221,4	52294,2	49349,2	52308	49363	36089,4	38266,4	36103,2	38280,3	12158,8	13181	12170,9	13193,1	12595,7	13448,3	12607,8	13460,4						
57	TDA filtrado com filtro passa-alta em 7.000 Hz	8442,93	7884,35	8453,75	7895,18	12715,5	12189,9	12726,3	12200,8	52279,7	49242,8	52293,5	49256,6	35783	38041,6	35796,8	38055,4	11992,5	13027,5	12004,6	13039,6	12503,6	13312,3	12515,6	13324,4						
58	Nível RMS do TDA global	9021,75	9009,8	9032,57	9020,62	11878,9	11423,3	11889,7	11434,1	52779,1	50744,6	52793	50758,4	41734,4	42766,1	41748,2	42779,9	15417,6	15963,5	15429,7	15975,6	15718,2	16312,7	15730,3	16324,8						
59	Diferença entre o nível RMS do sinal global e o nível RMS do TDA global	8675,35	7862,23	8686,18	7873,06	11905,2	11506,7	11916	11517,5	50114,5	47346,4	50128,3	47360,2	31282,1	31071,3	31295,9	31085,2	11637,2	9753,38	11649,2	9765,47	12244,9	13028,1	12256,9	13040,2						
60	Razão entre o nível RMS do sinal global e o nível RMS do TDA global	6837,35	7399,23	6848,17	7410,06	7097,42	7307,46	7108,24	7318,28	41172,1	41120,5	41185,9	41134,3	41315,6	41147,6	41329,4	41161,4	15788,1	15890,6	15800,2	15902,7	15489,9	15670,7	15502	15682,8						

Tabela A5 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados às bandas de oitava para sinais de aceleração

Fonte: elaborado pela autora

Nº Sintoma	Sintoma	Rolamento 2 - Ac 90°				Rolamento 2 - Ac 45°				Rolamento 3 - Ac 90°				Rolamento 3 - Ac 45°				Rolamento 4 - Ac 90°				Rolamento 4 - Ac 45°							
		AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal																				
61	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 1º harmônico	8252,98	8027,92	8263,8	8038,74	10813,1	11358,3	10823,9	11369,1	47603,6	47711,6	47617,4	47725,4	32674,6	33870,8	32688,4	33884,6	8586,52	8006,4	8598,61	8018,49	10850,5	12972,1	10862,6	12984,2	10850,5	12972,1	10862,6	12984,2
62	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 2º harmônico	8236,45	8045,24	8247,28	8056,06	10355,3	10799	10366,1	10809,8	46343,4	47115,2	46357,2	47129	32625,9	32976,4	32639,7	32990,2	12104,8	11512,8	12116,9	11524,9	12500,7	13469,8	12512,8	13481,9	12500,7	13469,8	12512,8	13481,9
63	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 4º harmônico	8275,25	8037,24	8286,08	8048,06	10482,7	11407	10493,5	11417,8	45431,7	47002,9	45445,5	47016,7	31947,6	31341,7	31961,4	31355,6	8526,76	7976,07	8538,85	7990,17	12237,2	13053	12249,3	13065,1	12237,2	13053	12249,3	13065,1
64	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 8º harmônico	8178,16	7917,11	8188,98	7927,93	10578,7	11966,8	10589,5	11977,6	44390,6	47453,2	44404,4	47467	28898,3	28811,8	28912,1	28825,6	7680,61	7563,59	7692,7	7274,68	11183,6	12004,4	11195,7	12016,5	11183,6	12004,4	11195,7	12016,5
65	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 16º harmônico	7720,7	7484,86	7731,52	7495,68	10820,9	12227,6	10831,8	12238,4	44669,2	47482,6	44683	47496,4	23775,2	26154,4	23789	26168,2	8392,71	7864,03	8404,8	7876,12	11486,7	12134	11498,8	12146,1	11486,7	12134	11498,8	12146,1
66	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 32º harmônico	7625,57	7338,13	7636,39	7348,95	11156,5	12457,2	11167,3	12468	46935,4	47678	46949,2	47691,8	27414,7	30608,5	27428,6	30622,3	10575,1	10391	10587,2	10403,1	12556,1	12893,2	12568,2	12905,3	12556,1	12893,2	12568,2	12905,3
67	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 64º harmônico	8712,65	8363,52	8723,47	8374,34	12525,8	12063,1	12536,6	12074	52582,9	49881,7	52596,7	49895,5	37428,6	39279,9	37442,4	39293,7	13938,2	14762,7	13950,3	14774,8	14147,8	15094,8	14159,9	15106,9	14147,8	15094,8	14159,9	15106,9
68	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado ao 128º harmônico	7513,1	7241,27	7523,92	7252,09	11445,8	12630,2	11456,7	12641	47449,8	47768,2	47463,7	47782	29451,8	32965	29465,7	32978,8	10147	9599,98	10159,1	9612,07	12419,7	12401,9	12431,8	12414	12419,7	12401,9	12431,8	12414
69	Nível RMS do sinal filtrado na banda entre a frequência fundamental e 8.100 Hz	7348,07	7580,87	7358,9	7591,7	9397,03	11470,4	9407,86	11481,2	40369,3	47256,7	40383,1	47270,5	23740,5	28992,4	23754,4	29006,2	7734,6	7550,25	7746,69	7562,34	10879,6	12102,1	10891,7	12114,1	10879,6	12102,1	10891,7	12114,1
70	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado a % de harmônico	8754,79	8765,46	8765,61	8776,28	11093,9	11457,7	11104,7	11468,6	48547	48321,3	48560,8	48335,1	33810,7	35607,7	33833,5	35621,5	8788,04	8132,47	8800,13	8144,56	11847,5	14257,8	11859,6	14269,9	11847,5	14257,8	11859,6	14269,9
71	Nível RMS do sinal com filtro de oitava aplicado a % de harmônico	9518,85	9648,72	9529,68	9659,54	11450,5	11759,3	11461,3	11770,1	49716,9	49441,9	49730,7	49455,7	36017,7	38029,3	36031,6	38043,1	9053,32	8350,79	9065,41	8362,88	13321,3	15709,7	13333,4	15721,8	13321,3	15709,7	13333,4	15721,8

Tabela A7 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados aos harmônicos do motor elétrico

Fonte: elaborado pela autora

Nº Sintoma	Sintoma	Rolamento 2 - Ac 90°			Rolamento 2 - Ac 45°			Rolamento 3 - Ac 90°			Rolamento 3 - Ac 45°			Rolamento 4 - Ac 90°			Rolamento 4 - Ac 45°									
		AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull								
83	Primeiro conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator.	10261,3	9853,11	10272,1	9863,93	14250	15316,5	14260,8	15327,4	57777,1	58206,3	57790,9	58220,1	37835,9	41993,7	37849,7	42007,5	13902	13605,5	13914,1	13617,6	16072,4	17462,2	16084,5	17474,3	
84	Segundo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator.	10209	10242,6	10219,8	10253,4	14745,1	15437,8	14755,9	15448,6	60733,3	60751,6	60747,2	60765,4	50343	52838,6	50356,8	52852,4	16065,2	15673,6	16077,3	15685,7	18114	17970	18126,1	17982,1	
85	Terceiro conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator.	9967,74	9444,58	9978,56	9455,4	14682	15319,5	14692,8	15330,4	59058,3	58915,6	59072,1	58929,5	43117,9	47852,4	43131,7	47670	14588,5	13644,1	14600,6	13656,2	16567,4	16331,4	16579,4	16247,6	
86	Quarto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator.	10043,8	9626,54	10054,6	9637,36	14748,5	15397,5	14759,3	15408,4	57970	57549,3	57983,9	57563,1	41045,9	41253,8	41059,7	41267,6	15791,5	14776,7	14770,6	14788,8	16865,4	16331,4	16877,5	16343,5	
87	Quinto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator.	10494,4	10577,3	10505,2	10588,1	14808,1	15259,2	14818,9	15270	58015,2	57447	58029,1	57460,8	43395,8	42884,3	43409,6	42698,1	17953,3	17470,6	17965,4	17482,7	16865,4	16331,4	16877,5	16343,5	
88	Sexto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator.	11571,7	11719,4	11582,5	11730,2	14923,9	15220,9	14934,7	15231,8	58977,3	58487,7	58991,1	58501,5	44805,1	46877,3	44818,9	46891,2	17663	17236,2	17675,1	17248,3	22323,2	22147,2	22335,3	22159,3	
89	Sétimo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator.	8712,65	8363,52	8723,47	8374,34	12525,8	12063,1	12536,6	12074	52582,9	49881,7	52596,7	49895,5	37428,6	39279,9	37442,4	39293,7	13938,2	14762,7	13950,3	14774,8	14447,8	14147,8	15094,8	14159,9	15106,9
90	Oitavo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do estator.	8379,89	7398,83	8390,71	7409,65	12623	12230,5	12633,9	12241,4	50429,2	47419,8	50443,1	47433,6	23031,7	23994,2	23045,5	23408,1	9076,14	8720,61	9088,24	8732,7	10984,4	12351,2	10996,5	12363,3	
91	Primeiro conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor.	10234,8	9769,44	10245,6	9780,26	14466,8	15460	14477,6	15470,8	58314,6	58423,3	58328,4	58437,1	39578,7	44043,6	39592,5	44057,5	16573,4	16367,3	16585,5	16379,4	17715,1	18073,8	17727,2	18085,9	
92	Segundo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor.	9993,62	9785,3	10004,4	9796,12	14726,2	15364,6	14737,1	15375,4	60151	60247,5	60164,8	60261,3	48071,5	51393,9	48085,3	51407,7	14681,8	14022,6	14693,9	14034,7	17090,7	16944,4	17102,8	16956,5	
93	Terceiro conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor.	10038,9	9560,18	10049,7	9571,01	14731,7	15400,1	14742,5	15410,9	58055,6	57607,6	58069,5	57621,5	40113,3	42189,6	40127,2	42203,5	15716,4	14656,2	15728,5	14668,3	16787,7	16206,2	16799,8	16218,3	
94	Quarto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor.	10494,4	10577,3	10505,2	10588,1	14808,1	15259,2	14818,9	15270	58015,2	57447	58029,1	57460,8	43395,8	42884,3	43409,6	42698,1	17953,3	17470,6	17965,4	17482,7	16865,4	16331,4	16877,5	16343,5	
95	Quinto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor.	12055,9	12229,6	12066,7	12240,4	15026,5	15254,2	15037,3	15265	59447,6	59165	59461,4	59178,9	46942,2	49350,4	46956	49364,2	16979,7	16637,9	16991,8	16650	22447,3	22287,2	22459,4	22299,3	
96	Sexto conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor.	9021,75	9009,8	9032,57	9020,62	11878,9	11423,3	11889,7	11434,1	52779,1	50744,6	52793	50758,4	41734,4	42766,1	41748,2	42779,9	15417,6	15963,5	15429,7	15975,6	15718,2	16312,7	15730,3	16324,8	
97	Sétimo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor.	8675,35	7862,23	8686,18	7873,06	11905,2	11506,7	11916	11517,5	50114,5	47346,4	50128,3	47360,2	31282,1	31071,3	31295,9	31085,2	11637,2	9753,38	11649,2	9765,47	12244,9	13028,1	12256,9	13040,2	
98	Oitavo conjunto de harmônicos de passagem das ranhuras do rotor.	6837,35	7399,23	6848,17	7410,06	7097,42	7307,46	7108,24	7318,28	41172,1	41120,5	41185,9	41134,3	41315,6	41147,6	41329,4	41161,4	15788,1	15890,6	15800,2	15902,7	15489,9	15670,7	15502	15682,8	

Tabela A8 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados ao envelope do sinal

Fonte: elaborado pela autora

Nº Sintoma	Sintoma	Rolamento 2 - Ac 90°				Rolamento 2 - Ac 45°				Rolamento 3 - Ac 90°				Rolamento 3 - Ac 45°				Rolamento 4 - Ac 90°				Rolamento 4 - Ac 45°			
		AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal
99	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-baixa em 100 Hz	9662,25	9555,49	9673,07	9566,31	11116,9	11127,7	11749,9	49373	48838,7	49386,8	48852,5	35945,7	36834,6	35959,5	36848,5	12919	11962,6	12931,1	11974,7	14435,8	15545,4	14447,9	15557,5	
100	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-baixa em 100 Hz	6354,91	10450,5	6365,73	10461,3	9746,53	12175,2	9757,36	50071,4	40298,2	50085,2	34392,8	39223,2	34406,6	39237,1	10840,5	10339,1	10852,6	10351,2	9885,2	16551,1	9957,34	16563,2		
101	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 1.000 Hz e 3.000 Hz	7726,14	7579,44	7736,96	7590,26	11528,7	13027,9	11539,5	48883,3	48827,4	48883,3	31085	33376,5	31098,8	33392,3	13332,5	13226,6	13344,6	13240,7	14666,2	14684,9	14678,3	14697		
102	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 1.000 Hz e 3.000 Hz	5607,74	8283,03	5618,56	8293,85	10101,4	12854,7	10112,2	49276,3	38336,3	49290,1	28022,4	33690,3	28056,2	33704,2	7306,95	13650	7319,04	13662,1	9933,82	15484	9945,91	15496,1		
103	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 2.000 Hz e 6.000 Hz	7800,19	7888,54	7811,01	7899,36	11851	13201,2	11861,8	49356	49842,3	49369,8	35579,6	37522,5	35593,4	37536,3	13413,1	13220,8	13425,2	13232,9	14717,9	14704,1	14730	14716,2		
104	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-banda entre 2.000 Hz e 6.000 Hz	6717,68	9006,26	6728,51	9017,08	10206,8	12897,4	10217,7	49827,8	39927,6	49841,6	33177,6	37953,1	33191,4	37966,9	8075,69	14717,2	8087,78	14729,3	10245,8	16133,3	10257,9	16145,4		
105	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-alta em 2.000 Hz	7828,97	7899,81	7839,79	7910,63	11777	13166,1	11787,8	49058,5	48926,6	49072,4	48940,4	33663,4	35582,4	33677,3	13470,5	13295,5	13482,6	13307,5	14951,5	14954	14963,6	14966,1		
106	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-alta em 2.000 Hz	6992,17	9199,32	7003	9210,14	10281,4	12897,8	10292,2	49453,7	39172,5	49557,5	31879,3	36433,8	31893,1	36447,6	9641,53	15161,2	9653,62	15173,3	11216,1	16620,8	11228,2	16632,9		
107	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-alta em 4.000 Hz	7807,63	7941,8	7818,45	7952,62	12049,9	13184,6	12060,7	48016,7	48487,4	48030,5	48501,2	31857,1	34442,3	31870,9	34456,1	13225,8	12855,1	13237,9	12867,2	14856,7	14795,7	14868,7	14807,8	
108	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-alta em 4.000 Hz	7082,75	9456,16	7093,58	9476,98	10311	12955	10321,8	49476,1	39605,7	49489,9	30395,6	35907,4	30409,4	35921,2	9141,23	14986,1	9153,32	14998,2	16782,4	16782,4	16782,4	16794,5		
109	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-alta em 6.000 Hz	8259,72	8418,64	8270,54	8429,46	12287,1	13143,1	12297,9	47686,9	48090,4	47700,7	48104,2	32742	33679,8	32755,8	13946,1	13545,3	13958,2	13557,4	16306,9	16223,6	16319	16235,7		
110	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-alta em 6.000 Hz	7358,83	9673,39	7369,66	9684,21	10497,5	12991,7	10508,3	40573	49358,2	49358,2	30295,5	35587,7	30309,3	35601,6	13584,4	15085	13966,5	15097,1	12180,7	17596,9	12197,7	17609		
111	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-alta em 8.000 Hz	9370,65	9500,89	9381,47	9511,71	12646,7	13027,5	12657,5	48453,8	47725,2	48467,6	47739,1	33395,8	34915	33409,6	34928,9	13600,5	13218	13612,6	13230,1	18405,3	18261,9	18417,4	18274	
112	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-alta em 8.000 Hz	9737,32	9824,87	9748,14	9835,69	11891,5	13033,6	11902,3	47666,3	48494,1	47660,2	48507,9	36499,3	37109	36513,1	37122,8	14623,5	14353,8	14635,6	14365,9	18235,5	18247,6	18707,3		
113	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-alta em 10.000 Hz	9370,65	9500,89	9381,47	9511,71	12646,7	13027,5	12657,5	48453,8	47725,2	48467,6	47739,1	33395,8	34915	33409,6	34928,9	13600,5	13218	13612,6	13230,1	18405,3	18261,9	18417,4	18274	
114	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-alta em 10.000 Hz	9737,32	9824,87	9748,14	9835,69	11891,5	13033,6	11902,3	47666,3	48494,1	47660,2	48507,9	36499,3	37109	36513,1	37122,8	14623,5	14353,8	14635,6	14365,9	18235,5	18247,6	18707,3		
115	Nível de energia do envelope filtrado com filtro passa-alta em 12.000 Hz	9370,65	9500,89	9381,47	9511,71	12646,7	13027,5	12657,5	48453,8	47725,2	48467,6	47739,1	33395,8	34915	33409,6	34928,9	13600,5	13218	13612,6	13230,1	18405,3	18261,9	18417,4	18274	
116	Diferença entre máximo e mínimo do envelope filtrado com filtro passa-alta em 12.000 Hz	9737,32	9824,87	9748,14	9835,69	11891,5	13033,6	11902,3	47666,3	48494,1	47660,2	48507,9	36499,3	37109	36513,1	37122,8	14623,5	14353,8	14635,6	14365,9	18235,5	18247,6	18707,3		

Tabela A9 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados a regiões do espectro
Fonte: elaborado pela autora

Nº sintoma	Sintoma	Rolamento 2 - Ac 90°						Rolamento 2 - Ac 45°						Rolamento 3 - Ac 90°						Rolamento 3 - Ac 45°						Rolamento 4 - Ac 90°						Rolamento 4 - Ac 45°					
		AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	BIC Normal						
117	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 40 Hz	9744,97	9569,93	9755,8	9580,75	11027,9	11768,9	11038,7	11779,7	49308,1	48624,2	49321,9	48638	34475,6	35659,6	34489,4	35673,4	9396,88	8718,8	9408,97	8730,89	13754,2	15183,7	13766,3	15195,8												
118	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 200 Hz	8868,92	8630,54	8879,74	8641,36	10210,7	11338,3	10221,5	11349,2	46075,1	47425,4	46088,9	47439,2	33715,3	32277,6	33729,1	32291,4	9283,58	8634,65	9295,67	8646,74	13505,1	13648,9	13517,2	13661												
119	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 1.000 Hz	8015,08	8128,24	8025,9	8139,07	9526,33	11422,3	9537,15	11433,1	41398,2	47273,8	41412	47287,6	27024	29579,4	27037,8	29593,3	8359,79	7865,14	8371,88	7877,23	11716,4	12795,7	11728,5	12807,8												
120	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 2.000 Hz	7739,92	7979,38	7750,74	7990,2	9349,54	11459,9	9360,36	11470,7	40663,1	47290,2	40676,9	47304	25042,8	29255,4	25056,7	29269,2	8313,96	7891,75	8326,05	7903,84	11385,9	12631,5	11398	12643,6												
121	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa entre 1.000 e 4.000 Hz	7490,08	7233,18	7500,9	7244	10853,8	12322,5	10864,6	12333,3	46214,3	47509,8	46228,2	47523,6	27077,9	29328,6	27091,7	29342,5	9513,79	9326,62	9525,88	9338,71	12198	12349,7	12210,1	12361,8												
122	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 500 Hz	7543,71	7290,95	7554,63	7301,77	10323,6	12052,7	10334,4	12063,5	43685	47382,5	43698,8	47396,4	29214,3	28343,9	29228,1	28357,8	8029,21	7887	8041,3	7899,09	11930,3	11937,8	11942,4	11949,9												
123	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 1.000 Hz	7419,29	7175,94	7430,11	7186,77	10723,2	12268,8	10734	12279,6	45618,7	47378,8	45632,5	47394,7	27662,3	28977,9	27676,1	28991,8	8904,24	8618,27	8916,33	8630,36	12374,3	12184,1	12386,4	12196,2												
124	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 2.000 Hz	7396,37	7164,77	7407,2	7175,59	11122,9	12466,2	11133,7	12477	46298,5	47350,2	46312,4	47364	27054,2	30155,1	27068	30168,9	9846,83	9343,66	9858,92	9355,75	12488,6	12486,1	12500,7	12498,2												
125	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 3.000 Hz	7446,92	7225,26	7457,74	7236,08	11353,7	12575,7	11364,5	12586,5	46298,4	47289,6	46312,2	47303,4	27291,1	30675,8	27304,9	30689,6	10230,9	9600,2	10243	9612,29	12688,3	12621,7	12700,4	12633,8												
126	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 4.000 Hz	7505,62	7300,45	7516,45	7311,27	11526,9	12654	11537,8	12664,9	46312,3	47210,8	46326,2	47224,6	27438,4	30812	27452,2	30825,8	10479,8	9764,19	10491,9	9776,29	12885,6	12758,7	12897,7	12770,8												
127	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 5.000 Hz	7580,4	7401,71	7591,22	7412,53	11684,2	12718,5	11695,1	12729,4	46339,1	47128,2	46353	47142	27568	30784,5	27581,8	30798,3	10720,1	9949,97	10732,2	9963,06	13171,9	12992,5	13184	13004,6												
128	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 6.000 Hz	7700,99	7572,41	7711,81	7583,23	11852,3	12776,8	11863,1	12787,6	46437,9	47051,2	46451,7	47065	29232,6	30800,1	29237,4	30813,9	10985,2	10188,9	10997,3	10201	13657	13435,5	13669,1	13447,5												
129	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 7.000 Hz	7972,26	7939,45	7983,08	7950,27	12064,7	12832,7	12075,5	12843,5	46725,9	47001,6	46739,7	47015,4	29011	31261,8	29024,8	31275,6	11228,6	10450,1	11240,7	10462,1	14574,1	14329,9	14586,2	14341,9												
130	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa entre 500 e 7.000 Hz	7559,3	7302,52	7570,12	7313,35	10335,6	12058,6	10346,4	12069,4	43758,8	47405,3	43772,7	47419,1	29250,7	28351,5	29264,5	28365,3	8054,59	7906,97	8066,68	7919,06	11840,5	11883,3	11852,6	11895,4												

Tabela A10 - Análise dos sintomas vibroacústicos relacionados a regiões específicas do espectro de frequência utilizando sinais de velocidade

Fonte: elaborado pela autora

Nº Sintoma	Sintoma	Rolamento 2 - Ac 90°						Rolamento 2 - Ac 45°						Rolamento 3 - Ac 90°						Rolamento 3 - Ac 45°						Rolamento 4 - Ac 90°						Rolamento 4 - Ac 45°																	
		AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal	AIC Weibull	AIC Normal	BIC Weibull	BIC Normal																
131	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 40 Hz	8764,17	8129,56	8775	8140,38	11528,2	11092,2	11539	11103	49871,6	47247,2	49885,5	47261,1	30898,5	32860	30912,3	32873,8	10211,2	9209,37	10223,3	9221,46	9932,73	13297,3	9944,82	13309,4	8764,17	8129,56	8775	8140,38	11528,2	11092,2	11539	11103	49871,6	47247,2	49885,5	47261,1	30898,5	32860	30912,3	32873,8	10211,2	9209,37	10223,3	9221,46	9932,73	13297,3	9944,82	13309,4
132	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 200 Hz	8727,17	8066,07	8737,99	8076,89	11585,8	11161,1	11596,6	11171,9	49926,5	47111,5	49940,3	47125,4	29315,7	31418,1	29329,6	31431,9	9329,37	8387,54	9341,46	8399,63	9575,6	13018,3	9587,69	13030,4	8727,17	8066,07	8737,99	8076,89	11585,8	11161,1	11596,6	11171,9	49926,5	47111,5	49940,3	47125,4	29315,7	31418,1	29329,6	31431,9	9329,37	8387,54	9341,46	8399,63	9575,6	13018,3	9587,69	13030,4
133	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 1.000 Hz	8693,76	7950,24	8704,58	7961,07	11800,2	11400,9	11811	11411,7	50089,6	47210,6	50103,4	47224,4	26183,1	29350,8	26196,9	29364,6	8461,05	7618,85	8473,14	7630,94	9171,5	12517	9183,59	12529	8693,76	7950,24	8704,58	7961,07	11800,2	11400,9	11811	11411,7	50089,6	47210,6	50103,4	47224,4	26183,1	29350,8	26196,9	29364,6	8461,05	7618,85	8473,14	7630,94	9171,5	12517	9183,59	12529
134	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-baixa em 2.000 Hz	8679,28	7892,53	8690,1	7903,35	11830,8	11435,1	11841,6	11445,9	50113,4	47231,3	50127,2	47245,1	25558,2	29029,3	25572	29043,1	8445,63	7597,73	8457,72	7609,82	9136,64	12449,1	9148,73	12461,2	8679,28	7892,53	8690,1	7903,35	11830,8	11435,1	11841,6	11445,9	50113,4	47231,3	50127,2	47245,1	25558,2	29029,3	25572	29043,1	8445,63	7597,73	8457,72	7609,82	9136,64	12449,1	9148,73	12461,2
135	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-banda entre 1.000 e 4.000 Hz	8592,07	7450,65	8602,89	7461,47	12527,4	12161,3	12538,2	12172,1	50598,7	47455,3	50612,5	47469,1	21765,8	27301,2	21779,7	27315	8682,29	7992,17	8694,38	8004,26	9581,66	12031	9593,75	12043,1	8592,07	7450,65	8602,89	7461,47	12527,4	12161,3	12538,2	12172,1	50598,7	47455,3	50612,5	47469,1	21765,8	27301,2	21779,7	27315	8682,29	7992,17	8694,38	8004,26	9581,66	12031	9593,75	12043,1
136	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 500 Hz	8625,94	7643,12	8636,76	7653,94	12332,7	11967,3	12343,5	11978,1	50479,6	47426,3	50493,5	47440,1	23058,7	27578,7	23072,5	27592,5	8267,82	7470,32	8279,91	7482,41	9052,89	12004,7	9064,98	12016,8	8625,94	7643,12	8636,76	7653,94	12332,7	11967,3	12343,5	11978,1	50479,6	47426,3	50493,5	47440,1	23058,7	27578,7	23072,5	27592,5	8267,82	7470,32	8279,91	7482,41	9052,89	12004,7	9064,98	12016,8
137	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 1.000 Hz	8596,47	7511,57	8607,29	7522,39	12466,3	12096,4	12477,1	12107,2	50585,1	47448,7	50598,9	47462,6	22159,3	27315,6	22173,1	27329,4	8453,37	7723,8	8465,46	7735,89	9350,42	11966,3	9362,52	11978,4	8596,47	7511,57	8607,29	7522,39	12466,3	12096,4	12477,1	12107,2	50585,1	47448,7	50598,9	47462,6	22159,3	27315,6	22173,1	27329,4	8453,37	7723,8	8465,46	7735,89	9350,42	11966,3	9362,52	11978,4
138	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 2.000 Hz	8543,14	7407,85	8553,96	7418,68	12568,6	12185,6	12579,4	12196,4	50656,1	47456,6	50669,9	47470,4	21691,9	27599,6	21705,7	27613,4	8629,98	8073,56	8642,07	8085,65	9900,75	11977,8	9912,84	11989,9	8543,14	7407,85	8553,96	7418,68	12568,6	12185,6	12579,4	12196,4	50656,1	47456,6	50669,9	47470,4	21691,9	27599,6	21705,7	27613,4	8629,98	8073,56	8642,07	8085,65	9900,75	11977,8	9912,84	11989,9
139	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 3.000 Hz	8496,81	7360,08	8507,63	7370,9	12618,2	12223,8	12629	12234,6	50691,3	47459,5	50705,1	47473,4	21649,7	27916,5	21663,5	27930,3	8659,97	8222,57	8672,06	8234,66	10262,6	11979,5	10274,7	11991,6	8496,81	7360,08	8507,63	7370,9	12618,2	12223,8	12629	12234,6	50691,3	47459,5	50705,1	47473,4	21649,7	27916,5	21663,5	27930,3	8659,97	8222,57	8672,06	8234,66	10262,6	11979,5	10274,7	11991,6
140	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 4.000 Hz	8459,69	7326,41	8470,51	7337,24	12651,7	12246,5	12662,5	12257,3	50719,6	47456,9	50733,4	47470,8	21682,6	28143,6	21696,5	28157,4	8607,09	8242,95	8619,18	8255,04	10485	11963,3	10497,1	11975,4	8459,69	7326,41	8470,51	7337,24	12651,7	12246,5	12662,5	12257,3	50719,6	47456,9	50733,4	47470,8	21682,6	28143,6	21696,5	28157,4	8607,09	8242,95	8619,18	8255,04	10485	11963,3	10497,1	11975,4
141	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 5.000 Hz	8429,06	7298,02	8439,89	7308,84	12679,1	12262,4	12689,9	12273,3	50750	47449,5	50763,8	47463,3	21720,4	28299,6	21734,3	28313,4	8531,38	8202,66	8543,47	8214,75	10636,2	11938	10648,3	11950,1	8429,06	7298,02	8439,89	7308,84	12679,1	12262,4	12689,9	12273,3	50750	47449,5	50763,8	47463,3	21720,4	28299,6	21734,3	28313,4	8531,38	8202,66	8543,47	8214,75	10636,2	11938	10648,3	11950,1
142	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 6.000 Hz	8402,11	7272,29	8412,93	7283,12	12705,4	12274,9	12716,2	12285,7	50790,6	47437,1	50804,4	47450,9	21739,4	28397,2	21753,2	28411,1	8477,12	8149,59	8489,21	8161,68	10762,9	11917,1	10775	11929,2	8402,11	7272,29	8412,93	7283,12	12705,4	12274,9	12716,2	12285,7	50790,6	47437,1	50804,4	47450,9	21739,4	28397,2	21753,2	28411,1	8477,12	8149,59	8489,21	8161,68	10762,9	11917,1	10775	11929,2
143	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-alta em 7.000 Hz	8376,67	7248,82	8387,49	7259,65	12735,8	12285,1	12746,6	12295,9	50857,4	47419,4	50871,3	47433,2	21719,8	28437,5	21733,6	28451,3	8472,45	8123,59	8484,54	8135,68	10905,1	11920,6	10917,2	11932,7	8376,67	7248,82	8387,49	7259,65	12735,8	12285,1	12746,6	12295,9	50857,4	47419,4	50871,3	47433,2	21719,8	28437,5	21733,6	28451,3	8472,45	8123,59	8484,54	8135,68	10905,1	11920,6	10917,2	11932,7
144	Nível de energia do sinal filtrado com filtro passa-banda entre 500 e 7.000 Hz	8624,69	7635,6	8635,51	7646,43	12341,3	11977	12352,1	11987,8	50483,2	47429,1	50497	47442,9	22999,1	27547,2	23012,9	27561	8283,07	7485	8295,16	7497,09	9063,84	12001,6	9075,94	12013,7	8624,69	7635,6	8635,51	7646,43	12341,3	11977	12352,1	11987,8	50483,2	47429,1	50497	47442,9	22999,1	27547,2	23012,9	27561	8283,07	7485	8295,16	7497,09	9063,84	12001,6	9075,94	12013,7

Tabela A11 - Análise dos sintomas relacionados às bandas de 1/3 de oitava entre 40 e 12.500 Hz

Fonte: elaborado pela autora

APÊNDICE II

Códigos desenvolvidos em MATLAB®

Apresentam-se, nesta seção, os códigos utilizados pela autora para cálculo dos sintomas vibroacústicos utilizando o software MATLAB®.

```
% AQUISIÇÃO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO USANDO PLACA NI9215

% Cálculo dos sintomas vibratórios para todos os sinais medidos

%% Inicialização das variáveis necessárias

numfiles_2 = 1654; %Número de arquivos de dados - Rolamento 2
numfiles_3 = 7436; %Número de arquivos de dados - Rolamento 3
numfiles_4 = 3120; %Número de arquivos de dados - Rolamento 4
npto = 16328; % Número de pontos da FFT
fa = 16382; %Frequência de aquisição
dt = 1/fa; %Cálculo do passo de tempo
N = 20; %Intervalo de aquisição
df = fa/(N*npto);
freq = 0:df:((N*npto/2)-1)*df;
mydata = zeros(1,5);
b = 1;
c = 1;
```

```
n_sint_t = 14;
n_sint_t_v = 13;
n_sint_td = 17;
n_sint_td_v = 16;
n_sint_oit = 11;
n_sint_oit_v = 11;
n_sint_m = 16;
n_sint_env = 18;
n_sint_ban = 14;
n_sint_ban_v = 14;
n_sint_oitterc = 25;

Stempo1_2 = zeros(1,n_sint_t);
Stempo_v1_2 = zeros(1,n_sint_t_v);
Stda11_2 = zeros(1,n_sint_td);
Stda1_v1_2 = zeros(1,n_sint_td_v);
Soitava1_2 = zeros(1,n_sint_oit);
Soitava_v1_2 = zeros(1,n_sint_oit_v);
Smotor1_2 = zeros(1,n_sint_m);
Senvelope1_2 = zeros(1,n_sint_env);
Sbanda1_2 = zeros(1,n_sint_ban);
Sbanda_v1_2 = zeros(1,n_sint_ban_v);
Soitterc1_2 = zeros(1,n_sint_oitterc);

Stempo2_2 = zeros(1,n_sint_t);
Stempo_v2_2 = zeros(1,n_sint_t_v);
Stda12_2 = zeros(1,n_sint_td);
Stda1_v2_2 = zeros(1,n_sint_td_v);
Soitava2_2 = zeros(1,n_sint_oit);
Soitava_v2_2 = zeros(1,n_sint_oit_v);
Smotor2_2 = zeros(1,n_sint_m);
Senvelope2_2 = zeros(1,n_sint_env);
Sbanda2_2 = zeros(1,n_sint_ban);
Sbanda_v2_2 = zeros(1,n_sint_ban_v);
Soitterc2_2 = zeros(1,n_sint_oitterc);
```

```
Stempo1_3 = zeros(1,n_sint_t);
Stempo_v1_3 = zeros(1,n_sint_t_v);
Stda11_3 = zeros(1,n_sint_td);
Stda1_v1_3 = zeros(1,n_sint_td_v);
Soitava1_3 = zeros(1,n_sint_oit);
Soitava_v1_3 = zeros(1,n_sint_oit_v);
Smotor1_3 = zeros(1,n_sint_m);
Senvelope1_3 = zeros(1,n_sint_env);
Sbanda1_3 = zeros(1,n_sint_ban);
Sbanda_v1_3 = zeros(1,n_sint_ban_v);
Soitterc1_3 = zeros(1,n_sint_oittec);

Stempo2_3 = zeros(1,n_sint_t);
Stempo_v2_3 = zeros(1,n_sint_t_v);
Stda12_3 = zeros(1,n_sint_td);
Stda1_v2_3 = zeros(1,n_sint_td_v);
Soitava2_3 = zeros(1,n_sint_oit);
Soitava_v2_3 = zeros(1,n_sint_oit_v);
Smotor2_3 = zeros(1,n_sint_m);
Senvelope2_3 = zeros(1,n_sint_env);
Sbanda2_3 = zeros(1,n_sint_ban);
Sbanda_v2_3 = zeros(1,n_sint_ban_v);
Soitterc2_3 = zeros(1,n_sint_oittec);

Stempo1_4 = zeros(1,n_sint_t);
Stempo_v1_4 = zeros(1,n_sint_t_v);
Stda11_4 = zeros(1,n_sint_td);
Stda1_v1_4 = zeros(1,n_sint_td_v);
Soitava1_4 = zeros(1,n_sint_oit);
Soitava_v1_4 = zeros(1,n_sint_oit_v);
Smotor1_4 = zeros(1,n_sint_m);
Senvelope1_4 = zeros(1,n_sint_env);
Sbanda1_4 = zeros(1,n_sint_ban);
Sbanda_v1_4 = zeros(1,n_sint_ban_v);
Soitterc1_4 = zeros(1,n_sint_oittec);
```

```

Stempo2_4 = zeros(1,n_sint_t);
Stempo_v2_4 = zeros(1,n_sint_t_v);
Stda12_4 = zeros(1,n_sint_td);
Stda1_v2_4 = zeros(1,n_sint_td_v);
Soitava2_4 = zeros(1,n_sint_oit);
Soitava_v2_4 = zeros(1,n_sint_oit_v);
Smotor2_4 = zeros(1,n_sint_m);
Senvelope2_4 = zeros(1,n_sint_env);
Sbanda2_4 = zeros(1,n_sint_ban);
Sbanda_v2_4 = zeros(1,n_sint_ban_v);
Soitterc2_4 = zeros(1,n_sint_oitterc);

%% Cálculos para Rolamento 2

% Cálculo dos sintomas vibratórios - Acelerômetros 90° e 45°
for c = 1:numfiles_2
    myfilename = sprintf('Teste2 (%d).txt', c);
    mydata = importdata(myfilename);
    [lin, col] = size(mydata);

    if col == 5
        auxx = horzcat(mydata(:,1), mydata(:,2), mydata(:,5));
        mydata = auxx;
    end

    Stempo2_aux = sintoma_tempo(mydata(:,2),dt);
    Stempo_v2_aux = sintoma_tempo_v(mydata(:,2),dt);
    Stda12_aux = sintoma_tda1(mydata(:,2),dt);
    Stda1_v2_aux = sintoma_tda1_v(mydata(:,2),dt);
    Soitava2_aux = sintoma_oitava(mydata(:,2),dt);
    Soitava_v2_aux = sintoma_oitava_v(mydata(:,2),dt);
    Smotor2_aux = sintoma_motor(mydata(:,2),dt);
    Senvelope2_aux = sintoma_envelope(mydata(:,2),dt);
    Sbanda2_aux = sintoma_banda(mydata(:,2),dt);
    Sbanda_v2_aux = sintoma_banda_v(mydata(:,2),dt);
    Soitterc2_aux = sintoma_oitava_terc(mydata(:,2),dt);

```

```

if c == 1
    Stempo1_2 = Stempo2_aux;
    Stempo_v1_2 = Stempo_v2_aux;
    Stda11_2 = Stda12_aux;
    Stda1_v1_2 = Stda1_v2_aux;
    Soitava1_2 = Soitava2_aux;
    Soitava_v1_2 = Soitava_v2_aux;
    Smotor1_2 = Smotor2_aux;
    Senvelope1_2 = Senvelope2_aux;
    Sbanda1_2 = Sbanda2_aux;
    Sbanda_v1_2 = Sbanda_v2_aux;
    Soitterc1_2 = Soitterc2_aux;
else
    Stempo1_2 = vertcat(Stempo1_2, Stempo2_aux);
    Stempo_v1_2 = vertcat(Stempo_v1_2, Stempo_v2_aux);
    Stda11_2 = vertcat(Stda11_2, Stda12_aux);
    Stda1_v1_2 = vertcat(Stda1_v1_2, Stda1_v2_aux);
    Soitava1_2 = vertcat(Soitava1_2, Soitava2_aux);
    Soitava_v1_2 = vertcat(Soitava_v1_2, Soitava_v2_aux);
    Smotor1_2 = vertcat(Smotor1_2, Smotor2_aux);
    Senvelope1_2 = vertcat(Senvelope1_2, Senvelope2_aux);
    Sbanda1_2 = vertcat(Sbanda1_2, Sbanda2_aux);
    Sbanda_v1_2 = vertcat(Sbanda_v1_2, Sbanda_v2_aux);
    Soitterc1_2 = vertcat(Soitterc1_2, Soitterc2_aux);
end

Stempo2_aux_2 = sintoma_tempo(mydata(:,3),dt);
Stempo_v2_aux_2 = sintoma_tempo_v(mydata(:,3),dt);
Stda12_aux_2 = sintoma_tda1(mydata(:,3),dt);
Stda1_v2_aux_2 = sintoma_tda1_v(mydata(:,3),dt);
Soitava2_aux_2 = sintoma_oitava(mydata(:,3),dt);
Soitava_v2_aux_2 = sintoma_oitava_v(mydata(:,3),dt);
Smotor2_aux_2 = sintoma_motor(mydata(:,3),dt);
Senvelope2_aux_2 = sintoma_envelope(mydata(:,3),dt);
Sbanda2_aux_2 = sintoma_banda(mydata(:,3),dt);

```

```

Sbanda_v2_aux_2 = sintoma_banda_v(mydata(:,3),dt);
Soitterc2_aux_2 = sintoma_oitava_terc(mydata(:,3),dt);

if c == 1
    Stempo2_2 = Stempo2_aux_2;
    Stempo_v2_2 = Stempo_v2_aux_2;
    Stda12_2 = Stda12_aux_2;
    Stda1_v2_2 = Stda1_v2_aux_2;
    Soitava2_2 = Soitava2_aux_2;
    Soitava_v2_2 = Soitava_v2_aux_2;
    Smotor2_2 = Smotor2_aux_2;
    Senvelope2_2 = Senvelope2_aux_2;
    Sbanda2_2 = Sbanda2_aux_2;
    Sbanda_v2_2 = Sbanda_v2_aux_2;
    Soitterc2_2 = Soitterc2_aux_2;
else
    Stempo2_2 = vertcat(Stempo2_2, Stempo2_aux_2);
    Stempo_v2_2 = vertcat(Stempo_v2_2, Stempo_v2_aux_2);
    Stda12_2 = vertcat(Stda12_2, Stda12_aux_2);
    Stda1_v2_2 = vertcat(Stda1_v2_2, Stda1_v2_aux_2);
    Soitava2_2 = vertcat(Soitava2_2, Soitava2_aux_2);
    Soitava_v2_2 = vertcat(Soitava_v2_2, Soitava_v2_aux_2);
    Smotor2_2 = vertcat(Smotor2_2, Smotor2_aux_2);
    Senvelope2_2 = vertcat(Senvelope2_2, Senvelope2_aux_2);
    Sbanda2_2 = vertcat(Sbanda2_2, Sbanda2_aux_2);
    Sbanda_v2_2 = vertcat(Sbanda_v2_2, Sbanda_v2_aux_2);
    Soitterc2_2 = vertcat(Soitterc2_2, Soitterc2_aux_2);
end
end

%% Cálculos para Rolamento 3

% Cálculo dos sintomas vibratórios - Acelerômetros 90º e 45º
for c = 1:numfiles_3
    myfilename = sprintf('Teste (%d).txt', c);
    mydata = importdata(myfilename);

```

```

[lin, col] = size(mydata);

if col == 5
    auxx = horzcat(mydata(:,1), mydata(:,2), mydata(:,5));
    mydata = auxx;
end

Stempo3_aux = sintoma_tempo(mydata(:,2),dt);
Stempo_v3_aux = sintoma_tempo_v(mydata(:,2),dt);
Stda13_aux = sintoma_tda1(mydata(:,2),dt);
Stda1_v3_aux = sintoma_tda1_v(mydata(:,2),dt);
Soitava3_aux = sintoma_oitava(mydata(:,2),dt);
Soitava_v3_aux = sintoma_oitava_v(mydata(:,2),dt);
Smotor3_aux = sintoma_motor(mydata(:,2),dt);
Senvelope3_aux = sintoma_envelope(mydata(:,2),dt);
Sbanda3_aux = sintoma_banda(mydata(:,2),dt);
Sbanda_v3_aux = sintoma_banda_v(mydata(:,2),dt);
Soitterc3_aux = sintoma_oitava_terc(mydata(:,2),dt);

if c == 1
    Stempo1_3 = Stempo3_aux;
    Stempo_v1_3 = Stempo_v3_aux;
    Stda11_3 = Stda13_aux;
    Stda1_v1_3 = Stda1_v3_aux;
    Soitava1_3 = Soitava3_aux;
    Soitava_v1_3 = Soitava_v3_aux;
    Smotor1_3 = Smotor3_aux;
    Senvelope1_3 = Senvelope3_aux;
    Sbanda1_3 = Sbanda3_aux;
    Sbanda_v1_3 = Sbanda_v3_aux;
    Soitterc1_3 = Soitterc3_aux;
else
    Stempo1_3 = vertcat(Stempo1_3, Stempo3_aux);
    Stempo_v1_3 = vertcat(Stempo_v1_3, Stempo_v3_aux);
    Stda11_3 = vertcat(Stda11_3, Stda13_aux);
    Stda1_v1_3 = vertcat(Stda1_v1_3, Stda1_v3_aux);

```

```

Soitava1_3 = vertcat(Soitava1_3, Soitava3_aux);
Soitava_v1_3 = vertcat(Soitava_v1_3, Soitava_v3_aux);
Smotor1_3 = vertcat(Smotor1_3, Smotor3_aux);
Senvelope1_3 = vertcat(Senvelope1_3, Senvelope3_aux);
Sbanda1_3 = vertcat(Sbanda1_3, Sbanda3_aux);
Sbanda_v1_3 = vertcat(Sbanda_v1_3, Sbanda_v3_aux);
Soitterc1_3 = vertcat(Soitterc1_3, Soitterc3_aux);
end

Stempo3_aux_2 = sintoma_tempo(mydata(:,3),dt);
Stempo_v3_aux_2 = sintoma_tempo_v(mydata(:,3),dt);
Stda13_aux_2 = sintoma_tda1(mydata(:,3),dt);
Stda1_v3_aux_2 = sintoma_tda1_v(mydata(:,3),dt);
Soitava3_aux_2 = sintoma_oitava(mydata(:,3),dt);
Soitava_v3_aux_2 = sintoma_oitava_v(mydata(:,3),dt);
Smotor3_aux_2 = sintoma_motor(mydata(:,3),dt);
Senvelope3_aux_2 = sintoma_envelope(mydata(:,3),dt);
Sbanda3_aux_2 = sintoma_banda(mydata(:,3),dt);
Sbanda_v3_aux_2 = sintoma_banda_v(mydata(:,3),dt);
Soitterc3_aux_2 = sintoma_oitava_terc(mydata(:,3),dt);

if c == 1
    Stempo2_3 = Stempo3_aux_2;
    Stempo_v2_3 = Stempo_v3_aux_2;
    Stda12_3 = Stda13_aux_2;
    Stda1_v2_3 = Stda1_v3_aux_2;
    Soitava2_3 = Soitava3_aux_2;
    Soitava_v2_3 = Soitava_v3_aux_2;
    Smotor2_3 = Smotor3_aux_2;
    Senvelope2_3 = Senvelope3_aux_2;
    Sbanda2_3 = Sbanda3_aux_2;
    Sbanda_v2_3 = Sbanda_v3_aux_2;
    Soitterc2_3 = Soitterc3_aux_2;
else
    Stempo2_3 = vertcat(Stempo2_3, Stempo3_aux_2);
    Stempo_v2_3 = vertcat(Stempo_v2_3, Stempo_v3_aux_2);

```

```

    Stda12_3 = vertcat(Stda12_3, Stda13_aux_2);
    Stda1_v2_3 = vertcat(Stda1_v2_3, Stda1_v3_aux_2);
    Soitava2_3 = vertcat(Soitava2_3, Soitava3_aux_2);
    Soitava_v2_3 = vertcat(Soitava_v2_3, Soitava_v3_aux_2);
    Smotor2_3 = vertcat(Smotor2_3, Smotor3_aux_2);
    Senvelope2_3 = vertcat(Senvelope2_3, Senvelope3_aux_2);
    Sbanda2_3 = vertcat(Sbanda2_3, Sbanda3_aux_2);
    Sbanda_v2_3 = vertcat(Sbanda_v2_3, Sbanda_v3_aux_2);
    Soitterc2_3 = vertcat(Soitterc2_3, Soitterc3_aux_2);
end
end

%% Cálculos para Rolamento 4

% Cálculo dos sintomas vibratórios - Acelerômetros 90º e 45º
for c = 1:numfiles_4
    myfilename = sprintf('Teste3 (%d).txt', c);
    mydata = importdata(myfilename);
    [lin, col] = size(mydata);

    if col == 5
        auxx = horzcat(mydata(:,1), mydata(:,2), mydata(:,5));
        mydata = auxx;
    end

    Stempo4_aux = sintoma_tempo(mydata(:,2),dt);
    Stempo_v4_aux = sintoma_tempo_v(mydata(:,2),dt);
    Stda14_aux = sintoma_tda1(mydata(:,2),dt);
    Stda1_v4_aux = sintoma_tda1_v(mydata(:,2),dt);
    Soitava4_aux = sintoma_oitava(mydata(:,2),dt);
    Soitava_v4_aux = sintoma_oitava_v(mydata(:,2),dt);
    Smotor4_aux = sintoma_motor(mydata(:,2),dt);
    Senvelope4_aux = sintoma_envelope(mydata(:,2),dt);
    Sbanda4_aux = sintoma_banda(mydata(:,2),dt);
    Sbanda_v4_aux = sintoma_banda_v(mydata(:,2),dt);
    Soitterc4_aux = sintoma_oitava_terc(mydata(:,2),dt);

```

```
if c == 1
    Stempo1_4 = Stempo4_aux;
    Stempo_v1_4 = Stempo_v4_aux;
    Stda11_4 = Stda14_aux;
    Stda1_v1_4 = Stda1_v4_aux;
    Soitava1_4 = Soitava4_aux;
    Soitava_v1_4 = Soitava_v4_aux;
    Smotor1_4 = Smotor4_aux;
    Senvelope1_4 = Senvelope4_aux;
    Sbanda1_4 = Sbanda4_aux;
    Sbanda_v1_4 = Sbanda_v4_aux;
    Soitterc1_4 = Soitterc4_aux;
else
    Stempo1_4 = vertcat(Stempo1_4, Stempo4_aux);
    Stempo_v1_4 = vertcat(Stempo_v1_4, Stempo_v4_aux);
    Stda11_4 = vertcat(Stda11_4, Stda14_aux);
    Stda1_v1_4 = vertcat(Stda1_v1_4, Stda1_v4_aux);
    Soitava1_4 = vertcat(Soitava1_4, Soitava4_aux);
    Soitava_v1_4 = vertcat(Soitava_v1_4, Soitava_v4_aux);
    Smotor1_4 = vertcat(Smotor1_4, Smotor4_aux);
    Senvelope1_4 = vertcat(Senvelope1_4, Senvelope4_aux);
    Sbanda1_4 = vertcat(Sbanda1_4, Sbanda4_aux);
    Sbanda_v1_4 = vertcat(Sbanda_v1_4, Sbanda_v4_aux);
    Soitterc1_4 = vertcat(Soitterc1_4, Soitterc4_aux);
end

Stempo4_aux_2 = sintoma_tempo(mydata(:,3),dt);
Stempo_v4_aux_2 = sintoma_tempo_v(mydata(:,3),dt);
Stda14_aux_2 = sintoma_tda1(mydata(:,3),dt);
Stda1_v4_aux_2 = sintoma_tda1_v(mydata(:,3),dt);
Soitava4_aux_2 = sintoma_oitava(mydata(:,3),dt);
Soitava_v4_aux_2 = sintoma_oitava_v(mydata(:,3),dt);
Smotor4_aux_2 = sintoma_motor(mydata(:,3),dt);
Senvelope4_aux_2 = sintoma_envelope(mydata(:,3),dt);
Sbanda4_aux_2 = sintoma_banda(mydata(:,3),dt);
```

```

Sbanda_v4_aux_2 = sintoma_banda_v(mydata(:,3),dt);
Soitterc4_aux_2 = sintoma_oitava_terc(mydata(:,3),dt);

if c == 1
    Stempo2_4 = Stempo4_aux_2;
    Stempo_v2_4 = Stempo_v4_aux_2;
    Stda12_4 = Stda14_aux_2;
    Stda1_v2_4 = Stda1_v4_aux_2;
    Soitava2_4 = Soitava4_aux_2;
    Soitava_v2_4 = Soitava_v4_aux_2;
    Smotor2_4 = Smotor4_aux_2;
    Senvelope2_4 = Senvelope4_aux_2;
    Sbanda2_4 = Sbanda4_aux_2;
    Sbanda_v2_4 = Sbanda_v4_aux_2;
    Soitterc2_4 = Soitterc4_aux_2;
else
    Stempo2_4 = vertcat(Stempo2_4, Stempo4_aux_2);
    Stempo_v2_4 = vertcat(Stempo_v2_4, Stempo_v4_aux_2);
    Stda12_4 = vertcat(Stda12_4, Stda14_aux_2);
    Stda1_v2_4 = vertcat(Stda1_v2_4, Stda1_v4_aux_2);
    Soitava2_4 = vertcat(Soitava2_4, Soitava4_aux_2);
    Soitava_v2_4 = vertcat(Soitava_v2_4, Soitava_v4_aux_2);
    Smotor2_4 = vertcat(Smotor2_4, Smotor4_aux_2);
    Senvelope2_4 = vertcat(Senvelope2_4, Senvelope4_aux_2);
    Sbanda2_4 = vertcat(Sbanda2_4, Sbanda4_aux_2);
    Sbanda_v2_4 = vertcat(Sbanda_v2_4, Sbanda_v4_aux_2);
    Soitterc2_4 = vertcat(Soitterc2_4, Soitterc4_aux_2);
end
end

%Sintomas Calculados - Rolamento 2 - 90º
save('Stempo1_2.txt', 'Stempo1_2', '-ASCII')
save('Stempo_v1_2.txt', 'Stempo_v1_2', '-ASCII')
save('Stda11_2.txt', 'Stda11_2', '-ASCII')
save('Stda1_v1_2.txt', 'Stda1_v1_2', '-ASCII')
save('Soitava1_2.txt', 'Soitava1_2', '-ASCII')

```

```
save('Soitava_v1_2.txt', 'Soitava_v1_2', '-ASCII')
save('Smotor1_2.txt', 'Smotor1_2', '-ASCII')
save('Senvelope1_2.txt', 'Senvelope1_2', '-ASCII')
save('Sbanda1_2.txt', 'Sbanda1_2', '-ASCII')
save('Sbanda_v1_2.txt', 'Sbanda_v1_2', '-ASCII')
save('Soitterc1_2.txt', 'Soitterc1_2', '-ASCII')

%Sintomas Calculados - Rolamento 2 - 45°
save('Stempo2_2.txt', 'Stempo2_2', '-ASCII')
save('Stempo_v2_2.txt', 'Stempo_v2_2', '-ASCII')
save('Stda12_2.txt', 'Stda12_2', '-ASCII')
save('Stda1_v2_2.txt', 'Stda1_v2_2', '-ASCII')
save('Soitava2_2.txt', 'Soitava2_2', '-ASCII')
save('Soitava_v2_2.txt', 'Soitava_v2_2', '-ASCII')
save('Smotor2_2.txt', 'Smotor2_2', '-ASCII')
save('Senvelope2_2.txt', 'Senvelope2_2', '-ASCII')
save('Sbanda2_2.txt', 'Sbanda2_2', '-ASCII')
save('Sbanda_v2_2.txt', 'Sbanda_v2_2', '-ASCII')
save('Soitterc2_2.txt', 'Soitterc2_2', '-ASCII')

%Sintomas Calculados - Rolamento 3 - 90°
save('Stempo1_3.txt', 'Stempo1_3', '-ASCII')
save('Stempo_v1_3.txt', 'Stempo_v1_3', '-ASCII')
save('Stda11_3.txt', 'Stda11_3', '-ASCII')
save('Stda1_v1_3.txt', 'Stda1_v1_3', '-ASCII')
save('Soitava1_3.txt', 'Soitava1_3', '-ASCII')
save('Soitava_v1_3.txt', 'Soitava_v1_3', '-ASCII')
save('Smotor1_3.txt', 'Smotor1_3', '-ASCII')
save('Senvelope1_3.txt', 'Senvelope1_3', '-ASCII')
save('Sbanda1_3.txt', 'Sbanda1_3', '-ASCII')
save('Sbanda_v1_3.txt', 'Sbanda_v1_3', '-ASCII')
save('Soitterc1_3.txt', 'Soitterc1_3', '-ASCII')

%Sintomas Calculados - Rolamento 3 - 45°
save('Stempo2_3.txt', 'Stempo2_3', '-ASCII')
save('Stempo_v2_3.txt', 'Stempo_v2_3', '-ASCII')
```

```
save('Stda12_3.txt', 'Stda12_3', '-ASCII')
save('Stda1_v2_3.txt', 'Stda1_v2_3', '-ASCII')
save('Soitava2_3.txt', 'Soitava2_3', '-ASCII')
save('Soitava_v2_3.txt', 'Soitava_v2_3', '-ASCII')
save('Smotor2_3.txt', 'Smotor2_3', '-ASCII')
save('Senvelope2_3.txt', 'Senvelope2_3', '-ASCII')
save('Sbanda2_3.txt', 'Sbanda2_3', '-ASCII')
save('Sbanda_v2_3.txt', 'Sbanda_v2_3', '-ASCII')
save('Soitterc2_3.txt', 'Soitterc2_3', '-ASCII')
```

%Sintomas Calculados - Rolamento 4 - 90°

```
save('Stempo1_4.txt', 'Stempo1_4', '-ASCII')
save('Stempo_v1_4.txt', 'Stempo_v1_4', '-ASCII')
save('Stda11_4.txt', 'Stda11_4', '-ASCII')
save('Stda1_v1_4.txt', 'Stda1_v1_4', '-ASCII')
save('Soitava1_4.txt', 'Soitava1_4', '-ASCII')
save('Soitava_v1_4.txt', 'Soitava_v1_4', '-ASCII')
save('Smotor1_4.txt', 'Smotor1_4', '-ASCII')
save('Senvelope1_4.txt', 'Senvelope41_', '-ASCII')
save('Sbanda1_4.txt', 'Sbanda1_4', '-ASCII')
save('Sbanda_v1_4.txt', 'Sbanda_v1_4', '-ASCII')
save('Soitterc1_4.txt', 'Soitterc1_4', '-ASCII')
```

%Sintomas Calculados - Rolamento 4 - 45°

```
save('Stempo2_4.txt', 'Stempo2_4', '-ASCII')
save('Stempo_v2_4.txt', 'Stempo_v2_4', '-ASCII')
save('Stda12_4.txt', 'Stda12_4', '-ASCII')
save('Stda1_v2_4.txt', 'Stda1_v2_4', '-ASCII')
save('Soitava2_4.txt', 'Soitava2_4', '-ASCII')
save('Soitava_v2_4.txt', 'Soitava_v2_4', '-ASCII')
save('Smotor2_4.txt', 'Smotor2_4', '-ASCII')
save('Senvelope2_4.txt', 'Senvelope2_4', '-ASCII')
save('Sbanda2_4.txt', 'Sbanda2_4', '-ASCII')
save('Sbanda_v2_4.txt', 'Sbanda_v2_4', '-ASCII')
save('Soitterc2_4.txt', 'Soitterc2_4', '-ASCII')
```

APÊNDICE III

Códigos desenvolvidos em R

Apresentam-se, nesta seção, os códigos utilizados pela autora para tratamento estatístico dos sintomas vibroacústicos utilizando o software R.

```
S6_1_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,1]), "weibull")
S6_1_N <- fitdist(S6[1:3120,1], "norm")
S6_2_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,2]), "weibull")
S6_2_N <- fitdist(S6[1:3120,2], "norm")
S6_3_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,3]), "weibull")
S6_3_N <- fitdist(S6[1:3120,3], "norm")
S6_4_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,4]), "weibull")
S6_4_N <- fitdist(S6[1:3120,4], "norm")
S6_5_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,5]), "weibull")
S6_5_N <- fitdist(S6[1:3120,5], "norm")
S6_6_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,6]), "weibull")
S6_6_N <- fitdist(S6[1:3120,6], "norm")
S6_7_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,7]), "weibull")
S6_7_N <- fitdist(S6[1:3120,7], "norm")
```

```
S6_8_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,8]), "weibull")
S6_8_N <- fitdist(S6[1:3120,8], "norm")
S6_9_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,9]), "weibull")
S6_9_N <- fitdist(S6[1:3120,9], "norm")
S6_10_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,10]), "weibull")
S6_10_N <- fitdist(S6[1:3120,10], "norm")
S6_11_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,11]), "weibull")
S6_11_N <- fitdist(S6[1:3120,11], "norm")
S6_12_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,12]), "weibull")
S6_12_N <- fitdist(S6[1:3120,12], "norm")
S6_13_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,13]), "weibull")
S6_13_N <- fitdist(S6[1:3120,13], "norm")
S6_14_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,14]), "weibull")
S6_14_N <- fitdist(S6[1:3120,14], "norm")
S6_15_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,15]), "weibull")
S6_15_N <- fitdist(S6[1:3120,15], "norm")
S6_16_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,16]), "weibull")
S6_16_N <- fitdist(S6[1:3120,16], "norm")
S6_17_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,17]), "weibull")
S6_17_N <- fitdist(S6[1:3120,17], "norm")
S6_18_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,18]), "weibull")
S6_18_N <- fitdist(S6[1:3120,18], "norm")
S6_19_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,19]), "weibull")
S6_19_N <- fitdist(S6[1:3120,19], "norm")
S6_20_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,20]), "weibull")
S6_20_N <- fitdist(S6[1:3120,20], "norm")
S6_21_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,21]), "weibull")
S6_21_N <- fitdist(S6[1:3120,21], "norm")
```

```
S6_22_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,22]), "weibull")
S6_22_N <- fitdist(S6[1:3120,22], "norm")
S6_23_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,23]), "weibull")
S6_23_N <- fitdist(S6[1:3120,23], "norm")
S6_24_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,24]), "weibull")
S6_24_N <- fitdist(S6[1:3120,24], "norm")
S6_25_W <- fitdist(abs(S6[1:3120,25]), "weibull")
S6_25_N <- fitdist(S6[1:3120,25], "norm")

S6_1_W$aic
S6_2_W$aic
S6_3_W$aic
S6_4_W$aic
S6_5_W$aic
S6_6_W$aic
S6_7_W$aic
S6_8_W$aic
S6_9_W$aic
S6_10_W$aic
S6_11_W$aic
S6_12_W$aic
S6_13_W$aic
S6_14_W$aic
S6_15_W$aic
S6_16_W$aic
S6_17_W$aic
S6_18_W$aic
S6_19_W$aic
```

S6_20_W\$aic

S6_21_W\$aic

S6_22_W\$aic

S6_23_W\$aic

S6_24_W\$aic

S6_25_W\$aic

S6_1_N\$aic

S6_2_N\$aic

S6_3_N\$aic

S6_4_N\$aic

S6_5_N\$aic

S6_6_N\$aic

S6_7_N\$aic

S6_8_N\$aic

S6_9_N\$aic

S6_10_N\$aic

S6_11_N\$aic

S6_12_N\$aic

S6_13_N\$aic

S6_14_N\$aic

S6_15_N\$aic

S6_16_N\$aic

S6_17_N\$aic

S6_18_N\$aic

S6_19_N\$aic

S6_20_N\$aic

S6_21_N\$aic

S6_22_N\$aic

S6_23_N\$aic

S6_24_N\$aic

S6_25_N\$aic

S6_1_W\$bic

S6_2_W\$bic

S6_3_W\$bic

S6_4_W\$bic

S6_5_W\$bic

S6_6_W\$bic

S6_7_W\$bic

S6_8_W\$bic

S6_9_W\$bic

S6_10_W\$bic

S6_11_W\$bic

S6_12_W\$bic

S6_13_W\$bic

S6_14_W\$bic

S6_15_W\$bic

S6_16_W\$bic

S6_17_W\$bic

S6_18_W\$bic

S6_19_W\$bic

S6_20_W\$bic

S6_21_W\$bic

S6_22_W\$bic

S6_23_W\$bic

S6_24_W\$bic

S6_25_W\$bic

S6_1_N\$bic

S6_2_N\$bic

S6_3_N\$bic

S6_4_N\$bic

S6_5_N\$bic

S6_6_N\$bic

S6_7_N\$bic

S6_8_N\$bic

S6_9_N\$bic

S6_10_N\$bic

S6_11_N\$bic

S6_12_N\$bic

S6_13_N\$bic

S6_14_N\$bic

S6_15_N\$bic

S6_16_N\$bic

S6_17_N\$bic

S6_18_N\$bic

S6_19_N\$bic

S6_20_N\$bic

S6_21_N\$bic

S6_22_N\$bic

S6_23_N\$bic

S6_24_N\$bic

S6_25_N\$bic

```
plot (S6_1_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col1.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_1_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col1.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_2_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col2.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_2_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col2.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_3_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col3.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_3_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col3.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_4_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col4.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_4_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col4.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
```

```
plot (S6_5_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col5.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_5_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col5.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_6_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col6.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_6_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col6.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_7_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col7.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_7_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col7.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_8_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col8.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_8_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col8.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
```

```
plot (S6_9_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col9.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_9_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col9.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_10_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col10.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_10_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col10.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_11_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col11.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_11_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col11.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_12_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col12.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_12_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col12.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
```

```
plot (S6_13_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col13.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_13_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col13.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_14_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col14.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_14_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col14.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_15_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col15.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_15_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col15.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_16_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col16.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_16_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col16.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
```

```
plot (S6_17_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col17.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_17_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col17.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_18_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col18.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_18_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col18.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_19_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col19.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_19_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col19.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_20_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col20.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_20_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col20.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
```

```
plot (S6_21_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col21.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_21_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col21.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_22_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col22.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_22_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col22.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_23_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col23.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_23_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col23.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()

plot (S6_24_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col24.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_24_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col24.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
```

```
plot (S6_25_W)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Weibull_Col25.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
plot (S6_25_N)
dev.copy(jpeg, file=" R4_2_Normal_Col25.jpeg", width = 1362, height = 650, quality = 100)
dev.off()
```