

Marina Machado Loures Coelho

*Sistema Automático de Detecção de Falhas
em Rolamentos de Roletes de Correias
Transportadoras*

Belo Horizonte

Maio de 2010

Marina Machado Loures Coelho

*Sistema Automático de Detecção de Falhas
em Rolamentos de Roletes de Correias
Transportadoras*

Dissertação submetida a banca examinadora designada pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Professor Leonardo Antônio Borges Tôrres

Co-Orientador:

Professor Marco Túlio Corrêa de Faria

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

Belo Horizonte

Maio de 2010

Resumo

Os roletes são os elementos responsáveis pela movimentação das correias transportadoras, sendo seu bom funcionamento fundamental para o bom desempenho das mesmas. Para aumento da confiabilidade operacional e redução de manutenções preventivas, faz-se necessário um sistema eficiente de monitoramento do processo, que idealmente deve possibilitar a detecção de falhas incipientes. O objeto de estudo deste trabalho é a detecção de defeitos em rolamentos internos aos roletes, afinal estes são responsáveis pela maioria das falhas e travamentos em roletes. Além disso, técnicas de detecção de falhas em rolamentos são vastamente encontradas na literatura. Sinais de vibração em rolamentos têm sido tradicionalmente utilizados para detecção e classificação de falhas, por meio da análise cuidadosa dos seus conteúdos espectrais. Um procedimento usual consiste em se detectar picos significativos de densidade espectral de potência (PSD) em faixas de frequências pré-determinadas, as quais correspondem a certos tipos de falhas específicas. Entretanto, tal julgamento é por vezes subjetivo, como nos casos de baixa relação sinal-ruído, ou janelamento inadequado da série temporal coletada, o que conduz à produção de artefatos, na forma de picos espúrios. A fim de minimizar esse subjetivismo, propõe-se a incorporação, a uma máquina de inferência nebulosa, da probabilidade de que um dado valor de PSD, reconhecido numericamente como um máximo local, seja de fato um valor de pico. Além disso, avalia-se a importância do valor de pico encontrado, comparando-o a uma estimativa da densidade espectral de potência de ruído branco presente nos dados. Os resultados preliminares mostram que a metodologia pode ser usada para aprimorar a representação do conhecimento de um especialista para diagnóstico de falhas em rolamentos usados em roletes de correias transportadoras.

Abstract

The rollers are the main elements responsible for the movement of conveyor belts, and its integrity is fundamental to the appropriate operation of the conveyors. To increase the operational reliability and to reduce the need for preventive maintenance, an efficient system process monitoring is necessary, which ideally should allow the detection of incipient failures. The objective of this work is the detection of faults in the internal bearings of rollers, after all they are responsible for most of the failures and lockings on rollers. In addition, bearing failure detection techniques are widely found in literature. Rolling bearings vibration signals have been used to fault detection and classification by means of careful analysis of the corresponding signals spectral content. A usual procedure consists of searching significant peaks in the signal power spectral density (PSD) in frequency bands corresponding to specific types of faults. However, this technique sometimes is not reliable once there could be a high degree of subjectivism in the evaluation of low signal-to-noise ratio signals, or when an inadequate windowing is applied to the original time series. In both cases, one has the production of artifacts as spurious peaks in the frequency domain. In order to minimize this problem, the information on the probability that a given numerically determined PSD local maximum is indeed a peak is added to a fuzzy inference machine. Moreover, the importance of this maximum PSD value is also evaluated by comparing it with the white noise PSD estimated value. Preliminary results have shown that this procedure can be used to enhance the specialist knowledge representation in a fuzzy system used to perform rolling bearing fault diagnosis.

Agradecimentos

Ao professor Leonardo Tôrres pela orientação, ensinamentos, disponibilidade e grande ajuda na realização deste trabalho.

Ao professor Marco Túlio por me acolher no Grupo de Dinâmica dos Rotores, oferecendo-me a oportunidade de realizar este projeto.

Aos colegas do Grupo de Dinâmica dos Rotores por me ajudarem na realização dos testes que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, ao PPGEE, e aos professores pela oportunidade de participar do programa de mestrado.

Aos meus pais e a minha irmã eu agradeço pelo amor e dedicação.

Ao Fabrício pelo amor, amizade e companheirismo.

Aos meus familiares e amigos por torcerem tanto por mim.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

Lista de Abreviaturas

1	Introdução	p. 20
1.1	Descrição do Problema	p. 20
1.1.1	Bancada de Testes de Roletes	p. 22
1.1.2	Planejamento de Testes Experimentais	p. 22
1.2	Objetivos	p. 24
1.3	Metodologia Proposta	p. 24
1.4	Estrutura da Dissertação	p. 26
2	Falhas em Roletes - Modelo Matemático e Técnicas de Detecção de Falhas por Análise de Vibração	p. 27
2.1	Roletes de Correias Transportadoras de Minério de Ferro	p. 27
2.1.1	Falhas em Rolamentos	p. 28
2.2	Modelo Matemático Proposto para o Rolete	p. 30
2.2.1	Parâmetros do Modelo	p. 33
2.2.2	Simulação de Impulsos Gerados por Defeitos Localizados em Rolamentos	p. 35

2.3	Análise de Sinais de Vibração	p. 40
2.3.1	Técnicas no Domínio do Tempo	p. 41
2.3.2	Técnicas no Domínio da Frequência	p. 42
2.4	Sistemas Nebulosos em Detecção e Diagnóstico de Falhas em Rolamentos	p. 45
3	Técnica Proposta para Detecção de Falhas em Roletes	p. 48
3.1	Estrutura da Máquina de Inferência Nebulosa	p. 48
3.2	Análise de Vibração para Obtenção das Entradas da Máquina de Inferência Nebulosa	p. 50
3.2.1	Análise no Domínio do Tempo	p. 50
3.2.2	Análise no Domínio da Frequência	p. 50
3.2.2.1	Técnica de Envelope de Vibrações	p. 50
3.2.2.2	Cálculo da Estimativa de Densidade Espectral de Potência (PSD)	p. 50
3.2.2.3	Detecção de Picos	p. 53
3.2.2.4	Estimativa do Ruído de Fundo	p. 55
3.3	Sub-Sistemas da Máquina de Inferência Nebulosa	p. 56
3.4	Regras da Máquina de Inferência Nebulosa	p. 63
4	Resultados da Aplicação da Técnica de Detecção de Falhas em Roletes	p. 68
4.1	Metodologia de Geração de Sinais Artificiais	p. 68
4.1.1	Geração de Impulsos	p. 71
4.1.2	Resultados	p. 74
4.2	Metodologia de Geração de Falhas Induzidas nos Rolamentos	p. 76
4.2.1	Resultados	p. 80
4.3	Análise dos Resultados	p. 82

5 Conclusões	p. 88
5.1 Considerações Finais	p. 88
5.2 Trabalhos Futuros	p. 90
Apêndice A – Teste de Vida Acelerada	p. 92
A.1 Testes de Vida e Testes Acelerados	p. 92
A.2 Condições de Uso e de Projeto	p. 95
A.3 Planejamento dos Testes Acelerados	p. 97
A.3.1 Forma do Teste	p. 97
A.3.2 Planejamento do Experimento	p. 98
Apêndice B – Lógica Nebulosa	p. 103
B.1 Funções de Pertinência	p. 104
B.2 Regras de Inferência	p. 105
B.3 Máquina de Inferência Nebulosa	p. 105
Referências	p. 109

Lista de Figuras

1	Bancada de ensaio de roletes, em (a) esquema, em (b) foto. Fonte: Grupo de Dinâmica dos Rotores.	p. 22
2	Visão geral do trabalho desenvolvido.	p. 25
3	Rolamento de esferas.	p. 29
4	Parâmetros geométricos dos rolamentos.	p. 29
5	Parâmetros dos rolamentos, em (a) ψ_j que é o ângulo existente entre as esferas, e em (b) ψ_i que é a posição da esfera submetida ao carregamento em relação à força aplicada.	p. 30
6	Modelo de rotor rígido longo com suas coordenadas. Fonte: Modificado de (VANICE, 1988).	p. 31
7	Sinal de vibração da falha na pista estacionária, em (a) impulsos gerados pela passagem das esferas no defeito da pista estacionária, e em (b) sinal de vibração no tempo.	p. 37
8	Harmônicos da frequência de defeito da pista estacionária. A frequência da onda moduladora é obtida como: $f_d = 1/T_d$, sendo que T_d está mostrado na Figura 7.	p. 37
9	Impulsos gerados pela passagem das esferas no defeito da região que tem movimento em relação à região de carregamento.	p. 38
10	Sinal de vibração da falha na pista rotativa, em (a) impulsos apresentados na Figura 9, e em (b) sinal de vibração no tempo.	p. 39
11	Harmônicos da frequência de defeito da pista rotativa. A frequência da onda moduladora é obtida como: $f_m = 1/T_m$, sendo que T_m está mostrado na Figura 9.	p. 39

12	Espectro com as frequências características de defeitos em rolamentos como: na pista interna (F_{BPI}), na pista externa (F_{BPO}) e nas esferas (F_B), além das bandas laterais de falha na pista externa ($F_{BPO} \pm F_S$) e nas esferas ($F_B \pm F_C$).	p. 41
13	Exemplo de, (a) onda portadora, (b) onda moduladora, (c) onda modulada em amplitude, e (d) demodulação.	p. 43
14	Representação gráfica da Máquina de Inferência Nebulosa proposta. . .	p. 49
15	Configuração da máquina de inferência nebulosa.	p. 49
16	Representação gráfica do procedimento de cálculo da estimativa de Densidade Espectral de Potência.	p. 51
17	Divisão do intervalo de análise de defeitos em rolamentos em faixas de interesse.	p. 53
18	Exemplo de valores de PSD estimados, e suas repetivas incertezas, para uma dada faixa de frequências.	p. 54
19	Histograma da mediana da estimativa da Densidade Espectral de Potência.	p. 56
20	Detalhamento da função de pertinência trapezoidal da variável de entrada X_{RMS} do sub-sistema de inferência nebulosa Tempo	p. 58
21	Funções de pertinência para os conjuntos nebulosos: (a) “ X_{RMS} é Alto”, e em (b) “ Y_{Sinal} é Falha” e “ Y_{Sinal} é Não Falha”.	p. 59
22	Parâmetro Valor com o respectivo intervalo de confiança.	p. 59
23	Funções de pertinência para os conjuntos nebulosos: (a) “ X_{Pico} é Significativo”, e em (b) “ $X_{Probabilidade}$ é Baixa” e “ $X_{Probabilidade}$ é Alta”.	p. 60
24	Função de pertinência para o conjunto nebuloso “ Y_{Faixa} é Importante”.	p. 60
25	Detalhamento da função de pertinência trapezoidal da variável de entrada $X_{Frequência}$ do sub-sistema de inferência nebulosa Detecta	p. 62
26	Funções de pertinência para os conjuntos nebulosos: (a) “ $X_{Frequencia}$ é Alta”, e em (b) “ X_{Faixa} é Importante”.	p. 62
27	Função de pertinência para os conjuntos nebulosos “ Y é Significativo” e “ Y é Não Significativo”.	p. 63

28	Regras nebulosas para o sub-sistema Tempo	p. 64
29	Regras nebulosas para o sub-sistema Faixa	p. 65
30	Superfície para o sub-sistema Faixa	p. 65
31	Regras nebulosas para o sub-sistema Detecta com a simulação de uma falha na pista externa do rolamento.	p. 67
32	Diagrama de simulação para obtenção de sinais de vibração simulados para rolamentos sem falha e com falhas nas pistas e nas esferas.	p. 72
33	Diagrama de simulação da distribuição de carregamento.	p. 72
34	Diagrama de simulação do modelo matemático proposto para o rolete.	p. 73
35	Sinal de vibração de falha simulada na pista interna do rolamento, em (a) sem ruído, e em (b) com ruído.	p. 73
36	PSD do sinal de falha simulada, em (a) sem falha, em (b) com falha na pista interna, em (c) com falha na pista externa, e, em (d) com falha na esfera.	p. 75
37	PSD do sinal de falha simulada, em (a) com falha nas pistas, em (b) com falha na pista interna e na esfera, em (c) com falha na pista externa e na esfera, e, em (d) com falha nas pistas e na esfera.	p. 77
38	Variação de parâmetros de entrada da máquina de inferência nebulosa de acordo com o carregamento da correia transportadora, em (a) X_{RMS} , em (b) $X_{Frequencia}$	p. 77
39	Relação sinal-ruído na simulação de falha na pista interna com diferentes valores de carregamento na correia transportadora, em (a) $F_T = 0N$, e em (b) $F_T = 4000N$	p. 78
40	Processo de indução de falhas em rolamentos, em (a) ferramenta, em (b) processo da falha.	p. 78
41	Apresentação das falhas induzidas no rolamento 1305ATN, em (a) sem falha, em (b) com falha na pista interna, em (c) com falha na pista externa, e, em (d) com falha na esfera.	p. 79

42	Retirada de componentes do rolete para acessar o rolamento, em (a) processo de retirada dos componentes que protegem o rolamento, em (b) visualização do rolamento interno ao rolete, em (c) vista do interior do rolete com o eixo, rolamentos e componentes que protegem o rolamento, e em (d) vista em separado do eixo, do rolamento e dos componentes que protegem o rolamento.	p. 80
43	Visão superior do esquema da bancada de ensaio de roletes com a indicação da numeração dos mancais de rolamentos.	p. 81
44	Configuração dos sensores instalados na bancada de ensaios de roletes, com destaque para o acelerômetro modelo 353B34 utilizado para obtenção dos sinais reais de vibração de falhas induzidas nos rolamentos.	p. 81
45	Sinais reais de vibração, em (a) sem falha, em (b) falha na pista interna, em (c) falha na pista externa, e, em (d) falha na esfera.	p. 82
46	PSD dos sinais reais de falhas induzidas, em (a) sem falha, em (b) com falha na pista interna, em (c) com falha na pista externa, e, em (d) com falha na esfera.	p. 83
47	PSD do sinal real de falha induzida na pista interna do rolamento.	p. 84
48	Apresentação dos resultados da estimativa de PSD para falha na pista interna do rolamento, em (a) resultado para o sinal de vibração simulado, e em (b) resultado para o sinal de vibração real.	p. 85
49	Apresentação dos resultados do PSD para falha na pista externa do rolamento, em (a) resultado para o sinal de vibração simulado, e em (b) resultado para o sinal de vibração real.	p. 85
50	Apresentação dos resultados do PSD para falha nas esferas do rolamento, em (a) resultado para o sinal de vibração simulado, e em (b) resultado para o sinal de vibração real.	p. 86
51	PSD de falha simulada no rolamento.	p. 87
52	Aplicação da máquina de inferência nebulosa proposta em sinal de vibração simulado de falha em rolamento com a detecção da falha na pista externa do rolamento.	p. 87

53	Resposta teórica para a relação Estresse-Resposta.	p. 97
54	Forma de aplicação de carga de estresse.	p. 98
55	Níveis de estresse.	p. 99
56	Variação do número de amostras com aumento do erro.	p. 101
57	Variação da precisão com aumento do tamanho da amostra.	p. 102
58	Funções de Pertinência, em (a) triangular, em (b) trapezoidal.	p. 104
59	Operadores de defuzzificação.	p. 106
60	Máquina de Inferência Mamdani. Fonte: Modificado de (CAMPONOG- ARA, 2009).	p. 108

Lista de Tabelas

1	Técnicas no Domínio do Tempo. Nas expressões abaixo, $x(t)$ é o sinal temporal de vibração, N é o número de amostras do sinal, σ é o desvio padrão e \bar{x} é o valor médio do sinal temporal.	p. 42
2	Conjunto de antecedentes avaliados e consequentes correspondentes, para regras que incluem o antecedente “ $X_{\text{Frequencia}}$ é Alto”.	p. 66
3	Especificações do Sistema Rotativo.	p. 69
4	Especificações do Rolamento 1305ATN. Fonte: (SKF, 2008).	p. 70
5	Frequências características de defeitos.	p. 70
6	Frequências características de defeitos para os harmônicos.	p. 70
7	Resultados da aplicação da máquina de inferência nebulosa aos sinais de vibração simulados. Na tabela são apresentados os resultados da análise no domínio do tempo e no domínio da frequência para sinais sem falha e com falhas nas pistas interna e externa e nas esferas, com a aplicação de diferentes valores de carregamento da correia transportadora: 1000N, 2000N, 3000N e 4000N.	p. 74
8	Resultados da aplicação da máquina de inferência nebulosa aos sinais de vibração simulados. Na tabela são apresentados os resultados da análise no domínio do tempo e no domínio da frequência para sinais que apresentam mais de uma falha simultaneamente (pista interna e pista externa, pista interna e esferas, e pista externa e esferas), com a aplicação de diferentes valores de carregamento da correia transportadora: 1000N, 2000N, 3000N e 4000N.	p. 76

9	Resultados da aplicação da máquina de inferência nebulosa aos sinais de vibração simulados. Na tabela são apresentados os resultados da análise no domínio do tempo e no domínio da frequência para sinais sem falha e com falhas nas pistas interna e externa e nas esferas, sem a aplicação de diferentes valores de carregamento da correia transportadora.	p. 76
10	Testes realizados na bancada de ensaios de roletes de correias transportadoras.	p. 79
11	Características do acelerômetro 353B34.	p. 80
12	Resultados da aplicação da máquina de inferência nebulosa aos sinais de vibração reais. Na tabela são apresentados os resultados da análise no domínio do tempo e no domínio da frequência para sinais sem falha e com falhas nas pistas interna e externa e nas esferas, com a aplicação de carregamento da correia transportadora no valor de 4000N.	p. 84
13	Índice de acerto na aplicação da máquina de inferência nebulosa proposta para análise no domínio do tempo e no domínio da frequência de sinais de falhas simuladas e de falhas induzidas.	p. 86
14	Resultado do número de amostras para valores variados de erro.	p. 101

Lista de Símbolos

n_b : número de esferas nos rolamentos

D : diâmetro das esferas (mm)

d_m : diâmetro primitivo (mm)

α_c : ângulo de contato

P_d : folga (μm)

d_I : diâmetro interno (mm)

d_O : diâmetro externo (mm)

ψ_j : ângulo entre as esferas ($^\circ$)

ψ_i : posição da esfera submetida ao carregamento em relação à força aplicada

L : é o eixo de Lagrange

X , Y e Z : são os referenciais de espaço físico inercial

F_B : frequência característica de defeitos na esfera do rolamento (Hz)

α : ângulo de Euler em torno de Y

β : ângulo de Euler em torno de X

M : massa do sistema rotativo (Kg)

ω_S : velocidade de rotação do sistema rotativo (rpm)

I_T : momento transversal de inércia (Kg m^2)

I_P : momento polar de inércia (Kg m^2)

F_X e F_Y : forças nos eixos X e Y , respectivamente

M_X e M_Y : momentos nos eixos X e Y , respectivamente

K : rigidez radial do rolamento (N/m)

C : amortecimento

F_r : força aplicada na direção radial (N)

F_x e F_y : forças não-lineares que atuam nas pistas do rolamento

Q_{max} : máxima carga da esfera dos rolamentos

δ_r : deformação ou deflexão por contato

ς : fator de amortecimento

r : raio dos discos
 m_D : massa de cada disco do cilindro
 M_C : massa da carcaça do cilindro
 h : a altura da carcaça do rolete
 N_B : número de rolamentos
 f_{kx} e f_{ky} : são as não-lineares nas direções X e Y de cada mancal de rolamento, respectivamente
 d_0 : amplitude dos impulsos
 T_d : intervalo entre os impulsos
 f_d : frequência de defeitos em rolamentos
 $q(0)$: é a amplitude da onda modulante
 ε : é o fator de distribuição de carga
 f_m : frequência moduladora
 T_m : período da onda moduladora
 F_S : frequência de rotação do sistema rotativo (Hz)
 F_C : frequência de rotação da gaiola (Hz)
 F_{BPI} : frequência característica de defeitos na pista interna do rolamento (Hz)
 F_{BPO} : frequência característica de defeitos na pista externa do rolamento (Hz)
 N : número de amostras do sinal
 σ : é o desvio padrão
 f_p : frequência da onda portadora
 T_p : período do sinal $x(t)$
 c_k : os coeficientes da série de Fourier
 k são os índices da série de Fourier
 F_0 são os valores de frequência da PSD
 X_{RMS} : variável de entrada do sub-sistema de inferência nebulosa **Tempo**, que representa o valor eficaz do sinal temporal
 L_W : comprimento das janelas de dados do PSD
 r_W : resolução ou distância mínima entre as frequências características de defeito do PSD
 B : largura do lóbulo principal associado à transformada de Fourier da função de janelamento do PSD
 f_s : frequência de amostragem do sinal
 N_W : número de janelas do PSD
 s_W : sobreposição entre as janelas de dados consecutivas do PSD

P_{XX} : estimativa do PSD

σ_W : incerteza associada à estimativa do PSD

p_j : probabilidade de ser pico

v_j : valor da amplitude do pico

m : número de máximos locais existentes em determinada faixa

X_{Valor} : valor de pico representativo para toda a faixa

X_{Pico} : variável de entrada do sub-sistema de inferência nebulosa **Faixa**, que representa quão significativo o valor é em relação ao ruído de fundo

$X_{\text{Probabilidade}}$: variável de entrada do sub-sistema de inferência nebulosa **Faixa**, que representa o valor de probabilidade associado a cada pico

X_{Ruido} : valor da densidade espectral de potência de ruído de fundo

σ_{Ruido} : desvio padrão da estimativa da densidade espectral de potência de ruído de fundo

$X_{\text{Frequência}}$: variável de entrada do sub-sistema de inferência nebulosa **Detecta**, que representa se há picos quaisquer que conduziram a uma diferença entre a PSD média e a PSD mediana (estimativa do ruído de fundo) no domínio da frequência

$X_{\text{Frequência}}$: corresponde a média de todos os valores de PSD

Y_{Sinal} : variável de saída do sub-sistema de inferência nebulosa **Tempo**

Y_{Faixa} : variável de saída do sub-sistema de inferência nebulosa **Faixa**

Y_{Normal} , Y_{Falha} , Y_{PI} , Y_{PE} e Y_{ESF} : variáveis de saída do sub-sistema de inferência nebulosa **Detecta**

$d_B = a_i = a_o$: Distância entre o rolamento e o centro de massa

R_i : Distância entre a pista interna e o eixo

R_o : Distância entre a pista externa e o eixo

ω_C : velocidade de rotação da gaiola (rpm)

z_γ : 100 $\gamma\%$ percentil da distribuição normal padrão sendo γ a probabilidade que indica o nível de confiança desejado

σ : é o valor assumido para o parâmetro de escala

V : variância assintótica da estimativa do percentil de interesse, multiplicada por $n\sigma^2$

P : percentil(100 $P\%$) da distribuição do tempo de falha do produto que é de maior interesse para o estudo

p_a : probabilidade de falha no nível alto de estresse durante o período de teste

p_o : probabilidade de falha nas condições de projeto durante o período de duração do teste

$\lambda(t)$: tamanho da amostra para estimação da taxa de falha em um determinado tempo

$V(\varepsilon_e; \varepsilon_c)$: é o fator de variância

δ : é o valor do parâmetro de forma da Distribuição Weibull

P_0 : pressão exercida sobre os discos

v : velocidade linear aplicada

F : força aplicada nos discos

A : área de contato

ω : velocidade angular

A : conjunto nebuloso

X : universo de discurso ao qual o conjunto pertence

x : componente do conjunto nebuloso

$\mu_A(x)$: função de pertinência

y_0 : centro de gravidade

y_i : localização de cada massa $i = 1, 2, \dots, n$

m_i : massa, onde $i = 1, 2, \dots, n$

Lista de Abreviaturas

FFT: *Fast Fourier Transform*

PSD: *Power Spectral Density*

RMS: *Root Mean Square*

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - EEUFMG

UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais

1 *Introdução*

1.1 **Descrição do Problema**

Paradas não programadas em correias transportadoras geram altos custos de manutenção e perdas de produção para empresas mineradoras. Dentre as causas de travamentos nestas correias estão falhas em um de seus componentes, os roletes.

As mineradoras não possuem informações a respeito da vida útil e resistência mecânica dos seus roletes. Quando ocorrem travamentos desses componentes, e as correias transportadoras de minério continuam funcionando, são gerados desgastes em ambos, tais como furos na carcaça dos roletes e rasgos nas correia.

Tendo em vista este fato, foi desenvolvida na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) uma bancada para ensaios de roletes de correias transportadoras. Esta bancada é utilizada neste trabalho para possibilitar o estudo de falhas em roletes, por meio da obtenção de dados reais em ensaios de resistência mecânica dos mesmos.

Nos últimos anos tem ocorrido um aumento na necessidade de monitoramento em tempo real para diagnóstico de falhas em máquinas rotativas, objetivando promover o aumento da eficiência, da confiabilidade, da disponibilidade e da facilidade de manutenção de plantas industriais (HENG et al., 2009; CHEN; PATTON, 1999; GERTLER, 1998; SZOLC et al., 2009; NASCIMENTO et al., 2006). Neste contexto, é importante notar que a maioria das falhas encontradas em máquinas rotativas podem ser relacionadas a defeitos mancais de deslizamento ou mancais de rolamentos (ZIO; GOLA, 2009; GHAFARI, 2007).

Na literatura não são encontrados métodos de detecção de falhas em roletes, sendo comum estudos sobre técnicas para detecção de falhas em máquinas rotativas por meio da análise de falhas em mancais de rolamentos, principalmente envolvendo análise de sinais de vibração, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência (SAWALHI,

2007). Assim, é de fundamental importância um estudo de falhas em roletes a partir de métodos já consagrados para máquinas rotativas e rolamentos.

Vários métodos podem ser utilizados para desenvolvimento de técnicas de detecção e diagnóstico de falhas em rolamentos a partir da análise de sinais de vibração (BEZERRA, 2004; MENDEL et al., 2008b), tais como: técnicas de aprendizado por meio de redes neurais artificiais (CASTEJÓN; LARA; GARCÍA-PRADA, 2010; LI et al., 2000; SELIGER; FRANK, 1995; PADOVESE, 2002); em muitos casos empregando-se redes neurais nebulosas (ZIO; GOLA, 2009; GHAFARI, 2007; JANG, 1993); sistemas especialistas por meio de lógica nebulosa (GODDU; LI; HUNG, 1998; FUJIMOTO, 2005; GAO; OVASKA, 2001; MECHEFSKE, 1998; LIU; SINGONAHALLI; IYER, 1996; LIU, 2005; VICENTE; FUJIMOTO; PADOVESE, 2001; VICENTE et al., 2001); entre outros.

Diversos autores classificam a análise de sinais de vibração de rolamentos em três abordagens (CASTEJÓN; LARA; GARCÍA-PRADA, 2010; BEZERRA, 2004): análise no domínio do tempo, análise no domínio da frequência e análise no domínio do tempo-frequência. No domínio do tempo são utilizados parâmetros estatísticos para determinação da ocorrência da falha, tais como valor eficaz (RMS) e curtose. Já no domínio da frequência, uma das técnicas mais utilizadas para detecção e diagnóstico de falhas em rolamentos baseia-se na estimativa de Densidade Espectral de Potência (PSD) do envelope modulante do sinal temporal de falha (CASTEJÓN; LARA; GARCÍA-PRADA, 2010). Finalmente, no domínio do tempo-frequência, uma técnica bastante utilizada é a Transformada de Wavelet, especialmente para sinais com características não estacionárias (CASTEJÓN; LARA; GARCÍA-PRADA, 2010).

Neste trabalho propõe-se uma metodologia de detecção de falhas em rolamentos por meio de um sistema de inferência nebulosa, tendo como entradas parâmetros no domínio do tempo (valor RMS do sinal temporal) e no domínio da frequência (análise de frequências características de defeito por meio da estimativa de densidade espectral de potência do envelope modulante do sinal temporal de falha) obtidos por meio da análise de sinais de vibração simulados e sinais reais de falhas comumente encontradas em rolamentos (falhas nas pistas interna e externa, e falhas nas esferas). Destaca-se que a técnica de detecção de falhas proposta nesta dissertação foi baseada em sinais de vibração simulados, devido à impossibilidade de se obter uma quantidade de dados reais suficiente para implementação da técnica proposta durante o período do trabalho.

A novidade proposta nesta dissertação para análise do espectro de frequências con-

siste na inclusão de informação acerca da incerteza na estimativa da densidade espectral de potência (PSD), permitindo uma análise mais criteriosa das amplitudes de PSD nas frequências de defeito. Além disso, procede-se a uma análise do quão significativas estas amplitudes são em relação a um sinal de ruído de fundo estimado, e qual a probabilidade de serem de fato picos em relação às demais frequências vizinhas no intervalo considerado.

1.1.1 Bancada de Testes de Roletes

A bancada utilizada para os testes, vista nas Figuras 1 (a) e (b), é constituída de quatro roletes e quatro rolos, sendo que os roletes se encontram na região inferior da bancada e os rolos encontram-se na parte superior. Os rolos de carga são acionados por motores e induzem o movimento rotacional nos roletes, por atrito (LOURES, 2006).

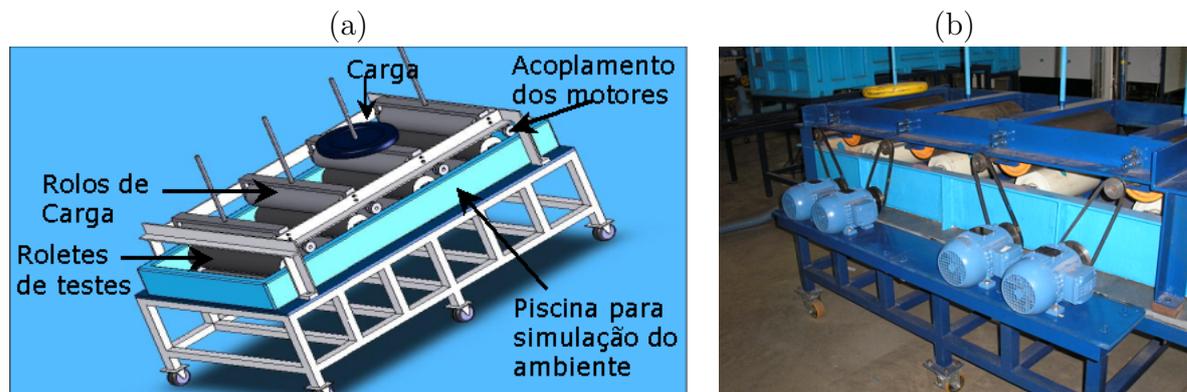


Figura 1: Bancada de ensaio de roletes, em (a) esquema, em (b) foto. Fonte: Grupo de Dinâmica dos Rotores.

O sistema de automação da bancada é composto por (LOURES, 2006): sensores (aceleração, temperatura e proximidade); placas de aquisição de dados; circuitos eletrônicos de condicionamento de sinais e por dois computadores. Desta forma, os sinais analógicos dos sensores são lidos, condicionados e convertidos em sinais digitais pelas placas de aquisição de dados, e apresentados ao usuário.

1.1.2 Planejamento de Testes Experimentais

De acordo com Nascimento et al. (2006), os roletes têm vida útil média de 30 meses, operando em condições normais de carga e velocidade. Portanto, a realização de testes de vida útil em roletes em condições normais torna-se uma tarefa bastante demorada quando se pretende obter um número de amostras significativo que garanta a precisão desejada,

tornando-se praticamente inviável. Para reduzir o tempo de ensaios de roletes, a bancada projetada permite operá-los em velocidades de rotação e em cargas mais elevadas do que aquelas normalmente experimentadas em campo.

A seleção de amostras e a determinação das condições de velocidade e carga para os testes na bancada foram baseadas em teoria de confiabilidade, como visto no Apêndice A. Para tanto, foi realizado o planejamento de testes acelerados de roletes na bancada para se determinar a viabilidade de obtenção de dados de falhas reais durante o período de elaboração deste trabalho. O planejamento dos testes de vida acelerados é importante neste estudo por garantir a confiabilidade dos resultados obtidos para vida útil de roletes, uma vez que estes dados não estão disponíveis na literatura, ou na norma de padronização de roletes de correias transportadoras (ABNT NBR 6678, de janeiro de 1988).

Infelizmente constatou-se, como visto no Apêndice A, a inviabilidade de se obter resultados precisos em tempo hábil para a extrapolação dos dados de testes de vida acelerados para as condições de uso, devido ao grande tamanho de amostras necessário. Isto porque, com a bancada de ensaios apresentada é possível realizar testes de falhas com aproximadamente 12 roletes no período de 18 meses na bancada de ensaios disponível. Entretanto, este número de amostras é insuficiente para se obter uma precisão aceitável na estimativa de vida útil, sendo calculado um erro superior a 50% para este caso. De acordo com o planejamento realizado, seria necessário o ensaio de aproximadamente 11.621 roletes neste curto período de tempo para se obter uma precisão de aproximadamente 10%, por exemplo.

Sendo assim, para possibilitar a validação da metodologia de detecção de falhas proposta por meio de dados de falhas reais, foram induzidos defeitos causados por remoção de material nos rolamentos internos aos roletes. Desgastes deste tipo ocasionam mudanças no sinal de vibração do sistema, que são passíveis de detecção automática.

Esta metodologia de indução de falhas em rolamentos se mostrou fundamental neste trabalho, afinal não seria possível um conhecimento prévio de quais falhas ocorreriam nos roletes submetidos aos testes (ex. falhas nos rolamentos, desbalanceamento, desalinhamento, entre outros), o que talvez dificultaria a obtenção de vários tipos de falhas. A análise destes sinais de falhas reais em rolamentos é de fato importante depois da validação da metodologia com sinais simulados e sinais de falhas induzidas.

1.2 Objetivos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver um sistema de detecção automática de falhas para roletes de correias transportadoras;
- Desenvolver um modelo matemático para o rolete, possibilitando a simulação de falhas comumente encontradas em rolamentos;
- Validar a técnica implementada usando dados simulados;
- Testar a técnica implementada a partir de dados reais de falhas induzidas.

1.3 Metodologia Proposta

Para cumprir o principal objetivo deste trabalho foram obtidos modelos para falhas ocorridas em rolamentos internos dos roletes capazes de produzir sinais de vibração simulados correspondentes àqueles que seriam medidos por sensores vinculados a estrutura mecânica que suporta estes roletes.

O sistema de detecção automática de falhas, por sua vez, foi implementado por meio de uma máquina de inferência nebulosa, tendo como entradas parâmetros no domínio do tempo e no domínio da frequência, obtidos por meio da análise de vibração de sinais temporais.

É importante analisar a metodologia em três grandes áreas: modelagem matemática (obtenção de dados simulados), processamento de sinais (obtenção do envelope do sinal temporal e estimativa da densidade espectral de potência), e inteligência computacional (máquina de inferência nebulosa), conforme visto na Figura 2.

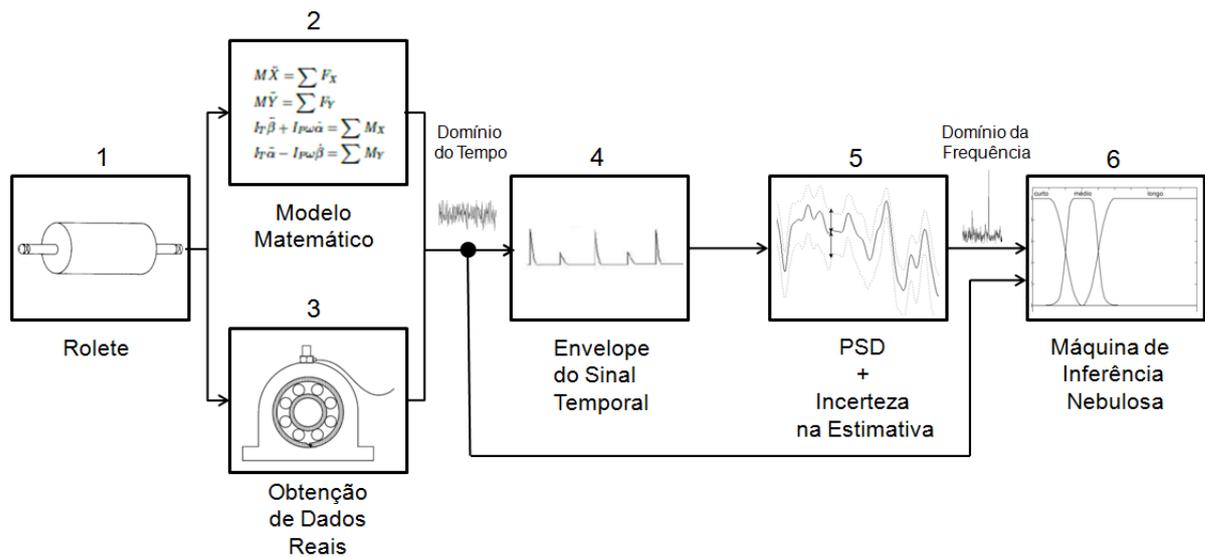


Figura 2: Visão geral do trabalho desenvolvido.

Na Figura 2 observam-se os seguintes sub-sistemas, aos quais podem ser associadas às seguintes atividades realizadas neste trabalho:

1. Roleta:

- Estudo de técnicas de detecção automática de falhas em roletes e em rolamentos;
- Estudo de modelos para rotores rígidos apoiados por mancais de rolamentos e de falhas em rolamentos.

2. Modelo Matemático:

- Implementação de um modelo matemático de falhas em rolamentos, por meio de impulsos gerados por defeitos localizados em rolamentos.

3. Obtenção de Dados Reais:

- Estudo para verificar a melhor forma de induzir falhas em rolamentos;
- Realização de testes experimentais para obtenção de dados reais por meio da indução de defeitos em rolamentos.

4. Envelope do Sinal Temporal

- Obtenção das frequências características de defeitos nas pistas e esferas dos rolamentos.

5. PSD + Incerteza na Estimativa

- Cálculo da estimativa de PSD e da variabilidade dos valores obtidos e o quão significativo determinado pico é com relação ao ruído de fundo;
- Separação dos possíveis picos da estimativa de PSD do ruído de fundo;
- Avaliação da probabilidade de um máximo local da estimativa de PSD ser um pico.

6. Máquina de Inferência Nebulosa

- Implementação da ferramenta de detecção automática de falhas via análise de sinais de vibração;
- Elaboração de regras incorporando a probabilidade de ser pico;
- Aplicação da técnica proposta nos dados simulados e reais;
- Análise dos resultados obtidos.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação será dividida em cinco capítulos e dois apêndices, são eles:

CAPÍTULO 1 - Apresentação da motivação, objetivos do projeto e metodologia utilizada.

CAPÍTULO 2 - Revisão bibliográfica dos modelos matemáticos de falhas em roletes e rolamentos e de técnicas encontradas para detecção de falhas em rolamentos.

CAPÍTULO 3 - Descrição da técnica de detecção de falhas proposta para roletes.

CAPÍTULO 4 - Aplicação da técnica de detecção de falhas em sinais simulados e em sinais de falhas induzidas em rolamentos.

CAPÍTULO 5 - Conclusões e trabalhos futuros.

APÊNDICE A - Investigação sobre o teste de vida acelerada.

APÊNDICE B - Revisão bibliográfica sobre lógica nebulosa.

2 Falhas em Roletes - Modelo Matemático e Técnicas de Detecção de Falhas por Análise de Vibração

2.1 Roletes de Correias Transportadoras de Minério de Ferro

De acordo com a norma ABNT NBR 6171/1988 (Transportadores contínuos - Transportadores de correia - Folga das bordas das correias), os roletes são conjuntos de rolos geralmente cilíndricos capazes de efetuar livre rotação em torno de seu eixo, sendo utilizados para suportar e/ou guiar a correia transportadora. Os dados técnicos dos roletes seguem as especificações da norma a ABNT NBR 6678, de janeiro de 1988.

Os tipos de roletes são (SOUZA et al., 2010):

- Rolete de carga: conjunto de rolos para apoio do trecho carregado das correias;
- Rolete de retorno: conjunto de rolos para apoio do trecho de retorno das correias;
- Rolete de impacto: conjunto de rolos encontrados nos pontos de carregamento, utilizados para absorver o choque resultante do impacto do material nas correias;
- Rolete de auto-alinhador: conjunto de rolos com mecanismos giratórios utilizados para controlar o deslocamento lateral das correias;
- Rolete de transição: conjunto de rolos utilizados para sustentar, guiar e auxiliar a transição entre os roletes e os tambores das correias;

- Rolete de retorno com anéis: rolete de retorno onde os rolos são constituídos de anéis de borracha, utilizado para evitar o acúmulo de material nos roletes, além de promover a retirada do material aderido nas correias;
- Rolete de espiral: rolete de retorno no qual o rolo tem forma de espiral, também utilizado para promover a retirada do material aderido nas correias; e,
- Rolete de catenária: conjunto de rolos suspensos, interligados entre si.

Os roletes de carga, objeto deste trabalho, são compostos por (SILVA; FAGUNDES; GALLI, 2005): eixos, rolamentos, tampa interna, tubo, entre outros. Os eixos dos roletes são fixos, sendo a carcaça responsável pela movimentação do sistema. Cada ponta dos eixos encontra-se suportada em rolamentos, de forma que a distribuição das cargas seja homogênea. As caixas de rolamentos são soldadas ao tubo, formando um “monobloco”, o que permite que o rolete suporte todas as cargas estáticas e dinâmicas de serviço. O tubo é usinado simultaneamente nas caixas de rolamentos das pontas do eixo, o que permite um melhor alinhamento e uma rotação mais suave.

O objeto de estudo deste trabalho são as falhas em rolamentos internos dos roletes.

2.1.1 Falhas em Rolamentos

Os principais componentes de um rolamento são (HARRIS, 1966): pista externa, pista interna, gaiola e esferas/rolos. Na Figura 4, vêem-se estes componentes no rolamento de esferas 1305ATN, utilizado neste trabalho.

Os parâmetros geométricos mais importantes dos rolamentos são: número de esferas (n_b), diâmetro das esferas (D), diâmetro primitivo (d_m) e ângulo de contato (α_c). Como visto na Figura 5(a), também podem ser citados os parâmetros: folga (P_d), diâmetro interno (d_I) e diâmetro externo (d_O). No caso de rolamento de esferas, deve ser levado em consideração o ângulo (ψ_j), visto na Figura 5(b), que é o ângulo existente entre as esferas, dependendo, assim, do número de esferas do rolamento; e ψ_i , que é a posição da esfera submetida ao carregamento, em relação à força aplicada.

As principais causas de falhas em rolamentos são: sobrecarga, desalinhamento, montagem incorreta, armazenamento incorreto, lubrificação inadequada, falha de vedação, descargas elétricas por meio de mancais e fim de vida útil (PONCI; CUNHA, 2005).

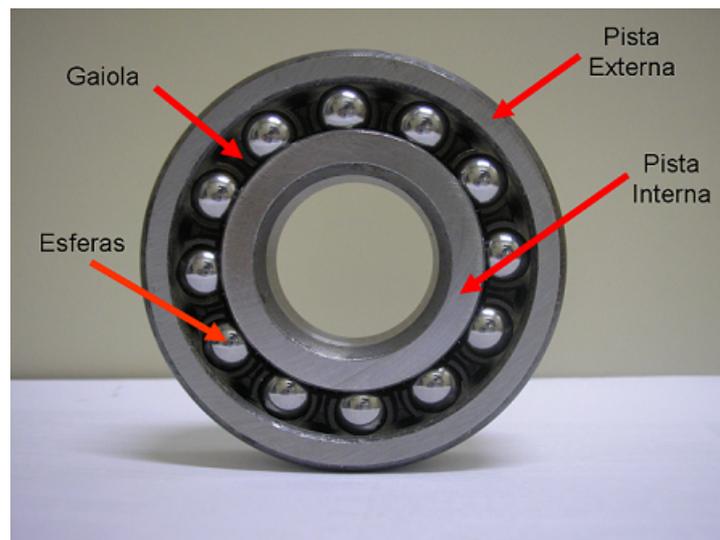


Figura 3: Rolamento de esferas.

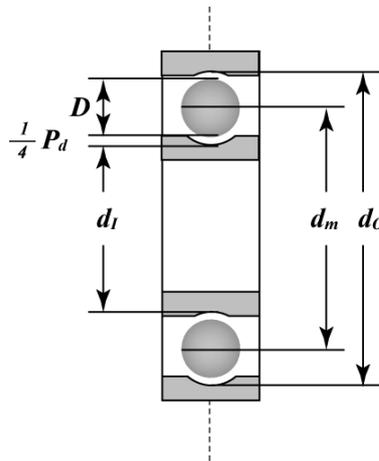


Figura 4: Parâmetros geométricos dos rolamentos.

De modo geral, os rolamentos estão submetidos a cargas radiais, de forma que à medida que os elementos girantes entram e saem da região de carga podem ser observadas vibrações dos rolamentos.

Os defeitos mecânicos em componentes dos rolamentos internos às máquinas rotativas se manifestam como batimentos periódicos sobrepostos a vibrações de baixa frequência do equipamento inteiro. A passagem dos elementos rolantes pelo local da falha produz pulsos de curta duração, excitando a frequência natural da estrutura mecânica (SAWALHI, 2007; MENDEL et al., 2008b). Desta forma são encontradas frequências características de defeito, que só estão presentes nos espectros de vibração no caso de defeito dos rolamentos, ou, pelo menos, quando os componentes dos rolamentos estiverem sujeitos a tensões e deformações

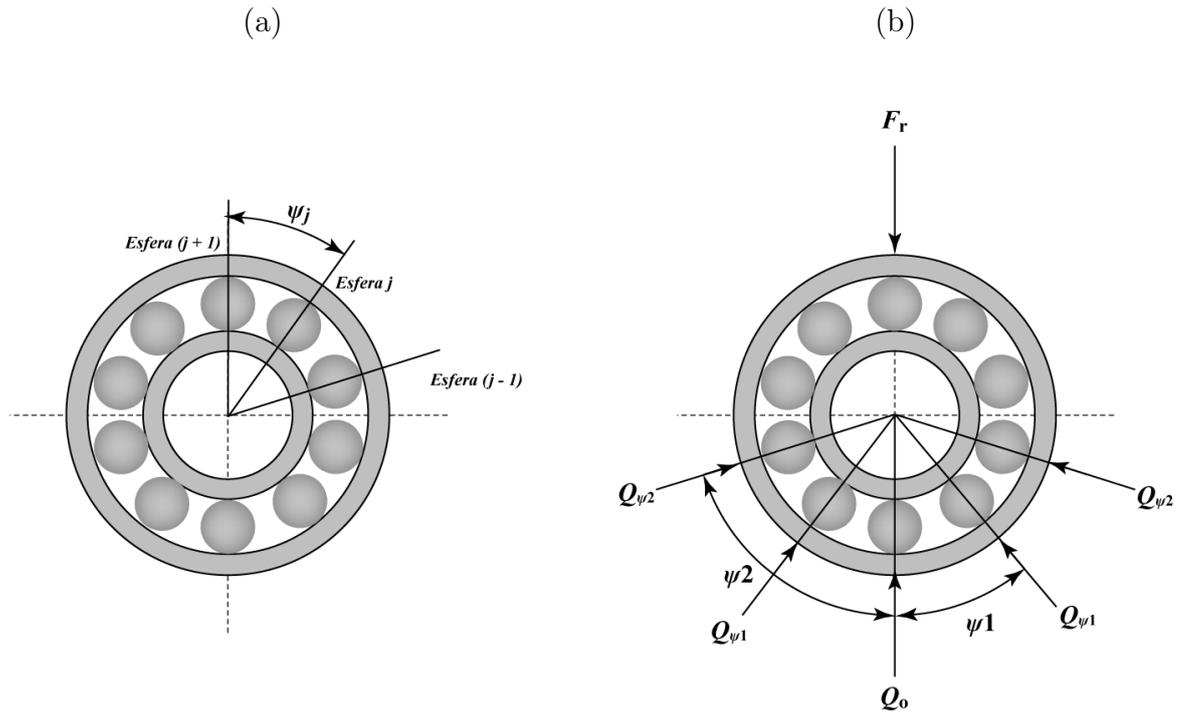


Figura 5: Parâmetros dos rolamentos, em (a) ψ_j que é o ângulo existente entre as esferas, e em (b) ψ_i que é a posição da esfera submetida ao carregamento em relação à força aplicada.

que podem induzir uma falha (MENDEL et al., 2008b).

2.2 Modelo Matemático Proposto para o Rolete

O sistema rotativo foi modelado com base no modelo de eixos rígidos de Stodola-Green (VANACE, 1988; SANTOS et al., 2009), sendo o rolete considerado um rotor rígido, ou seja, não deformável, apoiado em dois mancais, localizados em $Z = \pm L/2$, como visto na Figura 6. No modelo foram considerados o efeito giroscópico e a inércia rotatória.

Na Figura 6, L é o comprimento do eixo; X , Y e Z são os referenciais de espaço físico inercial; e, α e β são os ângulos de Euler, no qual α é o ângulo em torno de Y e β é o ângulo em torno de X .

Um rotor pode ser definido como um sistema composto basicamente por um eixo, um ou mais discos e mancais, que podem ser de rolamentos ou de deslizamento (VANACE, 1988; SILVA, 2004). Um rotor executa movimentos em duas direções ortogonais X e Y , formando órbitas (PEREIRA, 2003; VANACE, 1988): circulares, elípticas e translacionais.

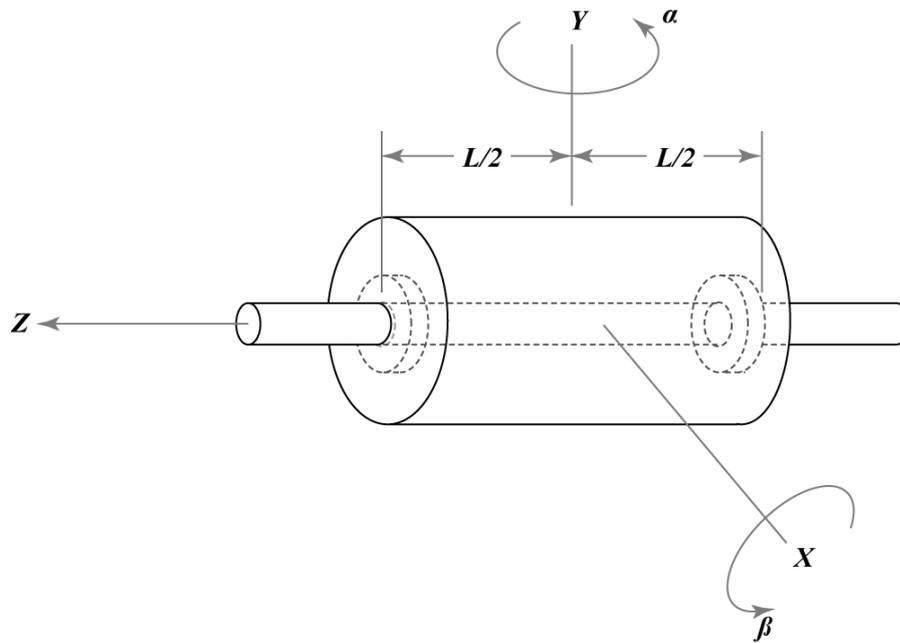


Figura 6: Modelo de rotor rígido longo com suas coordenadas. Fonte: Modificado de (VANACE, 1988).

As equações do movimento de um rotor rígido podem ser obtidas a partir da equação de Lagrange para um disco girante:

$$L = \frac{1}{2}M(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2}I_T(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + \frac{1}{2}I_P(\omega_S^2 - 2\omega_S\dot{\alpha}\dot{\beta}) \quad (2.1)$$

sendo que M é a massa do sistema rotativo, ω_S é a velocidade constante de rotação do sistema rotativo, I_T é o momento transversal de inércia do disco sobre X ou Y, e I_P é o momento polar de inércia do disco sobre Z.

Esta equação expressa a energia cinética do disco calculada em termos dos ângulos de Euler α (em torno de Y) e β (em torno de X).

As equações de movimento do sistema rotor-mancal, obtidas por meio da equação de Lagrange (VANACE, 1988; JANG; JEONG, 2004; FENG; HAHN; RANDALL, 2002; LOPARO et al., 2000), são:

$$M\ddot{X} = \sum F_X; \quad (2.2)$$

$$M\ddot{Y} = \sum F_Y; \quad (2.3)$$

$$I_T \ddot{\beta} + I_P \omega_S \dot{\alpha} = \sum M_X; \quad (2.4)$$

$$I_T \ddot{\alpha} - I_P \omega_S \dot{\beta} = \sum M_Y. \quad (2.5)$$

sendo que para definição das forças F_X e F_Y e dos momentos M_X e M_Y é necessário conhecer as especificações do sistema, para se definir quais das forças a seguir devem ser utilizadas no modelo (VANCE, 1988):

- Forças de atrito e internas exercidas no disco pelo eixo;
- Forças de desbalanceamento de massa;
- Forças hidrodinâmicas;
- Forças de mancais.

Neste trabalho são utilizadas as forças de mancais de rolamentos, afinal a proposta deste trabalho é estudar falhas em roletes por meio de defeitos em rolamentos internos aos mesmos. Este tipo de mancal fornece a rigidez necessária para suportar o peso do rolete, mas não tem praticamente amortecimento ou capacidade de absorver impactos (CORREIA, 2007). Uma característica importante em mancais de rolamentos é o fato de apresentarem, previamente à ocorrência de uma falha mecânica destrutiva, vibrações em alta frequência (SILVA, 2004).

As forças presentes em mancais de rolamentos podem ser representadas como (JANG; JEONG, 2004; PUROHIT; PUROHIT, 2006; TIWARI; GUPTA; PRAKASH, 2000; MENDEL et al., 2008a; KARPENKO; WIERCIGROCH; CARTMELL, 2002; CHANGQING; QINGYU, 2006):

$$\sum F_X = -KX - C\dot{X} - F_x; \quad (2.6)$$

$$\sum F_Y = -KY - C\dot{Y} - F_y + F_r; \quad (2.7)$$

$$\sum M_X = -\frac{1}{2}KL^2\beta - M_x; \quad (2.8)$$

$$\sum M_Y = \frac{1}{2}KL^2\alpha - M_y; \quad (2.9)$$

sendo que K é a rigidez radial do rolamento; C é o amortecimento; e, F_r é a força aplicada na direção radial. Neste trabalho F_r representa a força que o carregamento de

material sobre a correia exerce nos rolamentos internos aos roletes. F_X e F_Y são consideradas neste trabalho as forças não-lineares que atuam nas pistas, estando relacionadas aos impulsos gerados por defeitos em rolamentos. Isto porque de acordo com (FENG; HAHN; RANDALL, 2002), para modelar as forças geradas por rolamentos deve-se levar em conta relações de deformação pela força de contato Hertziana (HARRIS, 1966) e possíveis folgas radiais, introduzindo não-linearidades na dinâmica do sistema.

Desta forma, substituindo-se (2.6) a (2.9) em (2.2) a (2.5), obtém-se para o sistema rotor-mancal:

$$\begin{aligned}
 M\ddot{X} + C\dot{X} + KX + F_X &= 0 \\
 M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY + F_Y &= F_T \\
 I_T\ddot{\beta} + I_P\omega_S\dot{\alpha} + \frac{1}{2}KL^2\beta + M_X &= 0 \\
 I_T\ddot{\alpha} - I_P\omega_S\dot{\beta} + \frac{1}{2}KL^2\alpha + M_Y &= 0
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Para um rotor considerado rígido, se comparado à rigidez do mancal, a rigidez efetiva é a rigidez de todos os mancais trabalhando em paralelo (PEREIRA, 2003; VANCE, 1988). Já para outros casos, nos quais o rotor é relativamente flexível, se comparado à rigidez do mancal, a rigidez efetiva é determinada pela rigidez em flexão do eixo (PEREIRA, 2003).

2.2.1 Parâmetros do Modelo

Para encontrar a rigidez radial (K) de um mancal de rolamentos de esferas para uma dada carga, primeiramente é necessário determinar a distribuição de carga das esferas, e depois relacionar a máxima carga da esfera com a carga aplicada (F_T) (HARRIS, 1966; PRASHAD, 2004):

$$Q_{\max} = \frac{5F_T}{n_b \cos\alpha_c}. \tag{2.11}$$

Considerando-se a força F_T aplicada, a deflexão por contato é obtida como (HARRIS, 1966):

$$\delta_{\text{r}} = \frac{4,62 \times 10^{-5} F_{\text{r}}^{\frac{2}{3}}}{n_{\text{b}}^{\frac{2}{3}} D^{\frac{1}{3}} \cos^{\frac{5}{3}} \alpha_{\text{c}}}. \quad (2.12)$$

Por sua vez, a rigidez radial é dada por (HARRIS, 1966):

$$K = 4,77 \times 10^6 n_{\text{b}} D^{\frac{1}{3}} \delta_{\text{r}}^{\frac{1}{2}} \cos^{\frac{5}{2}} \alpha_{\text{c}}. \quad (2.13)$$

O amortecimento (PEREIRA, 2003) pode ser obtido como:

$$C = 2\zeta \sqrt{K/M}, \quad (2.14)$$

sendo ζ o fator de amortecimento.

Os termos envolvendo os momentos de inércia (I_{P} e I_{T}) em (2.4) e (2.5) são os momentos giroscópicos do rotor. Os momentos de inércia transversal (I_{T}) e polar (I_{P}), considerando o rolete como um cilindro de parede fina com dois discos delgados nas extremidades, podem ser obtidos (SHAMES, 2002) como:

$$I_{\text{P}} = M_{\text{C}} r^2 + m_{\text{d}} r^2 \quad (2.15)$$

$$I_{\text{T}} = \frac{M_{\text{C}}}{2} \left(r^2 + \frac{h^2}{6} \right) + \frac{1}{2} m_{\text{d}} r^2 \quad (2.16)$$

sendo M_{C} a massa da carcaça, r o raio dos discos, m_{d} a massa de cada disco, e h a altura da carcaça do rolete.

A massa m_{d} dos discos pode ser calculada como a diferença entre a massa total e a massa da carcaça M_{C} . A massa da carcaça, por sua vez, pode ser calculada por meio da sua geometria, ou seja, considerando-a como um cilindro de parede fina, usando o produto da massa específica do material pelo seu volume.

2.2.2 Simulação de Impulsos Gerados por Defeitos Localizados em Rolamentos

De acordo com Jang e Jeong (2004), é necessário considerar o número de mancais de rolamentos (N_B) acoplados no eixo do rotor no cálculo das forças não-lineares F_X e F_Y , tal que:

$$F_X = \sum_{k=1}^{N_B} f_{kx}(X, \dot{X}, t) \quad (2.17)$$

$$F_Y = \sum_{k=1}^{N_B} f_{ky}(Y, \dot{Y}, t) \quad (2.18)$$

sendo que f_{kx} e f_{ky} são as não-lineares nas direções X e Y , respectivamente, de cada mancal de rolamento; t é o tempo; e, N_B é o número de mancais de rolamentos. Neste trabalho são utilizados dois mancais de rolamentos de esferas nos roletes ($N_B = 2$).

O primeiro modelo válido para simulação de impulsos gerados por defeitos localizados em rolamentos foi apresentado por McFadden e Smith (1984). Eles propuseram um modelo para descrever a vibração produzida por um defeito em um ponto da pista interna de um rolamento com aplicação de carga constante. O modelo incorporou os efeitos da geometria do rolamento, da velocidade de rotação, da distribuição de carga no rolamento, da função de transferência do sistema e do decaimento exponencial da vibração. A comparação entre o espectro de demodulação do sinal de vibração simulado e o sinal medido confirmou o desempenho satisfatório do modelo McFadden e Smith (1984).

Outro modelo foi proposto alguns anos depois por Sawalhi (2007) (SAWALHI; RANDALL, 2008a, 2008b). Este modelo é baseado no modelo de McFadden e Smith (1984) e no modelo proposto por FUKATA et al. (1985). Sawalhi (2007) propôs a inclusão da Teoria do Contato Hertziana (HARRIS, 1966; JANG; JEONG, 2004; KÄRKKÄINEN; SOPANEN; MIKKOLA, 2007) e de variação temporal da rigidez para obtenção automática das forças não-lineares (F_X e F_Y).

Os dois modelos foram implementados no presente trabalho e apresentaram resultados semelhantes, como esperado. Optou-se por utilizar o primeiro modelo, por ser mais simples e se ter maior controle sobre todos os parâmetros. Desta forma, o modelo proposto

por McFadden e Smith (1984) é detalhado a seguir.

Neste modelo, a passagem de uma superfície por outra com defeito gera forças impulsivas, sendo possível a análise de defeito nas regiões sem e com movimento em relação à região de carregamento. Estes impulsos têm uma curta duração se comparados com o intervalo entre os pulsos, e sua energia está distribuída por uma faixa ampla de frequências. Como resultado, em sinais de vibração de máquinas rotativas podem estar presentes sinais tanto de alta frequência, relacionados às falhas nos rolamentos, quanto de baixa frequência, relacionados com desbalanceamento, desalinhamento e folgas.

No modelo foram consideradas duas situações:

1. Defeito na pista sem movimento em relação à região de carregamento.

Considerando-se que a pista está parada, os impulsos gerados pela passagem do defeito irão ocorrer periodicamente com uma frequência que depende da posição do defeito (MCFADDEN; SMITH, 1984). Devido à pequena duração dos impulsos, na maioria dos casos, a sua forma pode ser desprezada, podendo ser modelados por um trem de impulsos.

$$d(t) = d_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_d) \quad (2.19)$$

sendo que d_0 é a amplitude dos impulsos e T_d é o intervalo temporal entre eles, que depende da velocidade de rotação do rolete. Assim, a frequência de defeito é obtida como: $f_d = 1/T_d$.

Na Figura 7 estão representados os impulsos gerados pela passagem das esferas no defeito da pista estacionária e o sinal de vibração no tempo produzido por este defeito. O espectro de frequência esperado para a pista sem movimento em relação à região de carregamento é visto na Figura 8. Observam-se nesta figura os harmônicos da frequência de defeito.

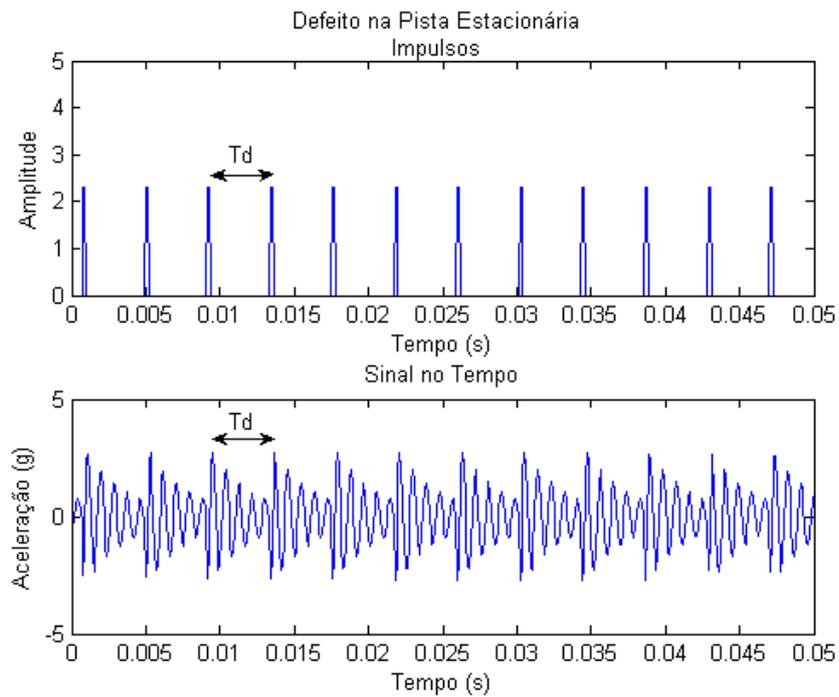


Figura 7: Sinal de vibração da falha na pista estacionária, em (a) impulsos gerados pela passagem das esferas no defeito da pista estacionária, e em (b) sinal de vibração no tempo.

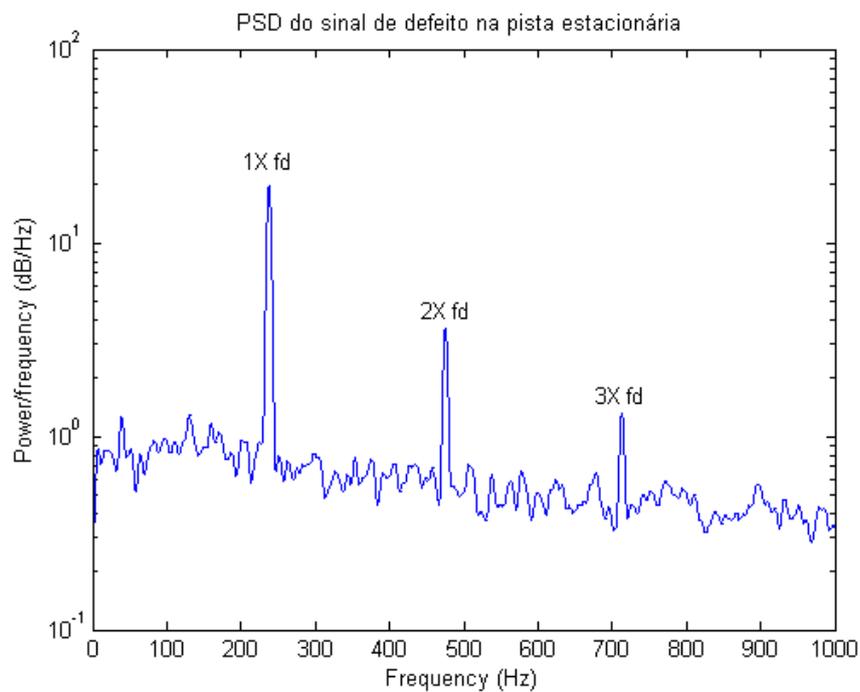


Figura 8: Harmônicos da frequência de defeito da pista estacionária. A frequência da onda moduladora é obtida como: $f_d = 1/T_d$, sendo que T_d está mostrado na Figura 7.

2. Defeito na região com movimento em relação à região de carregamento.

Neste caso, em que o defeito está localizado em uma região que tem movimento em relação à região de carga, os impulsos sofrem uma modulação proporcional ao carregamento (BEZERRA, 2004). Uma forma de representar a amplitude dos impulsos, proposta por McFadden e Smith (1984), é a multiplicação de uma série de impulsos $d(t)$ vista em (2.19) pela distribuição de carregamento $q(t)$:

$$q(t) = \begin{cases} q(0)[1 - \frac{1}{2\varepsilon}(1 - \cos\psi_i)]^n, & \text{se } \psi_{imin} \leq \psi_i \leq \psi_{imax}; \\ 0, & \text{para região fora da faixa de carregamento;} \end{cases} \quad (2.20)$$

sendo $q(0)$ a amplitude da onda modulante; ε o fator de distribuição de carga; e ψ_i a posição da esfera, submetida ao carregamento, em relação à força aplicada.

Na Figura 9 estão representados os impulsos gerados pela passagem das esferas no defeito da região que tem movimento em relação à região de carregamento. O sinal de vibração é visto na Figura 10 e o espectro de frequência esperado para a pista com movimento em relação à região de carregamento é visto na Figura 11.

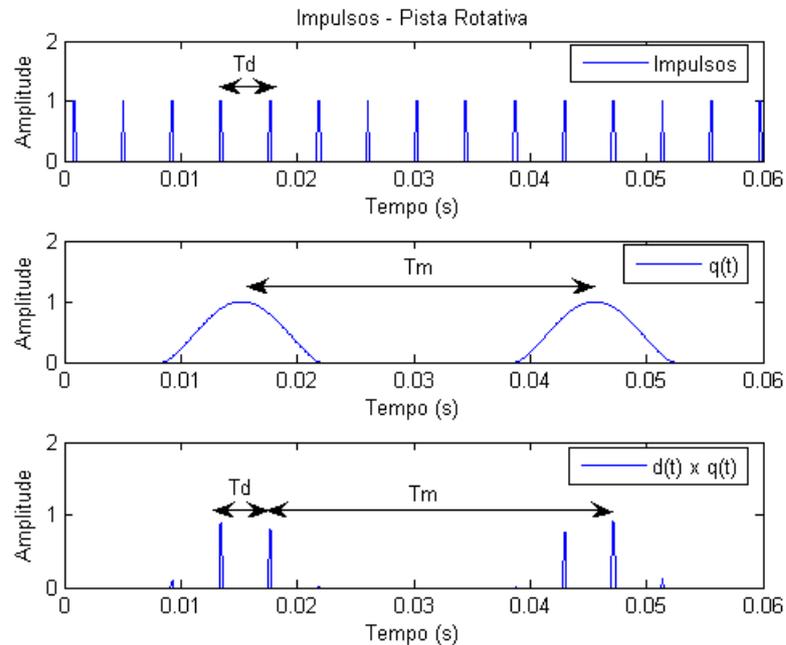


Figura 9: Impulsos gerados pela passagem das esferas no defeito da região que tem movimento em relação à região de carregamento.

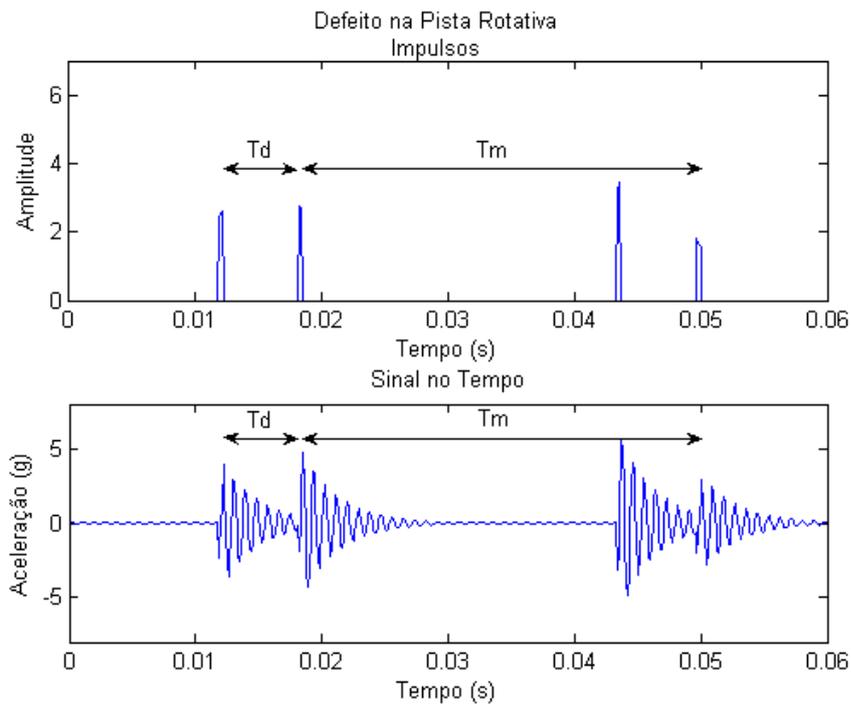


Figura 10: Sinal de vibração da falha na pista rotativa, em (a) impulsos apresentados na Figura 9, e em (b) sinal de vibração no tempo.

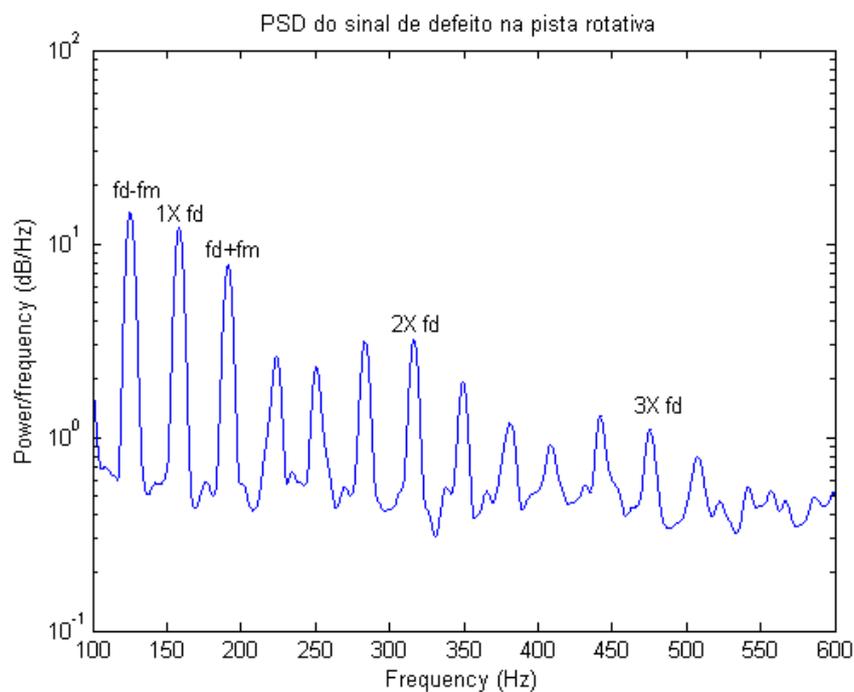


Figura 11: Harmônicos da frequência de defeito da pista rotativa. A frequência da onda moduladora é obtida como: $f_m = 1/T_m$, sendo que T_m está mostrado na Figura 9.

Desta forma, para os componentes dos rolamentos que possuem movimento em relação à região de carregamento mecânico (pista externa e esferas) o defeito se apresenta como um sinal modulado, no qual a onda portadora é semelhante ao sinal de defeito da pista estacionária (pista interna) e a onda modulante tem frequência igual à rotação do componente defeituoso sob carga (BEZERRA, 2004). Com esta modulação surgem bandas laterais à frequência característica do defeito específico, com espaçamento igual à frequência de modulação.

Neste trabalho, a pista interna é estática (fixada ao eixo não girante do rolete) e a pista externa gira com a frequência de rotação do rolete (F_S). Assim, as frequências características de defeitos em rolamentos podem ser calculadas por meio das seguintes equações (HARRIS, 1966; SAWALHI, 2007; BEZERRA, 2004):

$$F_C = \frac{1}{2}F_S\left(1 + \frac{D}{d_m} \cos \alpha_c\right); \quad (2.21)$$

$$F_{BPI} = \frac{n_b}{2}F_S\left(1 + \frac{D}{d_m} \cos \alpha_c\right); \quad (2.22)$$

$$F_{BPO} = \frac{n_b}{2}F_S\left(1 - \frac{D}{d_m} \cos \alpha_c\right); \quad (2.23)$$

$$F_B = \frac{d_m}{2D}F_S\left(1 - \frac{D^2}{d_m^2} \cos^2 \alpha_c\right); \quad (2.24)$$

sendo F_C a frequência de rotação da gaiola; F_{BPI} e F_{BPO} a taxa de passagem das esferas por um ponto das pistas interna e externa, respectivamente; e F_B a frequência associada a defeitos nas esferas.

Desta forma, uma vez que a pista externa possui a mesma velocidade de rotação do rolete, a frequência de modulação será de F_S , no presente caso. Já as esferas giram com a gaiola, sendo a frequência de modulação igual a de F_C .

As frequências características de defeitos e suas bandas laterais podem ser vistas na Figura 12.

2.3 Análise de Sinais de Vibração

As falhas em rolamentos podem ser previstas por meio de análise de sinais de vibração, detectando-se as componentes espectrais características do defeito, além de suas

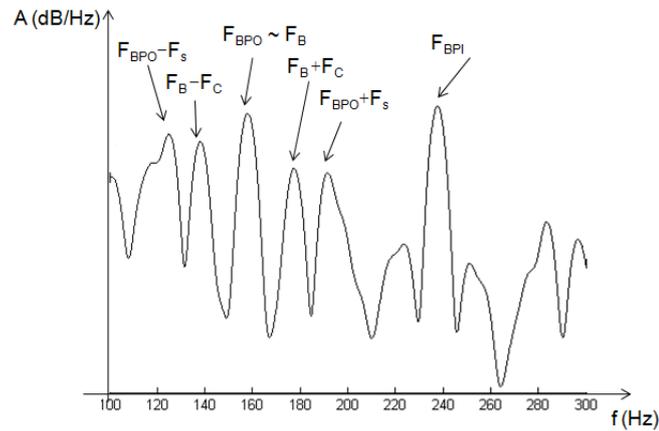


Figura 12: Espectro com as frequências características de defeitos em rolamentos como: na pista interna (F_{BPI}), na pista externa (F_{BPO}) e nas esferas (F_B), além das bandas laterais de falha na pista externa ($F_{BPO} \pm F_s$) e nas esferas ($F_B \pm F_C$).

harmônicas e bandas laterais (PONCI; CUNHA, 2005). O diagnóstico da falha se baseia não somente na intensidade com que essas componentes aparecem, mas também no padrão de distribuição de energia pelas bandas espectrais.

2.3.1 Técnicas no Domínio do Tempo

Dentre as técnicas utilizadas para detecção de falhas em rolamentos estão os métodos estatísticos, que permitem distinguir entre rolamentos com e sem defeitos, sem se estabelecer o tipo específico de defeito (SAWALHI, 2007). Podem ser utilizadas diversas medidas, tais como (ALMEIDA; ALMEIDA, 2005): valor de pico, valor quadrático médio, fator de crista e curtose. Estes parâmetros podem ser definidos matematicamente como visto na Tabela 1.

O valor eficaz ou RMS é o valor relacionado ao nível de energia ou potência de um dado sinal. O parâmetro Curtose é um parâmetro adimensional que representa o momento estatístico de quarta ordem do sinal, indicando o grau de “achatamento” da função de distribuição de probabilidade do sinal (BEZERRA, 2004).

O inconveniente de se usar técnicas para detecção de falhas no domínio do tempo é a distorção causada no sinal por ruídos e interações entre componentes, resultando em um padrão não consistente para todos os parâmetros (SAWALHI, 2007), de forma que se recomenda a tarefa não trivial de se separar o sinal do ruído antes de se utilizar estes métodos.

Tabela 1: Técnicas no Domínio do Tempo. Nas expressões abaixo, $x(t)$ é o sinal temporal de vibração, N é o número de amostras do sinal, σ é o desvio padrão e \bar{x} é o valor médio do sinal temporal.

Variável	Fórmula
Valor de Pico	$\frac{\max[x(t)] - \min[x(t)]}{2}$
RMS	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i)]^2}$
Curtose	$\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i) - \bar{x}]^4}{\sigma^4}$

2.3.2 Técnicas no Domínio da Frequência

As técnicas no domínio do tempo apresentam resultados qualitativos, possibilitando a verificação do surgimento de uma falha qualquer, mas não possibilitam a identificação do local onde a falha ocorreu (BEZERRA, 2004). Para identificar a localização da falha no rolamento (pista interna, pista externa ou esferas) são utilizados métodos no domínio da frequência.

As técnicas no domínio da frequência dependem principalmente do conhecimento do espectro de potência do sinal temporal, o qual pode ser obtido por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), a partir da qual se obtém uma estimativa da Densidade Espectral de Potência (PSD). No caso de detecção de falhas em rolamentos, o espectro é utilizado como uma ferramenta de comparação em relação a uma estimativa de espectro basal, de forma que as falhas são determinadas por mudanças no espectro ocorridas devido ao surgimento de falhas (SAWALHI, 2007).

A análise do sinal de vibração no domínio da frequência depende fundamentalmente de dois conceitos, a saber: (i) envelope de vibrações, e (ii) densidade espectral de potência (PSD). Ambos são descritos abaixo:

1. Envelope de Vibrações

A análise de envelope é uma importante técnica de processamento de sinais, sendo comumente utilizada na detecção de defeitos em rolamentos para extração das frequências características de defeito a partir do sinal de vibração da máquina

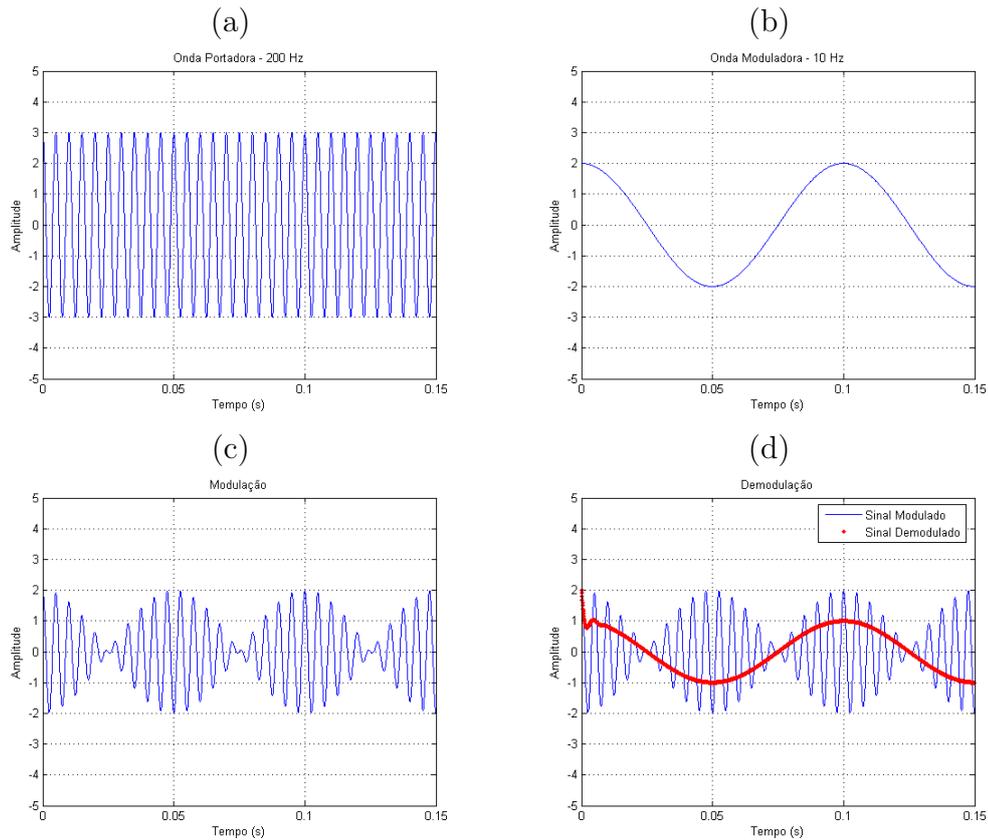


Figura 13: Exemplo de, (a) onda portadora, (b) onda moduladora, (c) onda modulada em amplitude, e (d) demodulação.

(MENDEL et al., 2008b). Esta técnica permite o isolamento dessas frequências e de suas harmônicas e bandas laterais, possibilitando além da identificação da ocorrência das falhas, a classificação das mesmas (PONCI; CUNHA, 2005; MENDEL et al., 2008b). Para que a técnica de envelope de vibrações seja compreendida é necessário o entendimento dos conceitos de: Modulação e Demodulação.

Considerando-se a presença de duas ondas: onda portadora de frequência f_p , e onda moduladora de frequência f_m . Sendo que para o caso dos rolamentos $f_p = f_d$, sendo f_d a frequência característica de defeito do rolamento (vide equações (2.21)) e $f_m = 1/T_m$ (Figura 9) (BEZERRA, 2004; PONCI; CUNHA, 2005). Na Figura 13 estão representadas uma onda portadora de 200 Hz e uma onda moduladora de 10 Hz, sendo que f_m está relacionada a velocidade de rotação do rolete ou da gaiola do rolamento.

A modulação (Figura 13(c)) é a variação de um determinado parâmetro de uma vibração com o tempo. Entre os diversos tipos de modulação, três podem ser destaca-

dos: modulação em amplitude (AM), modulação em frequência (FM), e modulação em fase (PM). Conforme já discutido, quando submetidos a velocidades constantes, os defeitos nos rolamentos sofrem modulação em amplitude (MCFADDEN; SMITH, 1984). No caso da modulação em amplitude, a onda portadora tem sua amplitude modificada proporcionalmente à onda moduladora. É esta modulação que causa o surgimento de bandas laterais à frequência de defeito (f_d) e com espaçamento de valor igual à frequência de modulação (f_m), vide Figura 12 na página 41.

A demodulação (Figura 13(d)) consiste em extrair o envelope ou envoltória do sinal modulado. A técnica de envelope consiste no estudo dos sinais resultantes da demodulação das vibrações de alta frequência presentes em rolamentos defeituosos (SHIN; HAMMOND, 2008). A técnica de envelope pode ser implementada usando-se a transformada de Hilbert (BÜCHNER, 2001). A transformada de Hilbert apresenta uma relação entre as componentes reais e imaginárias de um sinal causal (BEZERRA, 2004), sendo possível a realização da separação das ondas portadoras e moduladoras.

2. Densidade Espectral de Potência

A densidade espectral de potência (PSD)¹ é definida como a Transformada de Fourier da função de autocorrelação de um processo estocástico estacionário (PROAKIS; MANOLAKIS, 1996; SHIN; HAMMOND, 2008), tal que:

$$P_{XX}(t) = \frac{1}{T_p} \int_{T_p} |c_k e^{j2\pi k F_0 t}|^2 dt, \quad (2.25)$$

sendo T_p o período do sinal $x(t)$, c_k os coeficientes da série de Fourier, k são os índices da série de Fourier (ex. $\pm F_0, \pm 2F_0, \dots, \pm kF_0$) e F_0 são os valores de frequência da PSD.

A PSD descreve a distribuição da potência do sinal na frequência (MOLLAZADE et al., 2008).

¹*Power Spectral Density.*

2.4 Sistemas Nebulosos em Detecção e Diagnóstico de Falhas em Rolamentos

Os sistemas nebulosos (cujo detalhamento é apresentado no Apêndice B) possuem algumas vantagens em relação a outras ferramentas de inteligência computacional, tais como (FUJIMOTO, 2005): não é um modelo tipo caixa-preta, como utilizado pelas redes neurais artificiais; possibilita que o especialista utilize os conhecimentos obtidos previamente, ou seja, seus conhecimentos heurísticos; entre outros. Entretanto, os sistemas nebulosos apresentam como desvantagens a difícil e tediosa tarefa de obtenção de conhecimento heurístico a partir de bases de dados e experiência sobre o processo, ou seja, a necessidade de se extrair as informações de um especialista para determinação das regras nebulosas.

Os sistemas nebulosos são utilizados em diagnóstico de falhas de rolamentos nos três domínios já apresentados:

- Domínio do tempo (VICENTE; FUJIMOTO; PADOVESE, 2001; VICENTE et al., 2001; FUJIMOTO, 2005; MOLLAZADE et al., 2008): valor RMS, Curtose, Fator de Crista, entre outros ;
- Domínio da frequência (GODDU; LI; HUNG, 1998; FUJIMOTO, 2005): amplitude em faixas de frequências ou em frequências de passagem de defeitos; razão de pico (relação entre a amplitude em certas frequências e a energia total do espectro);
- Domínio do tempo-frequência (JUNSHENG; DEJIE; YU, 2007): usando-se a Transformada de Wavelet para extração de características.

Alguns outros trabalhos que influenciaram a elaboração desta dissertação são citados a seguir:

1. Liu, Singonahalli e Iyer (1996) fizeram uma comparação de vários parâmetros no domínio do tempo e da frequência, discutindo qual deles é o mais relevante para detecção de falhas em rolamentos. O sistema proposto no artigo utiliza apenas um parâmetro do sinal de vibração como entrada do sistema nebuloso (média de cinco valores da resposta em frequência na região de alta frequência), não descrevendo adequadamente qual o defeito específico no mancal de rolamento.

2. Goddu, Li e Hung (1998) propuseram a análise no domínio do tempo (máximo valor do sinal temporal) e no domínio da frequência (soma das frequências de falhas nas pistas e nas esferas) para detecção de falhas em mancais de rolamentos. A limitação deste trabalho é que não é realizada a classificação da falha, limitando a tomada de decisão do especialista.
3. Mechefske (1998) propôs um sistema nebuloso que detecta apenas a localização da falha (pistas ou esfera), limitando a detecção de outras falhas que podem ser encontradas no sistema, que poderiam ser detectadas por meio de análise do sinal no domínio do tempo, por exemplo. Além disso, Mechefske (1998) utilizou todo o vetor do espectro do sinal de vibração como entrada, o que resulta em informações redundantes, aumentando o esforço computacional e comprometendo o desempenho do sistema de detecção.
4. Vicente, Fujimoto e Padovese (2001) e Vicente et al. (2001) propuseram a criação de uma sistema nebuloso apenas com conhecimentos heurísticos. Este tipo de sistema é muito interessante, pois é desenvolvido com todo o conhecimento de um especialista no processo, apesar de ser extremamente fadigante dependendo da quantidade de dados a serem analisados e da quantidade de regras a serem criadas para solução do problema.
5. Fujimoto (2005), por sua vez, propôs uma metodologia de construção automática dos sistemas nebulosos de diagnóstico (criação automática das funções de pertinência de entrada e das regras de inferência), por meio de banco de dados experimentais compostos por sinais de vibração, com sinais normais e de diversas falhas em mancais de rolamentos. São utilizadas como entradas do sistema de inferência nebulosa: parâmetros no domínio do tempo (RMS, Curtose, Valor de Pico e Energia Residual) e parâmetros no domínio da frequência (amplitude máxima da frequência do sinal em determinadas faixas de frequências, PSD do sinal temporal, e envelope do sinal temporal). No trabalho apresentado, as fases de detecção e classificação foram realizadas em conjunto, sendo mais eficiente a realização destas duas fases de forma separada, para apresentação de vários tipos de falhas e facilidade na tomada de decisão do especialista.

A análise dos trabalhos acima conduziu à conclusão de que a utilização de parâmetros do sinal de vibração de mancais de rolamentos permite comprimir grande quantidade

da informação, por meio da utilização das principais características que descrevem os defeitos.

Nos trabalhos estudados não foi encontrada a análise da incerteza inerente à densidade espectral de potência (PSD), ou a incorporação desta incerteza como uma entrada de uma máquina de inferência nebulosa.

3 Técnica Proposta para Detecção de Falhas em Roletes

Neste capítulo é apresentada a metodologia para detecção e classificação automática de falhas em rolamentos internos de roletes, implementada por meio de uma máquina de inferência nebulosa com a análise de sinais de vibração no domínio do tempo e no domínio da frequência.

3.1 Estrutura da Máquina de Inferência Nebulosa

A estrutura proposta para a máquina de inferência nebulosa é composta por duas etapas (Figura 14): análise no domínio do tempo e análise no domínio da frequência.

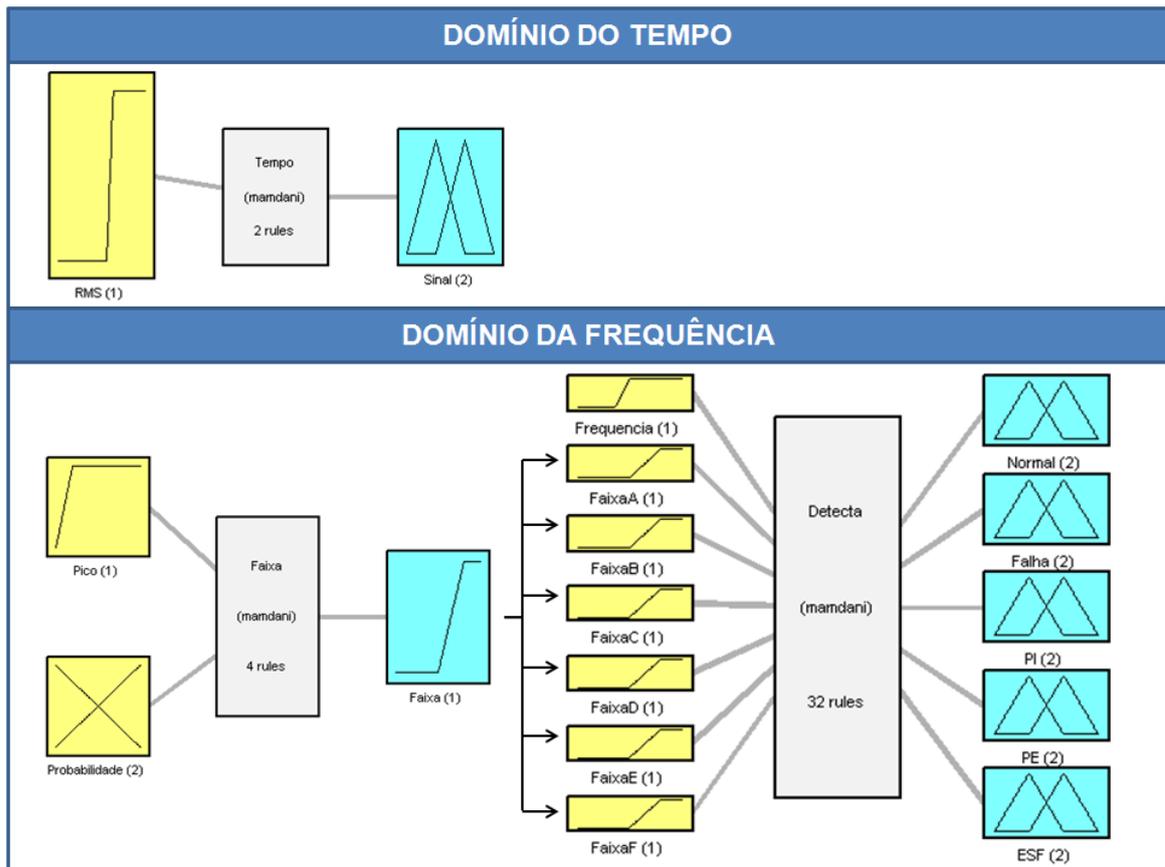


Figura 14: Representação gráfica da Máquina de Inferência Nebulosa proposta.

A máquina de inferência nebulosa foi implementada no programa de cálculo numérico MatLab[®] no ambiente *Fuzzy Logic Toolbox*. Na Figura 15 é apresentada a configuração do sistema de inferência nebulosa Mamdani utilizado neste trabalho.

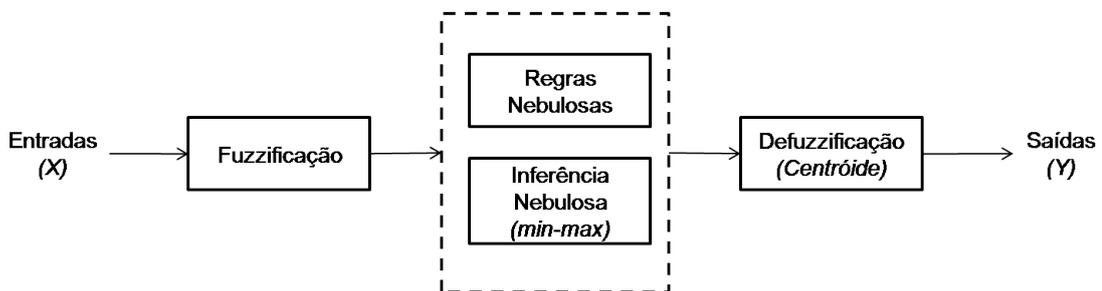


Figura 15: Configuração da máquina de inferência nebulosa.

Como visto, foi implementada a fuzzificação, a inferência nebulosa ("*min-max*") e a defuzzificação (por meio do método centróide) para um sistema com variáveis de entrada (X) e variáveis de saída (Y).

3.2 Análise de Vibração para Obtenção das Entradas da Máquina de Inferência Nebulosa

3.2.1 Análise no Domínio do Tempo

O parâmetro utilizado neste trabalho é o valor eficaz, definido como

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i)]^2} \quad (3.1)$$

sendo $x(i)$ valores amostrados de um sinal contínuo, e N o número total de amostras.

3.2.2 Análise no Domínio da Frequência

Neste trabalho foi realizada a análise da variação da densidade espectral de potência do envelope ou envoltória do sinal temporal para diagnóstico de falhas em rolamentos, assim como a incerteza associada à mesma.

3.2.2.1 Técnica de Envelope de Vibrações

A análise de envelope do sinal temporal é obtida por meio de quatro estágios consecutivos neste trabalho (MENDEL et al., 2008b), a saber: (i) filtragem do sinal com um filtro passa-banda de forma a eliminar parte do ruído em altas frequências e baixas frequências associadas a desbalanceamento e desalinhamento; (ii) aplicação da Transformada de Hilbert para obtenção do envelope ou envoltória $x(t)$ do sinal de vibração (o que corresponde a um procedimento de demodulação); (iii) cálculo da Transformada Rápida de Fourier (FFT)¹ do sinal $x(t)$; e finalmente (iv) cálculo da estimativa de densidade espectral de potência.

3.2.2.2 Cálculo da Estimativa de Densidade Espectral de Potência (PSD)

Neste trabalho a PSD foi estimada através da partição da série temporal original em janelas de comprimento finito, com sobreposição, para as quais procedeu-se ao cálculo da FFT, conforme apresentado a seguir. Na Figura 16 representa-se esquematicamente o procedimento utilizado.

¹*Fast Fourier Transform.*

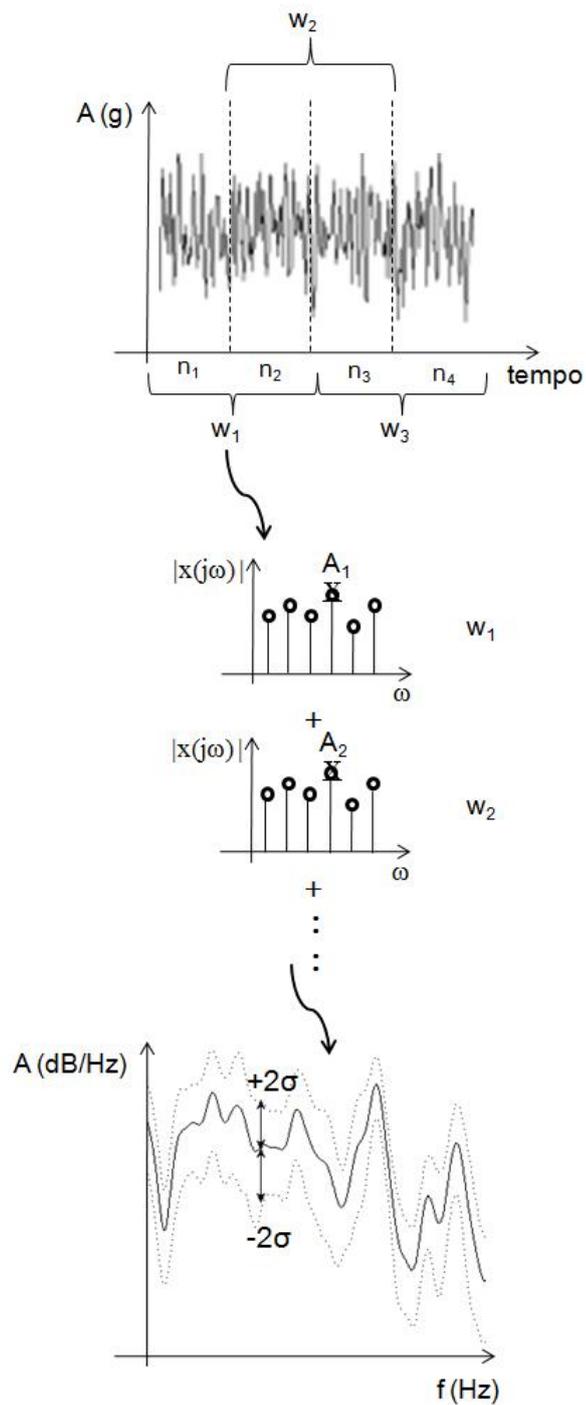


Figura 16: Representação gráfica do procedimento de cálculo da estimativa de Densidade Espectral de Potência.

1. **Escolha do comprimento das janelas L_W :** Determinando-se a resolução desejada r_W no domínio da frequência por meio da análise de distância mínima entre as frequências características de defeito ($r_W = 13\text{ Hz}$), considerando a largura B do lóbulo principal associado à transformada de Fourier da função de janelamento

escolhida, e conhecendo-se a frequência de amostragem f_S do sinal, tem-se que (SMITH, 2009):

$$L_W \geq Bf_S/r_W. \quad (3.2)$$

2. **Número de janelas N_W :** O número de janelas foi definido considerando-se o comprimento N do vetor de dados e o comprimento L_W de cada janela, para o caso em que a sobreposição entre janelas consecutivas é de $s_W = L_W/2$. Ou seja:

$$k = \frac{N - s_W}{L_W - s_W} = \frac{2N - L_W}{L_W}. \quad (3.3)$$

3. **Cálculo da PSD via Periodograma modificado:** O periodograma modificado foi calculado considerando-se uma função de janelamento de Hamming $w(l)$, $l = 1, 2, \dots, k$, juntamente com o cálculo da FFT para cada janela n de dados, de forma que

$$S_n(\omega) = \frac{\frac{1}{L_W} \sum_{l=1}^{L_W} |w(l)x_n(l)e^{-j\omega l}|^2}{\frac{1}{L_W} \sum_{l=1}^{L_W} |w(l)|^2}, \quad (3.4)$$

sendo que a sequência $x_n(l)$ corresponde aos valores da série temporal para uma dada janela n . A estimativa de PSD pode então ser obtida como

$$\begin{aligned} P_{xx}^n &= \frac{1}{f_S} S_n(\omega), \\ P_{xx}(\omega) &= \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k P_{xx}^n(\omega). \end{aligned} \quad (3.5)$$

4. **Incerteza na estimativa de PSD:** A incerteza associada a cada amplitude de densidade espectral em cada frequência ω foi calculada como o desvio-padrão amostral dos valores de PSD obtidos para cada janela, isto é,

$$\sigma(\omega) = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{n=1}^k (P_{xx}^n - P_{xx})^2}. \quad (3.6)$$

No gráfico apresentado na Figura 16, os limites de incerteza mostrados foram obtidos como $\pm 2\sigma(\omega)$. No caso hipotético de uma distribuição Gaussiana para os valores de PSD em uma dada frequência ω , isto representaria um probabilidade de 95% de se encontrar o valor verdadeiro da PSD no interior deste intervalo.

A estimativa de incerteza $\sigma(\omega)$ possibilita calcular a probabilidade de que um dado máximo local da PSD do sinal de vibração seja realmente um pico, se comparado aos valores vizinhos, conforme será apresentado na próxima seção.

3.2.2.3 Detecção de Picos

Para a detecção dos picos, o intervalo foi dividido em seis faixas: A, B, C, D, E e F. As faixas cobrem as frequências características de defeitos e as bandas laterais apresentadas na Figura 12. A largura utilizada em cada faixa é igual à resolução definida na estimativa da densidade espectral de potência (PSD), exceto para a faixa F, uma vez que não se têm bandas laterais de outras falhas neste intervalo. Além disso, analisando-se sinais simulados e reais, verificou-se que os picos podem aparecer mais afastados da frequência característica de falhas na faixa F.

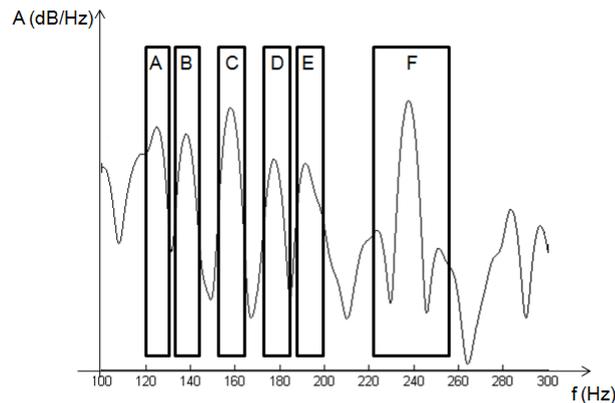


Figura 17: Divisão do intervalo de análise de defeitos em rolamentos em faixas de interesse.

A cada valor de pico $j = 1, 2, \dots, m$ de densidade espectral de potência foi associada sua probabilidade p_j de ser pico, além de seu valor de amplitude v_j , sendo m o número de máximos locais existentes em determinada faixa. Na Figura 18 apresenta-se um exemplo de uma possível situação encontrada em uma das faixas de um espectro de frequências.

Considerando-se a situação mostrada na Figura 18, vê-se, a partir da análise das estimativas de amplitude de PSD e ignorando as barras de incerteza, que há dois possíveis máximos locais ($m = 2$), a saber: máximo local “b” ($j = 1$), e máximo local “d” ($j = 2$). Por exemplo, para se avaliar a probabilidade de o máximo local “b” ser um pico, consideram-se os valores das amplitudes mostradas na Figura 18 como sendo v_a , v_b e v_c , em torno e incluindo o ponto “b”, e procede-se à análise da seguinte afirmação:

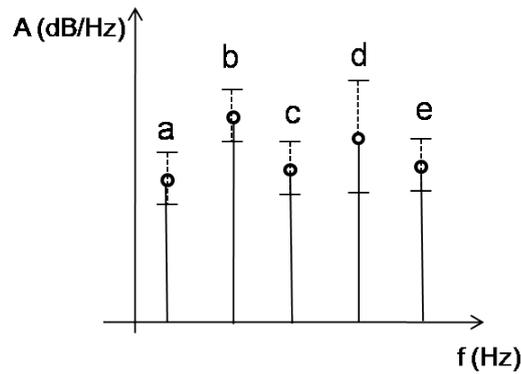


Figura 18: Exemplo de valores de PSD estimados, e suas repetivas incertezas, para uma dada faixa de frequências.

Se $(v_a < v_b)$ e $(v_b > v_c)$, então “b” é um pico.

Supondo-se uma distribuição Normal para os valores de v_a , v_b e v_c , isto é,

$$v_a \sim N(\bar{v}_a; \sigma_a),$$

$$v_b \sim N(\bar{v}_b; \sigma_b),$$

$$v_c \sim N(\bar{v}_c; \sigma_c),$$

a probabilidade de a afirmação acima ser verídica corresponde ao produto das probabilidades,

$$p_1 = p((v_b - v_a) > 0)p((v_b - v_c) > 0), \quad (3.7)$$

supondo-se eventos independentes. As probabilidades nesta última expressão podem ser computadas considerando as distribuições de probabilidade Gaussianas para as variáveis diferença:

$$\begin{cases} v_{ba} = v_b - v_a, \\ v_{ba} \sim N(\bar{v}_b - \bar{v}_a; \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}), \end{cases} \quad \begin{cases} v_{bc} = v_b - v_c, \\ v_{bc} \sim N(\bar{v}_b - \bar{v}_c; \sqrt{\sigma_b^2 + \sigma_c^2}), \end{cases}$$

$$\Rightarrow p_1 = p(v_{ba} > 0)p(v_{bc} > 0).$$

O resultado em (3.7) é uma estimativa da probabilidade de que o ponto “b” seja de fato um pico, levando-se em consideração as incertezas associadas aos valores de PSD obtidos no procedimento anterior.

Os componentes próximos às frequências espectrais de falha são também importantes, devido ao vazamento espectral obtido após o cálculo da PSD, mesmo escolhendo-se uma função de janelamento adequada. Por isso, empregou-se a seguinte média ponderada para se obter, para cada faixa avaliada, um único valor de pico representativo para toda a faixa:

$$X_{\text{Valor}} = \frac{v_1 p_1 + v_2 p_2 + \dots + v_m p_m}{p_1 + \dots + p_m}. \quad (3.8)$$

O valor de probabilidade associado a cada pico é:

$$X_{\text{Probabilidade}} = \max\{p_1, p_2, \dots, p_m\}. \quad (3.9)$$

É interessante notar a similaridade da expressão acima com um procedimento de inferência nebulosa, considerando-se as probabilidades p_j como graus de pertinência a uma suposta classe “é um valor de pico”, além do uso operador de disjunção “max” para prover um resultado indicativo da existência de algum pico em uma dada faixa, dentre os m valores testados.

Para avaliação do quão significativo o valor é em relação ao ruído de fundo, foi implementada a variável de entrada X_{Pico} , sendo avaliada como a distância do X_{Valor} ao nível de ruído estimado, normalizada pela variabilidade na estimativa do ruído:

$$X_{\text{Pico}} = \frac{X_{\text{Valor}} - X_{\text{Ruido}}}{\sigma_{\text{Ruido}}}. \quad (3.10)$$

3.2.2.4 Estimativa do Ruído de Fundo

O valor da densidade espectral de potência de ruído de fundo X_{Ruido} foi estimado como sendo a mediana de todos os valores de PSD obtidos em (3.5). O uso da mediana tem a função de evitar a polarização introduzida por valores de pico muito distantes da média, na estimativa do valor “típico” de PSD que é visto como uma estimativa do ruído de fundo. A incerteza σ_{Ruido} nessa estimativa foi obtida pelo cálculo da raiz quadrada do desvio quadrático médio entre os valores de PSD e o valor da mediana, como visto no histograma da Figura 19.

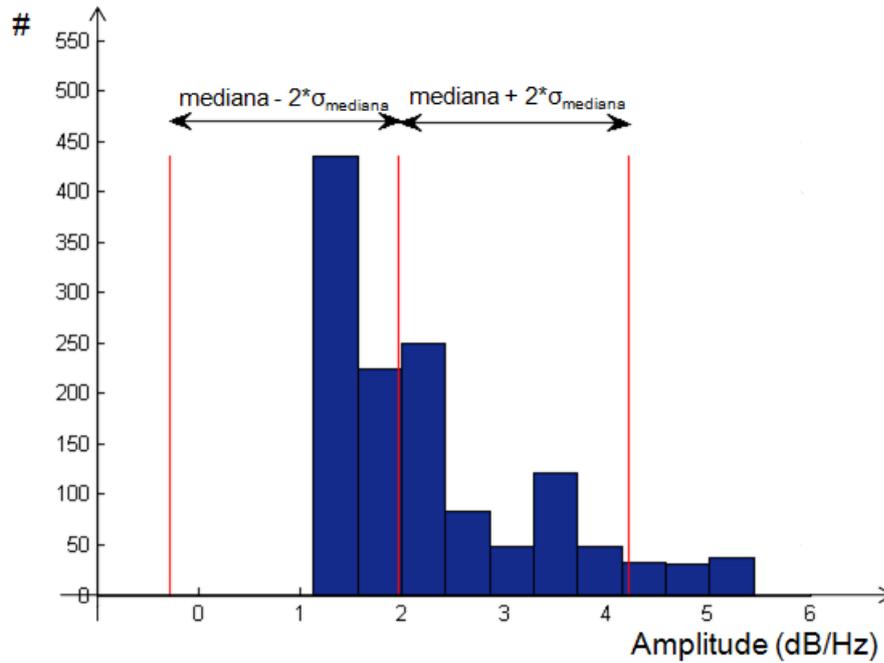


Figura 19: Histograma da mediana da estimativa da Densidade Espectral de Potência.

Para testar, de forma global, se há picos quaisquer que conduziram a uma diferença entre a PSD média e a PSD mediana (estimativa do ruído de fundo) no domínio da frequência, foi implementada a variável $X_{\text{Frequencia}}$:

$$X_{\text{Frequencia}} = \frac{X_{\text{media}}}{X_{\text{Ruido}}}, \quad (3.11)$$

sendo que X_{media} corresponde a média de todos os valores de PSD obtidos em (3.5). Valores maiores do que 1 desta variável sinalizam a presença de picos de alta amplitude isolados da densidade mediana de potência espectral.

3.3 Sub-Sistemas da Máquina de Inferência Nebulosa

Para estruturação da metodologia foram propostas as análises de parâmetros nos domínios do tempo (Seção 3.2.1) e da frequência (Seção 3.2.2). Para a avaliação destes parâmetros foram propostos três sub-sistemas de inferência nebulosa, denominados *Tempo*, *Faixa* e *Detecta*, que são a seguir descritos. O sub-sistema *Tempo* é responsável pela análise no domínio do tempo. Os sub-sistemas *Faixa* e *Detecta* são responsáveis pela análise no domínio da frequência.

1. Sub-sistema de Inferência Nebulosa: **Tempo**

Neste sub-sistema, acionado em separado dos outros descritos abaixo, utiliza-se o valor eficaz do sinal de vibração para se determinar se há falha ou não, sem se preocupar com a localização ou classificação da mesma. Trata-se de um sub-sistema usado para detectar mesmo falhas não caracterizadas no domínio da frequência, tal que:

$$X_{\text{RMS}} \mapsto \{A\}, \quad (3.12)$$

$$Y_{\text{Sinal}} \mapsto \{NF, F\}, \quad (3.13)$$

sendo que o conjunto nebuloso “ X_{RMS} é Alto” está representado pela letra A ; e os conjuntos “ Y_{Sinal} é Não Falha” e “ Y_{Sinal} é Falha”, os quais são evidentemente complementares, estão representados por NF e F , respectivamente.

A função de pertinência associada ao conjunto “ X_{RMS} é Alto” foi escolhida trapezoidal, na qual os valores de seus parâmetros (vistos na Figura 58(b) do Apêndice B na página 104) foram definidos a partir de dados simulados, de acordo com a Figura 20. Assim, se o valor eficaz do sinal de vibração é igual ou menor do que o máximo valor eficaz encontrado nos sinais simulados sem falha, o sinal é considerado normal com grau de pertinência 1. Valores eficazes maiores que o mínimo valor de sinais simulados com falha, são considerados falha com grau de pertinência 1. Os valores dos parâmetros são vistos na Figura 21 (a).

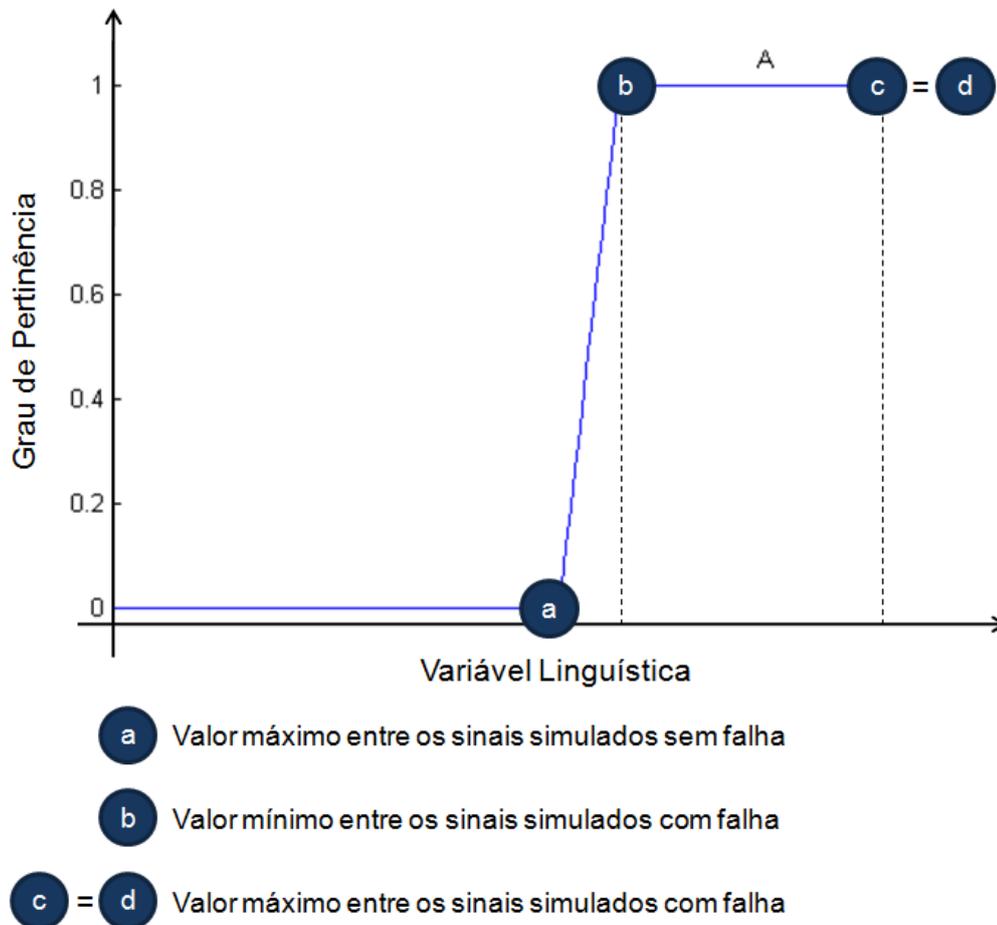


Figura 20: Detalhamento da função de pertinência trapezoidal da variável de entrada X_{RMS} do sub-sistema de inferência nebulosa *Tempo*.

A saída deste sub-sistema de inferência nebulosa possui duas funções de pertinência triangulares, podendo o sinal ser classificado como falha ou não falha, como visto na Figura 21(b).

2. Sub-sistema de Inferência Nebulosa: *Faixa*

Neste sub-sistema avalia-se se determinada faixa (A, B, C, D, E e F), conforme discutido na Seção 3.2.2.3, é ou não importante na classificação da falha, levando-se em consideração se X_{Pico} , obtido em (3.10), é significativo (S) em relação ao ruído de fundo estimado; e se o valor de $X_{Probabilidade}$, calculado em (3.9) para a faixa, é Alto (A) ou Baixo (B). Assim, têm-se duas variáveis relacionadas à incerteza na estimativa da PSD como entrada do sub-sistema nebuloso, e uma variável como

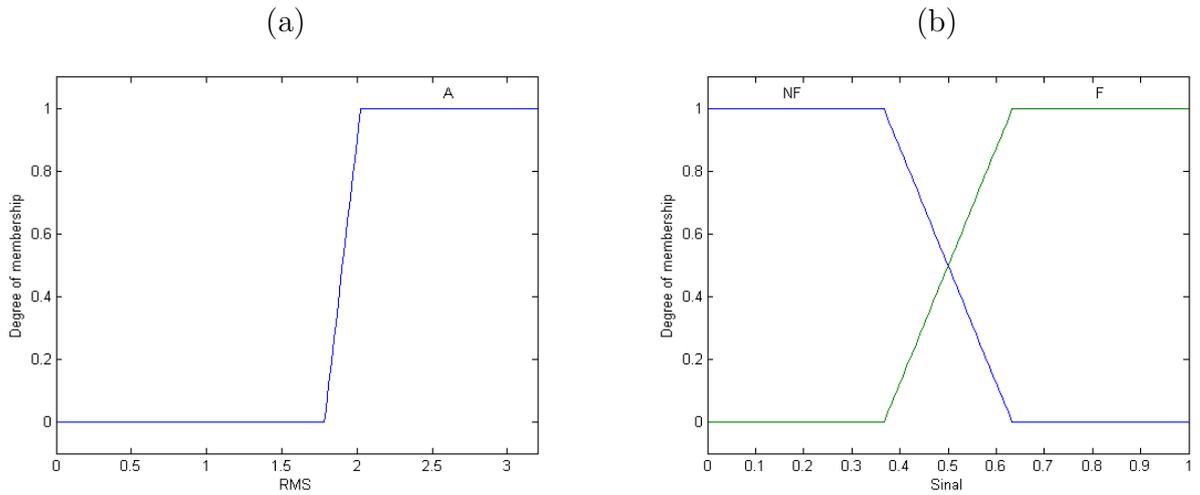


Figura 21: Funções de pertinência para os conjuntos nebulosos: (a) “ X_{RMS} é Alto”, e em (b) “ Y_{Sinal} é Falha” e “ Y_{Sinal} é Não Falha”.

saída (Y_{Faixa}), a qual está associada ao conjunto nebuloso “ Y_{Faixa} é Importante”:

$$\begin{aligned} X_{\text{Pico}} &\mapsto \{S\}, \\ X_{\text{Probabilidade}} &\mapsto \{B, A\}, \\ Y_{\text{FaixaA}} \text{ a } Y_{\text{FaixaF}} &\mapsto \{I\}. \end{aligned}$$

Definiu-se que se X_{Pico} estiver acima do intervalo de confiança de 95% (pico “a” da Figura 22) ele é significativo com grau de pertinência 1. Para valores entre o nível de ruído e o intervalo de confiança de 95% (pico “b” da Figura 22), o grau de pertinência será avaliado de acordo com sua localização, sendo 0 se o valor for igual ao nível de ruído e 0,5 se o valor for igual a um desvio padrão do nível de ruído, como visto na Figura 23 (a).

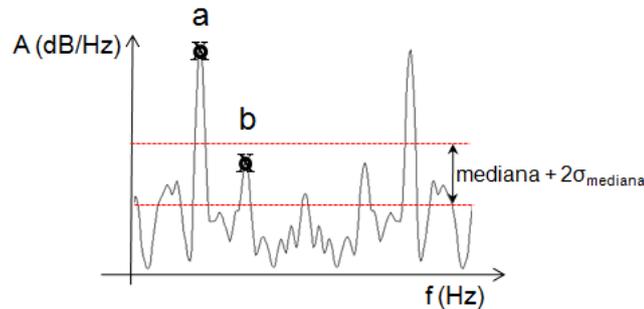


Figura 22: Parâmetro Valor com o respectivo intervalo de confiança.

Para $X_{\text{Probabilidade}}$ foram implementadas duas funções triangulares complementares,

de forma que probabilidades acima de 0,5 sejam consideradas altas, com grau de pertinência igual à própria probabilidade de ser pico, como visto na Figura 23(b).

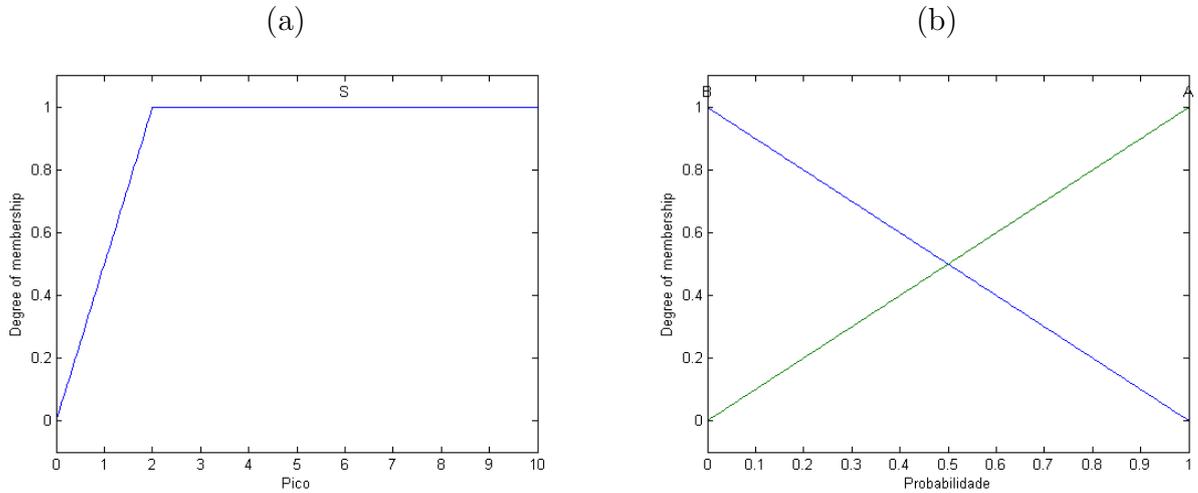


Figura 23: Funções de pertinência para os conjuntos nebulosos: (a) “ X_{Pico} é Significativo”, e em (b) “ $X_{\text{Probabilidade}}$ é Baixa” e “ $X_{\text{Probabilidade}}$ é Alta”.

Para a saída foram realizados vários ajustes, até que fosse encontrada aquela que melhor representasse a importância de determinada faixa para este conjunto de dados. Assim, considerou-se que abaixo de 0,5 a faixa é não importante e acima de 0,5 até 0,8 a faixa é importante com determinado grau de pertinência. Acima de 0,8 a faixa é importante com grau de pertinência 1, como visto na Figura 24.

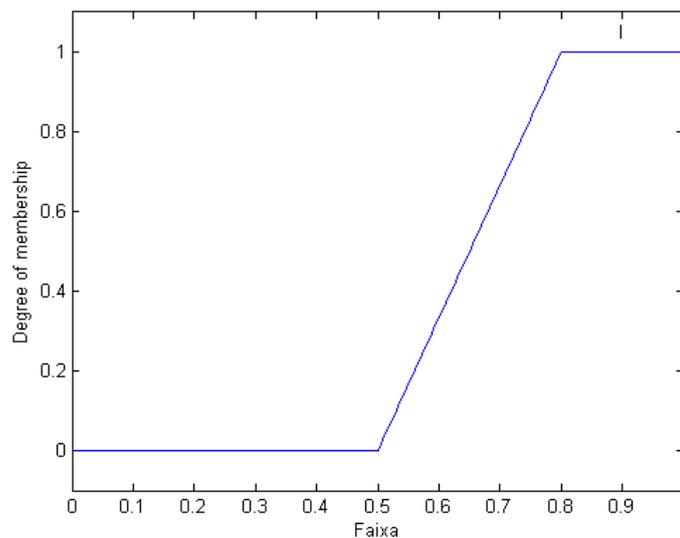


Figura 24: Função de pertinência para o conjunto nebuloso “ Y_{Faixa} é Importante”.

Assim, este sub-sistema de inferência foi aplicado em cada faixa (A, B, C, D, E e F), e suas saídas foram as entradas do sub-sistema de inferência nebulosa **Detecta**, descrito abaixo.

3. Sub-sistema de Inferência Nebulosa: *Detecta*

Neste sub-sistema processa-se tanto detecção, quanto classificação de falhas. Desta forma, a inferência para detecção é suplementar àquela obtida no sub-sistema **Tempo**, descrito anteriormente. Para tanto, uma nova variável foi criada e denominada $X_{\text{Frequencia}}$, conforme discutido na Seção 3.2.2.4, a qual recebe um grau de pertinência ao conjunto “ $X_{\text{Frequencia}}$ é Alto”.

Obtêm-se então cinco variáveis linguísticas como saída (Y_{Normal} , Y_{Falha} , Y_{PI} , Y_{PE} e Y_{ESF}), as quais estão associadas aos conjuntos nebulosos “ Y é Significativo” e “ Y é Não Significativo”, para cada saída. No qual Y_{PI} é a variável de saída referente a falha na pista interna; Y_{PE} é a variável de saída referente à falha na pista externa; e, Y_{ESF} é a variável de saída referente à falha nas esferas. Neste caso, as variáveis de saída Y_{Normal} e Y_{Falha} são utilizadas para avaliar se há ou não há uma falha no rolamento, enquanto as variáveis de saída Y_{PI} , Y_{PE} e Y_{ESF} são utilizadas para localizar a falha, informando em qual dos componentes do rolamento a mesma ocorreu.

$$\begin{aligned} X_{\text{Frequencia}} &\mapsto \{A\}, \\ X_{\text{FaixaA}} \text{ a } X_{\text{FaixaF}} &\mapsto \{I\}, \\ Y_{\text{Normal}}, Y_{\text{Falha}}, Y_{\text{PI}}, Y_{\text{PE}}, Y_{\text{ESF}} &\mapsto \{NS, S\}. \end{aligned}$$

A função de pertinência para “ $X_{\text{Frequencia}}$ é Alto (A)” foi escolhida trapezoidal, na qual os valores de seus parâmetros foram definidos de acordo com os dados simulados, como visto na Figura 25. Assim, caso a média seja igual ou menor do que o nível de ruído estimado, são considerados normais com grau de pertinência 1. Valores de $X_{\text{Frequencia}}$ maiores que 1,5 são considerados falha com grau de pertinência 1, como visto na Figura 26.

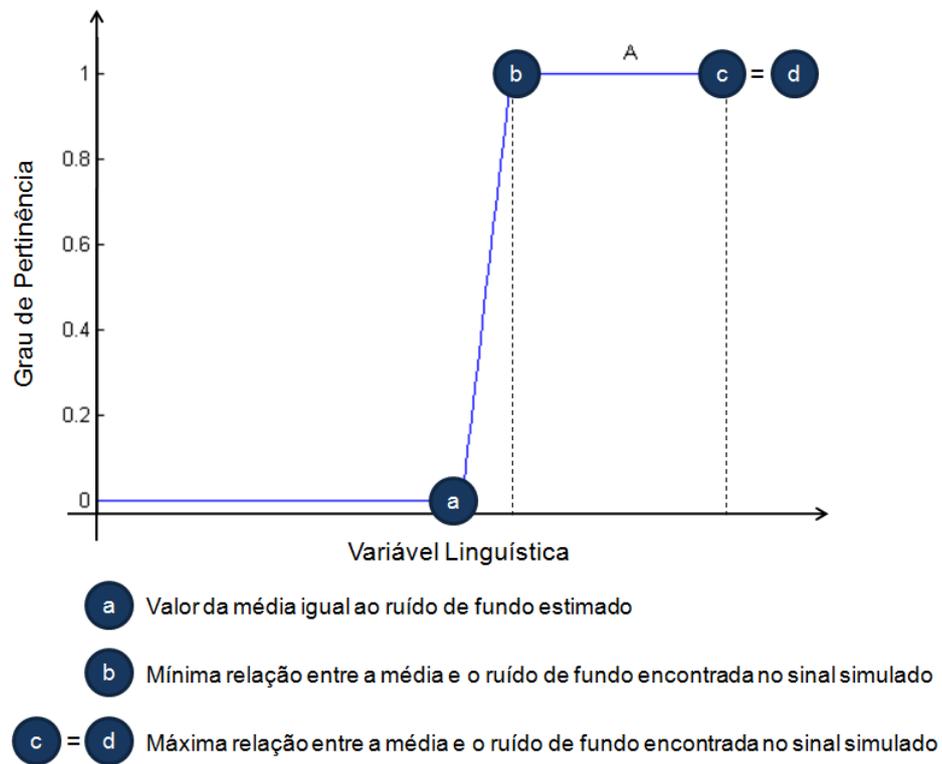


Figura 25: Detalhamento da função de pertinência trapezoidal da variável de entrada $X_{\text{Frequência}}$ do sub-sistema de inferência nebulosa *Detecta*.

As entradas do sub-sistema são vistas na Figura 26.

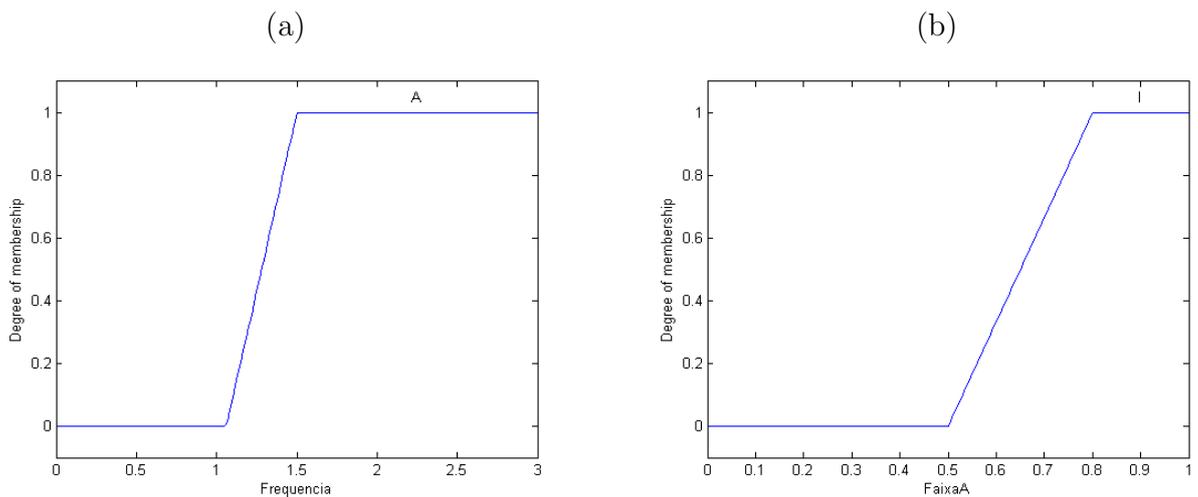


Figura 26: Funções de pertinência para os conjuntos nebulosos: (a) “ $X_{\text{Frequência}}$ é Alta”, e em (b) “ X_{Faixa} é Importante”.

Cada saída deste sub-sistema de inferência nebulosa possui duas funções de per-

tinência triangulares, podendo cada saída ser classificada como Significativa ou Não Significativa, como visto na Figura 27.

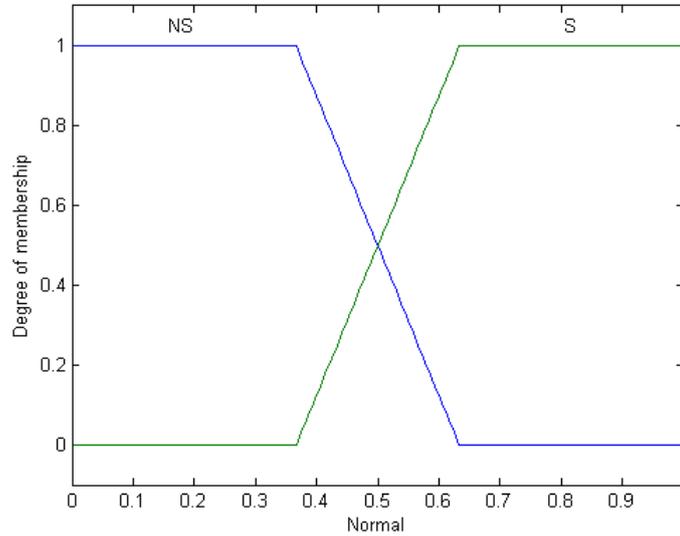


Figura 27: Função de pertinência para os conjuntos nebulosos “Y é Significativo” e “Y é Não Significativo”.

3.4 Regras da Máquina de Inferência Nebulosa

- Regras no sub-sistema *Tempo*: apenas valores eficazes altos são considerados para indicação da falha.
 1. Se X_{RMS} não é Alto, então Y_{Sinal} é Não Falha.
 2. Se X_{RMS} é Alto, então Y_{Sinal} é Falha.

As regras nebulosas implementadas são vistas na Figura 28.

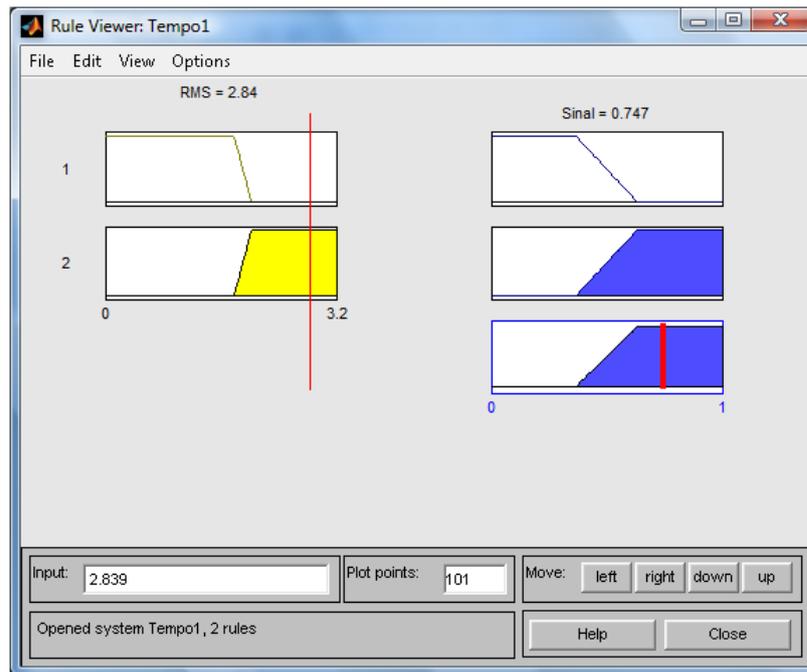


Figura 28: Regras nebulosas para o sub-sistema *Tempo*.

- Regras no sub-sistema *Faixa*: apenas são consideradas importantes faixas que tenham valor significativo de pico e probabilidade alta de se encontrar picos.
 1. Se X_{Pico} não é Significativo e $X_{\text{Probabilidade}}$ é Baixa, então Y_{Faixa} não é Importante.
 2. Se X_{Pico} não é Significativo e $X_{\text{Probabilidade}}$ é Alta então Y_{Faixa} não é Importante.
 3. Se X_{Pico} é Significativo e $X_{\text{Probabilidade}}$ é Baixa então Y_{Faixa} não é Importante.
 4. Se X_{Pico} é Significativo e $X_{\text{Probabilidade}}$ é Alta então Y_{Faixa} é Importante.

Nas regras acima, a variável Y_{Faixa} é substituída por Y_{FaixaA} a Y_{FaixaF} , de acordo com a faixa considerada. Sendo no sub-sistema *Detecta* consideradas como entradas.

As regras nebulosas implementadas são vistas na Figura 29. A superfície resultante é vista na Figura 30.

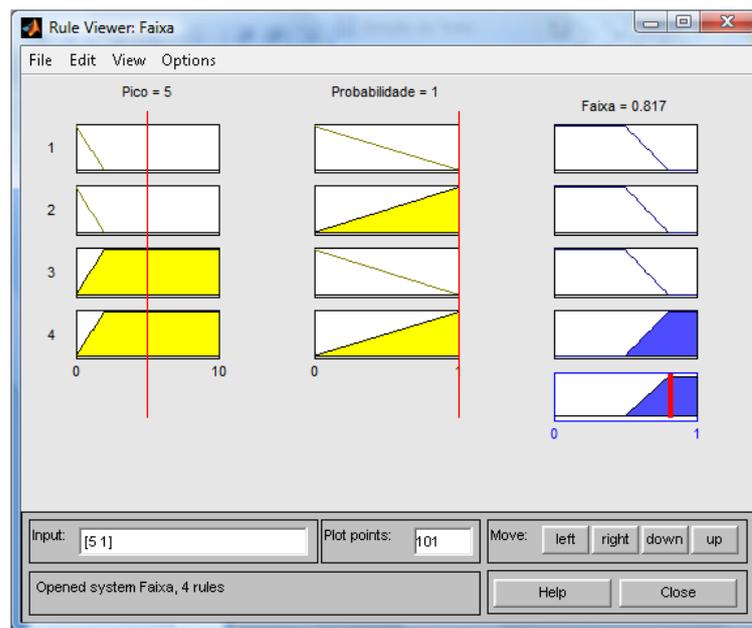


Figura 29: Regras nebulosas para o sub-sistema *Faixa*.

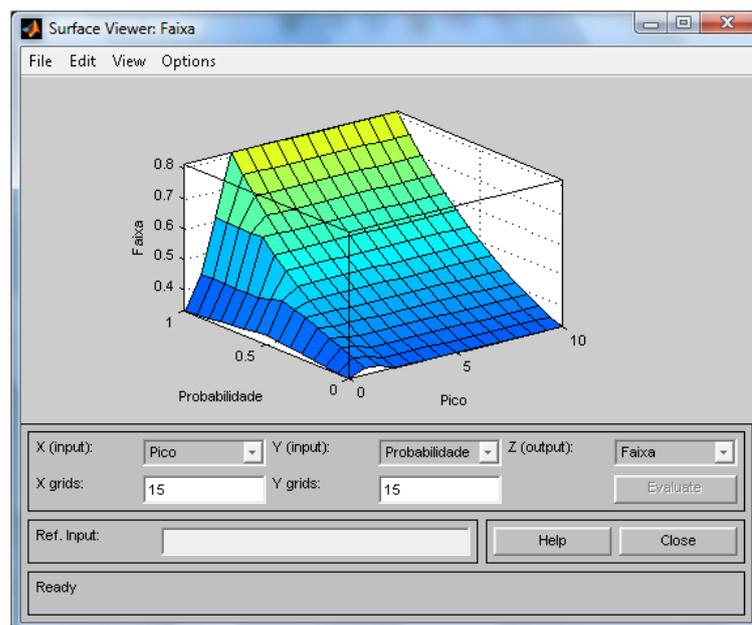


Figura 30: Superfície para o sub-sistema *Faixa*.

- Regras no sub-sistema *Detecta*:

O processo de degradação do rolamento pode se iniciar nas pistas, esferas ou na gaiola e se alastrar para os demais componentes, sendo portanto importante analisar as possibilidades de falhas em um ou mais componentes dos rolamentos.

As regras neste sub-sistema foram implementadas da seguinte forma:

1. Se $X_{\text{Frequencia}}$ não é Alto, e todas as faixas de X_{Faixa} são Não Importante, o diagnóstico é Normal;
2. No caso de $X_{\text{Frequencia}}$ ser Alto, as regras são vistas na Tabela 2.

Tabela 2: Conjunto de antecedentes avaliados e consequentes correspondentes, para regras que incluem o antecedente “ $X_{\text{Frequencia}}$ é Alto”.

	se	se	se	se	se	se	então
Regra	X_{FaixaA}	X_{FaixaB}	X_{FaixaC}	X_{FaixaD}	X_{FaixaE}	X_{FaixaF}	Diagnóstico
2	NI	NI	NI	NI	NI	I	PI
3	I	NI	I	NI	I	NI	PE
4	I	NI	I	NI	NI	NI	PE
5	NI	NI	I	NI	I	NI	PE
6	NI	I	I	I	NI	NI	ESF
7	NI	I	I	NI	NI	NI	ESF
8	NI	NI	I	I	NI	NI	ESF
9	I	NI	I	NI	I	I	PI e PE
10	NI	NI	I	NI	I	I	PI e PE
11	I	NI	I	NI	NI	I	PI e PE
12	NI	I	I	I	NI	I	PI e ESF
13	NI	NI	I	I	NI	I	PI e ESF
14	NI	I	I	NI	NI	I	PI e ESF
15	I	I	I	I	I	NI	PE e ESF
16	NI	NI	I	I	I	NI	PE e ESF
17	I	I	I	NI	NI	NI	PE e ESF
18	NI	I	I	NI	I	NI	PE e ESF
19	I	NI	I	I	NI	NI	PE e ESF
20	NI	I	I	I	I	NI	PE e ESF
21	I	NI	I	I	I	NI	PE e ESF
22	I	I	I	NI	I	NI	PE e ESF
23	I	I	I	I	NI	NI	PE e ESF
24	I	I	I	I	I	I	Todas
25	NI	NI	I	I	I	I	Todas
26	I	I	I	NI	NI	I	Todas
27	NI	I	I	NI	I	I	Todas
28	I	NI	I	I	NI	I	Todas
29	NI	I	I	I	I	I	Todas
30	I	NI	I	I	I	I	Todas
31	I	I	I	NI	I	I	Todas
32	I	I	I	I	NI	I	Todas

As regras nebulosas implementadas são vistas na Figura 31.

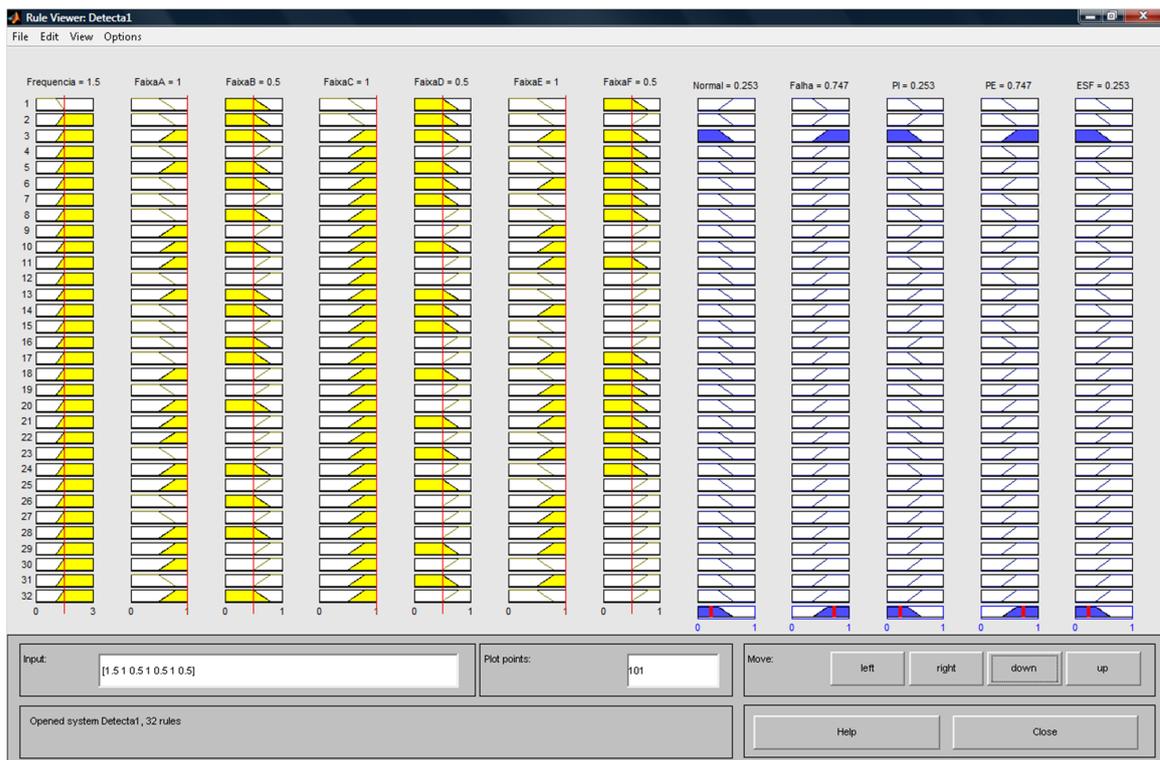


Figura 31: Regras nebulosas para o sub-sistema *Detecta* com a simulação de uma falha na pista externa do rolamento.

4 *Resultados da Aplicação da Técnica de Detecção de Falhas em Roletes*

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da técnica de detecção e classificação de falhas vista no capítulo 3 em sinais de vibração simulados e sinais de vibração de falhas induzidas nos rolamentos.

4.1 Metodologia de Geração de Sinais Artificiais

A dinâmica do sistema apresentado na Seção 2.2 pode ser descrita por um modelo em Espaço de Estados:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \tag{4.1}$$

sendo que x é o vetor de estados; u é o vetor de entradas; y é o vetor de saídas; e A , B , C e D são as matrizes de dimensões apropriadas.

Definindo-se, a partir de (2.2) a (2.5), as seguintes variáveis:

$$\begin{aligned} x_1 &= X; \\ x_2 &= \dot{X}; \\ x_3 &= Y; \\ x_4 &= \dot{Y}; \end{aligned} \tag{4.2}$$

$$x_5 = \beta;$$

$$x_6 = \dot{\beta};$$

$$x_7 = \alpha;$$

$$x_8 = \dot{\alpha};$$

sendo que $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ e x_8 são as variáveis de estado que formam o vetor de estados utilizado em (4.1).

Considerou-se como entradas do sistema os impulsos devidos às falhas, e como saída a aceleração do rolete no eixo y.

Na Tabela 3 são vistos os parâmetros do rolete.

Tabela 3: Especificações do Sistema Rotativo.

Parâmetro	Valor
Massa do sistema rotativo, M	8,6 kg
Número de rolamentos, N_B	2
Distância entre o rolamento e o centro de massa, $d_B = a_i = a_o$	150 mm
Distância entre os centros dos dois rolamentos, <i>Bearing Span</i>	300 mm
Distância entre a pista interna e o eixo, R_i	26,35 mm
Distância entre a pista externa e o eixo, R_o	18,30 mm
Força aplicada na direção radial, F_r	4000 N
Velocidade de rotação, ω_S	1980 rpm ($F_S = 33\text{Hz}$)
Rigidez Radial, K	$1,99 \times 10^8 \text{N/m}$
Amortecimento, C	$829,28(\text{N/mkg})^{1/2}$
Momento Polar de Inércia, I_P	0,150 kg m^2
Momento Transversal de Inércia, I_T	0,048 kg m^2

O rolamento utilizado nos roletes para os ensaios foi o 1305ATN. Ele possui duas fileiras com 12 esferas cada uma. As especificações do rolamento são vistas na Tabela 4.

De acordo com (SKF, 2008) e com cálculos obtidos por meio das Tabelas 3 e 4, as frequências características de defeitos para o rolamento 1305ATN são vistas na Tabela 5. Como visto, as frequências de defeito (F_{BPI} , F_{BPO} e F_B) se encontram no intervalo entre 100 e 300 Hz, sendo o restante do espectro de frequências composto pelas harmônicas destas frequências (Tabela 6), contendo informações redundantes e/ou irrelevantes para o diagnóstico da falha (GODDU; LI; HUNG, 1998; FUJIMOTO, 2005). Assim, foi utilizado apenas este intervalo do espectro (100 a 300 Hz) na metodologia aqui proposta.

Tabela 4: Especificações do Rolamento 1305ATN. Fonte: (SKF, 2008).

Parâmetro	Valor
Número de Esferas, n_b	12 em cada fileira
Massa	0,26Kg
Diâmetro das Esferas, D	8,73 mm
Diâmetro Primitivo, d_m	43,5 mm
Diâmetro Externo	62 mm
Diâmetro Interno	25 mm
Diâmetro da Pista Interna, d_I	32 mm
Diâmetro da Pista Externa, d_O	55 mm

Tabela 5: Frequências características de defeitos.

Tipo	1305
F_C	19,809 Hz
F_{BPI}	237,704 Hz
F_{BPO}	158,296 Hz
F_B	157,952 Hz

Tabela 6: Frequências características de defeitos para os harmônicos.

Ensaio	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a	12 ^a
PI	238	475	713	951	1189	1426	1664	1902	2139	2377	2615	2852
PE	158	317	475	633	792	950	1108	1266	1425	1583	1741	1900
ESF	158	316	474	632	790	948	1106	1264	1422	1580	1738	1896

Como visto na Seção 2.2.2 na página 35, é preciso calcular os parâmetros T_d , f_d e f_m do modelo proposto para falhas nas pistas interna e externa e falhas em esferas, como visto a seguir:

1. Na pista interna:

$$f_d = F_{BPI} = 237,704\text{Hz}, \quad (4.3)$$

$$T_d = \frac{1}{f_d} = 0,004\text{s}. \quad (4.4)$$

2. Na pista externa:

$$f_d = F_{BPO} = 158,296\text{Hz}, \quad (4.5)$$

$$f_m = F_S = 33\text{Hz}, \quad (4.6)$$

$$T_d = \frac{1}{f_d} = 0,00632s, \quad (4.7)$$

$$T_m = \frac{1}{f_m} = 0,03s. \quad (4.8)$$

3. Para as esferas:

$$f_d = F_B = 157,952\text{Hz}, \quad (4.9)$$

$$f_m = F_C = 19,809\text{Hz}, \quad (4.10)$$

$$T_d = \frac{1}{f_d} = 0,00631s, \quad (4.11)$$

$$T_m = \frac{1}{f_m} = 0,05s. \quad (4.12)$$

4.1.1 Geração de Impulsos

A implementação do modelo do rolete proposto em (2.10) na página 33, e dos impulsos propostos por McFadden e Smith (1984) em (2.19) e (2.20) nas páginas 36 e 38, respectivamente, é vista no diagrama de simulação da Figura 32. O mesmo foi implementado em ambiente Simulink do programa de cálculo numérico MatLab[®] usado para integrar as equações diferenciais.

As descrições de cada bloco numerado de 1 a 4 são apresentadas a seguir:

1. Pulsos com período T_d calculados por meio das frequências características de defeito e com amplitude referente ao RMS do sinal real de falha induzida nas pistas e esferas dos rolamentos.
2. A distribuição de carregamento apresentada foi implementada de acordo com (2.20) na página 38, como visto na Figura 33.
3. A simulação do modelo do rolete foi implementada de acordo com (2.10) na página 33, como visto na Figura 34.
4. O ruído de fundo adicionado ao sinal é ruído branco com média $\bar{x} = 0$ e variância do sinal real sem falha $\sigma^2 = 3,1626$. O sinal simulado de vibração com falha, sem e com a adição de ruído branco, é visto na Figura 35.

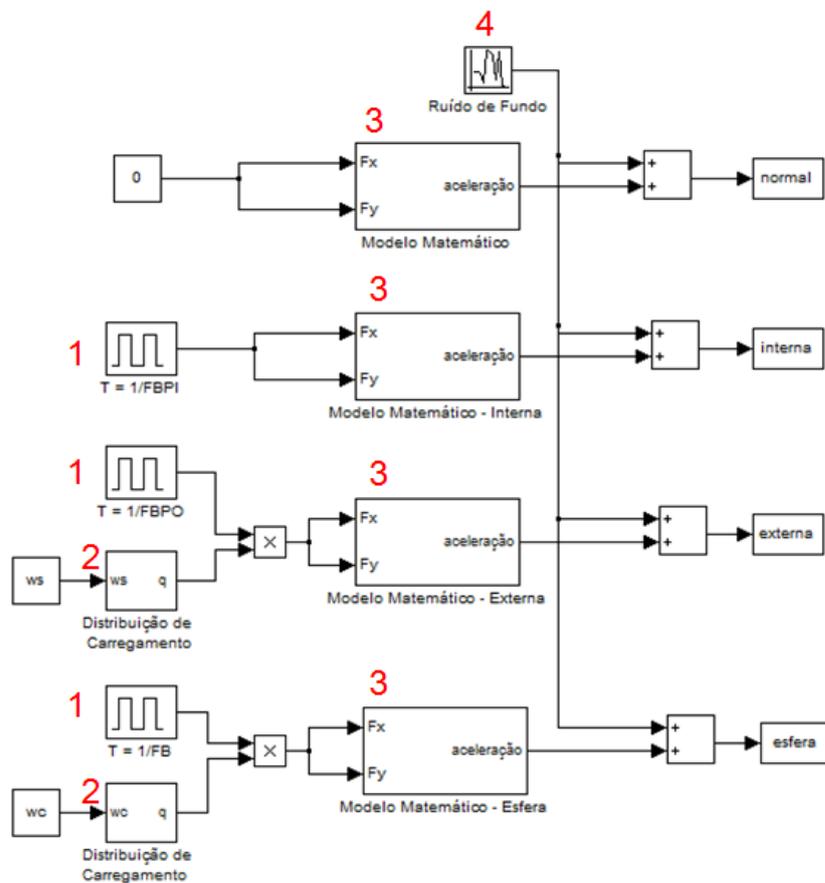


Figura 32: Diagrama de simulação para obtenção de sinais de vibração simulados para rolamentos sem falha e com falhas nas pistas e nas esferas.

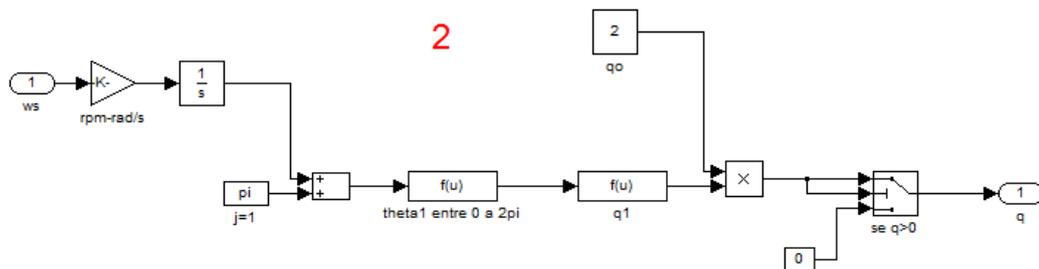


Figura 33: Diagrama de simulação da distribuição de carregamento.

A velocidade de rotação da máquina é importante na determinação dos valores das frequências características de defeito, como visto nas equações (2.21) na página 40. Nas simulações a velocidade de rotação foi mantida constante, não havendo portanto variação nas frequências características de defeito, assim como nas harmônicas e bandas laterais correspondentes.

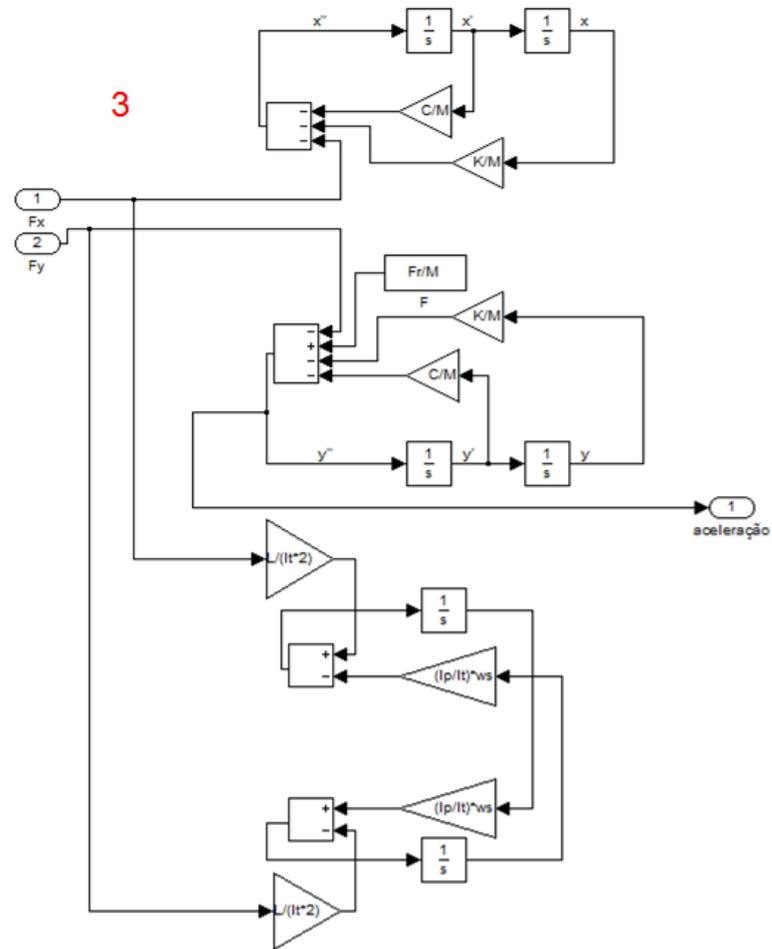


Figura 34: Diagrama de simulação do modelo matemático proposto para o rolete.

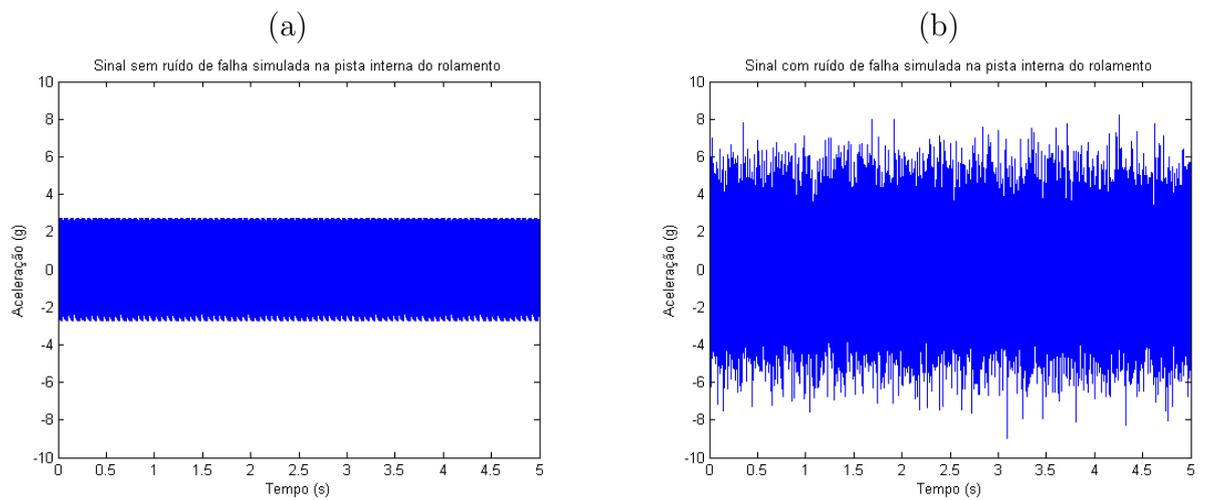


Figura 35: Sinal de vibração de falha simulada na pista interna do rolamento, em (a) sem ruído, e em (b) com ruído.

4.1.2 Resultados

O desempenho do sistema de inferência nebulosa foi testado utilizando-se sinais simulados de falhas comumente encontradas em rolamentos (pistas e esfera) (BEZERRA, 2004). Usando a metodologia descrita no Capítulo 3 foi possível diagnosticar os defeitos com 100% de acerto, como visto na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados da aplicação da máquina de inferência nebulosa aos sinais de vibração simulados. Na tabela são apresentados os resultados da análise no domínio do tempo e no domínio da frequência para sinais sem falha e com falhas nas pistas interna e externa e nas esferas, com a aplicação de diferentes valores de carregamento da correia transportadora: 1000N, 2000N, 3000N e 4000N.

Tipo	Carga (N)	Tempo	Frequência
Normal	1000	NF - grau de pertinência 1	Normal - grau de pertinência 1
Normal	2000	NF - grau de pertinência 1	Normal - grau de pertinência 1
Normal	3000	NF - grau de pertinência 1	Normal - grau de pertinência 1
Normal	4000	NF - grau de pertinência 1	Normal - grau de pertinência 1
Interna	1000	F - grau de pertinência 1	PI - grau de pertinência 1
Interna	2000	F - grau de pertinência 1	PI - grau de pertinência 1
Interna	3000	F - grau de pertinência 1	PI - grau de pertinência 1
Interna	4000	F - grau de pertinência 1	PI - grau de pertinência 1
Externa	1000	F - grau de pertinência 1	PE - grau de pertinência 1
Externa	2000	F - grau de pertinência 1	PE - grau de pertinência 1
Externa	3000	F - grau de pertinência 1	PE - grau de pertinência 1
Externa	4000	F - grau de pertinência 1	PE - grau de pertinência 1
Esfera	1000	F - grau de pertinência 1	ESF - grau de pertinência 1
Esfera	2000	F - grau de pertinência 1	ESF - grau de pertinência 1
Esfera	3000	F - grau de pertinência 1	ESF - grau de pertinência 1
Esfera	4000	F - grau de pertinência 1	ESF - grau de pertinência 1

Nas Figuras 36(a) a (d) são apresentados os resultados das estimativas de densidade espectral de potência do envelope do sinal temporal dos sinais simulados sem falha e com falhas nas pistas e na esfera. É possível observar as incertezas associadas a cada valor, assim como os picos detectados nas faixas e o ruído de fundo calculado. Como visto, foram encontrados os picos exatamente nas frequências características de falhas vistas na Tabela 5. É esperado que nos sinais de vibração reais sejam encontradas as frequências características de defeitos dentro das faixas pré-estabelecidas.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados para os casos em que ocorrem mais de uma falha. Observa-se que os resultados são satisfatórios no domínio do tempo e da frequência, sendo possível diagnosticar os defeitos com 100% de acerto.

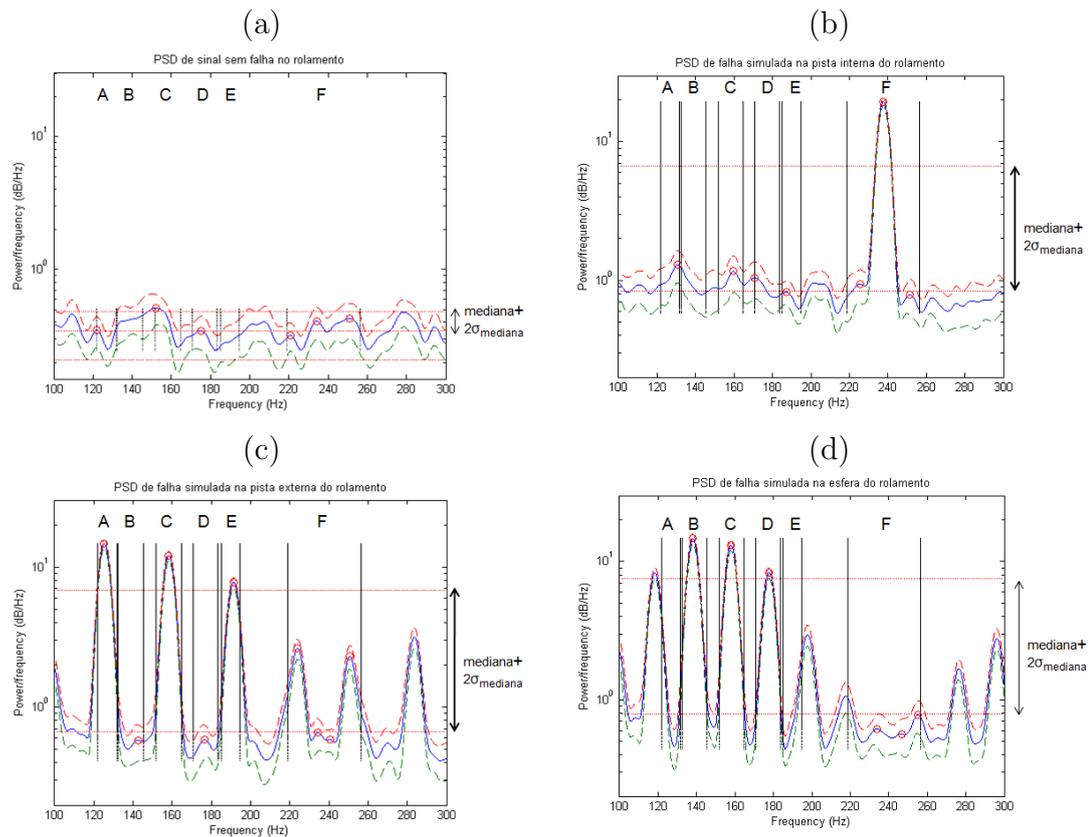


Figura 36: PSD do sinal de falha simulada, em (a) sem falha, em (b) com falha na pista interna, em (c) com falha na pista externa, e, em (d) com falha na esfera.

Nas Figuras 37(a) a (d) são apresentados os cálculos das estimativas de densidade espectral de potência do envelope do sinal temporal dos sinais simulados com várias falhas nas pistas e na esfera. É possível observar as incertezas associadas a cada valor, assim como os picos detectados nas faixas esperadas e o ruído de fundo calculado.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados para os casos em que ocorrem falhas quando não há carregamento na correia. Observa-se que os resultados não são satisfatórios, principalmente para o caso de falha na pista externa, afinal a relação sinal-ruído é muito baixa, dificultando a separação entre o sinal de falha e o ruído de fundo.

Para análise da influência do carregamento da correia nos parâmetros X_{RMS} e $X_{Frequencia}$ na metodologia proposta, foram realizadas simulações com cinco diferentes cargas: 0N; 1000N; 2000N; 3000N e 4000N, como visto na Figura 38, a qual indica uma tendência no aumento destes parâmetros, à medida que o carregamento aumenta.

Na Figura 39 vê-se o resultado da variação do carregamento (F_T) na relação sinal-ruído. Como visto, a relação sinal-ruído aumenta com o carregamento da correia.

Tabela 8: Resultados da aplicação da máquina de inferência nebulosa aos sinais de vibração simulados. Na tabela são apresentados os resultados da análise no domínio do tempo e no domínio da frequência para sinais que apresentam mais de uma falha simultaneamente (pista interna e pista externa, pista interna e esferas, e pista externa e esferas), com a aplicação de diferentes valores de carregamento da correia transportadora: 1000N, 2000N, 3000N e 4000N.

Tipo	Carga (N)	Tempo	Frequência
PI e PE	1000	F - grau de pertinência 1	PI e PE - grau de pertinência 1
PI e PE	2000	F - grau de pertinência 1	PI e PE - grau de pertinência 1
PI e PE	3000	F - grau de pertinência 1	PI e PE - grau de pertinência 1
PI e PE	4000	F - grau de pertinência 1	PI e PE - grau de pertinência 1
PI e ESF	1000	F - grau de pertinência 1	PI e ESF - grau de pertinência 1
PI e ESF	2000	F - grau de pertinência 1	PI e ESF - grau de pertinência 1
PI e ESF	3000	F - grau de pertinência 1	PI e ESF - grau de pertinência 1
PI e ESF	4000	F - grau de pertinência 1	PI e ESF - grau de pertinência 1
PE e ESF	1000	F - grau de pertinência 1	PE e ESF - grau de pertinência 1
PE e ESF	2000	F - grau de pertinência 1	PE e ESF - grau de pertinência 1
PE e ESF	3000	F - grau de pertinência 1	PE e ESF - grau de pertinência 1
PE e ESF	4000	F - grau de pertinência 1	PE e ESF - grau de pertinência 1

Tabela 9: Resultados da aplicação da máquina de inferência nebulosa aos sinais de vibração simulados. Na tabela são apresentados os resultados da análise no domínio do tempo e no domínio da frequência para sinais sem falha e com falhas nas pistas interna e externa e nas esferas, sem a aplicação de diferentes valores de carregamento da correia transportadora.

Tipo	Carga (N)	Tempo	Frequência
Normal	0	NF - grau de pertinência 1	Normal - grau de pertinência 1
Interna	0	NF - grau de pertinência 0,68	PI - grau de pertinência 1
Externa	0	NF - grau de pertinência 0,81	Normal - grau de pertinência 1
Esfera	0	F - grau de pertinência 0,81	ESF - grau de pertinência 0,92

4.2 Metodologia de Geração de Falhas Induzidas nos Rolamentos

As falhas nos rolamentos foram induzidas com a utilização de uma ferramenta do tipo mini retífica fabricada pela empresa Dremel com um disco de corte de esmeril de 0,7mm de espessura na ponta, como visto na Figura 40 (a). O processo de usinagem é mostrado na Figura 40 (b), e as falhas obtidas para a pista interna, pista externa e esferas são vistas na Figura 41. A metodologia de desmontagem do rolete para inserção do rolamento com defeito induzido é vista na Figura 42.

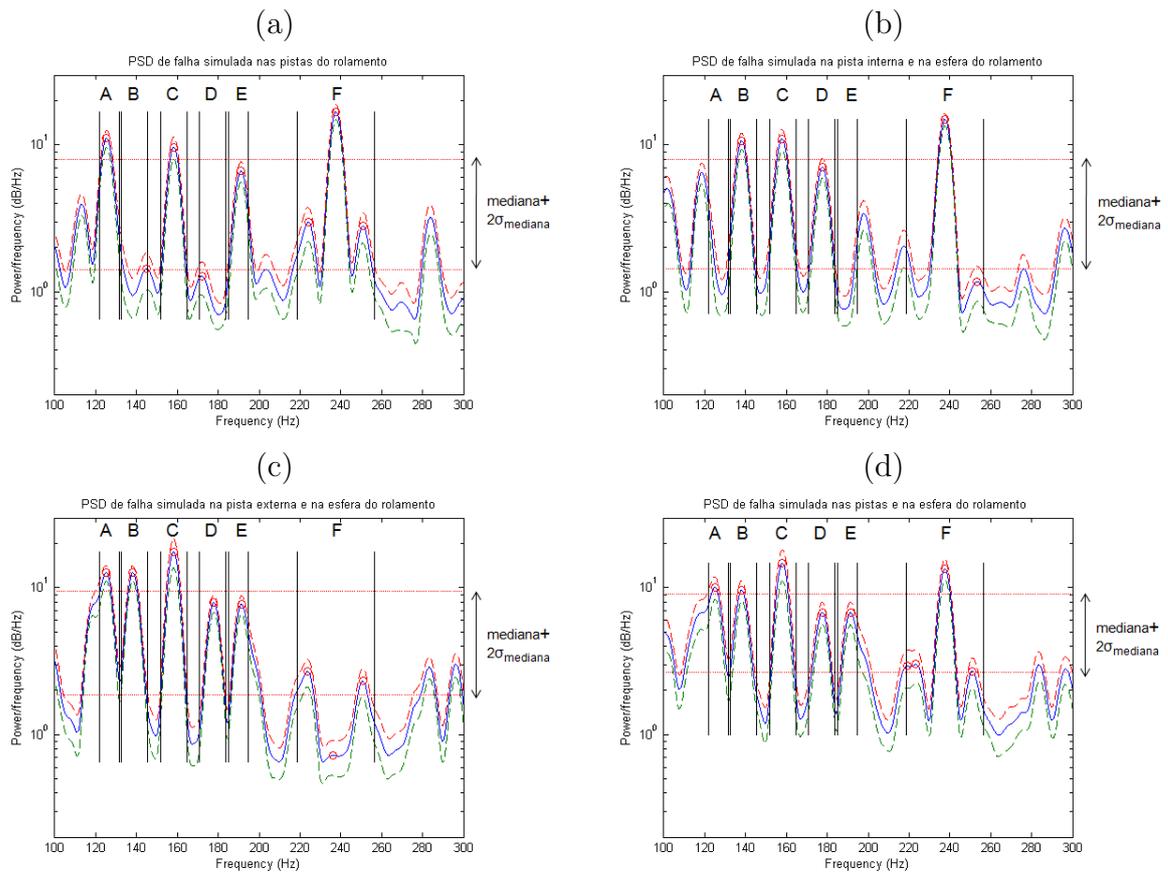


Figura 37: PSD do sinal de falha simulada, em (a) com falha nas pistas, em (b) com falha na pista interna e na esfera, em (c) com falha na pista externa e na esfera, e, em (d) com falha nas pistas e na esfera.

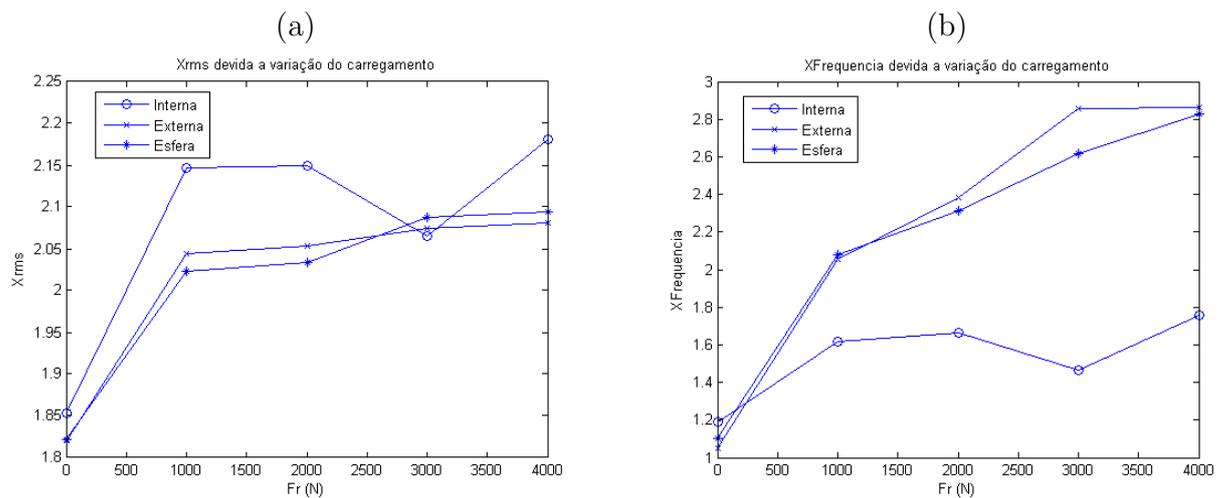


Figura 38: Variação de parâmetros de entrada da máquina de inferência nebulosa de acordo com o carregamento da correia transportadora, em (a) X_{RMS} , em (b) $X_{Frequencia}$.

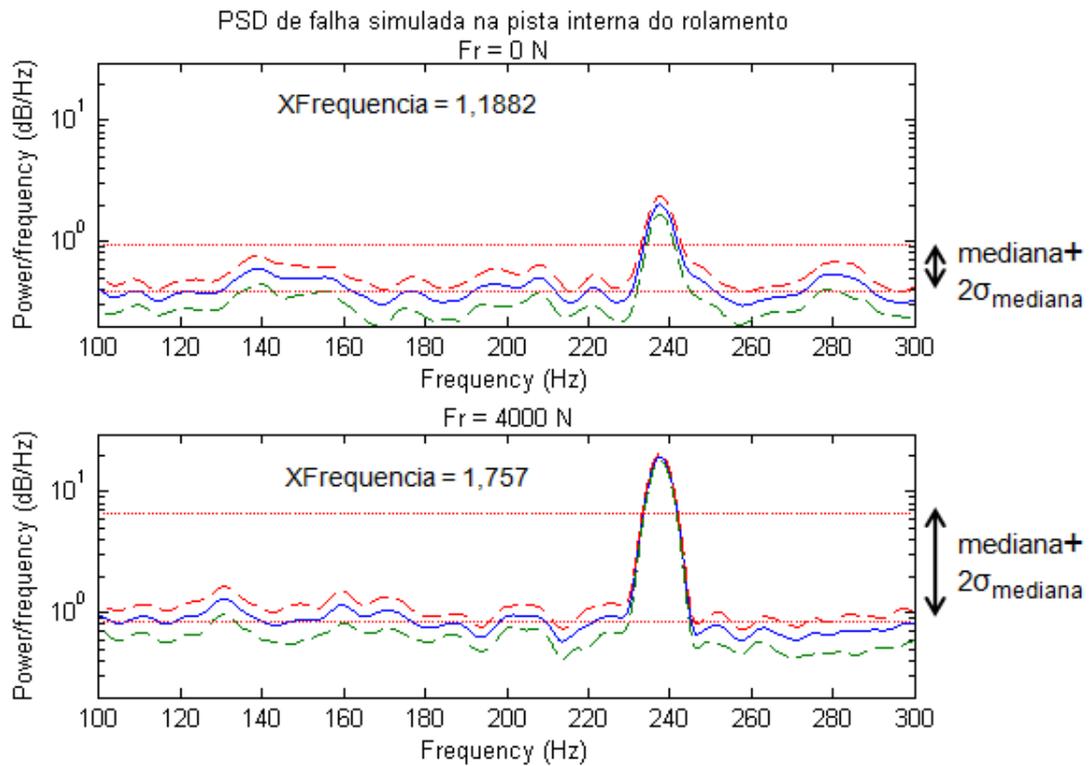


Figura 39: Relação sinal-ruído na simulação de falha na pista interna com diferentes valores de carregamento na correia transportadora, em (a) $F_T = 0\text{N}$, e em (b) $F_T = 4000\text{N}$.

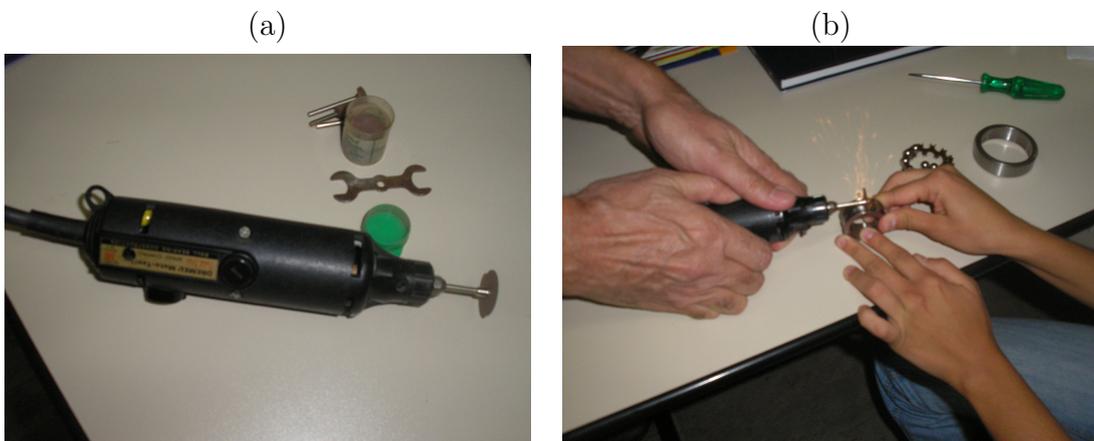


Figura 40: Processo de indução de falhas em rolamentos, em (a) ferramenta, em (b) processo da falha.

Foram utilizados seis rolamentos nos ensaios, do mesmo tipo e fabricante. Os ensaios foram realizados com velocidade e carga constante. Os rolamentos foram montados nos mancais 2 e 6 da bancada (ver Figura 43), estando no mancal 2 os rolamentos sem defeito, e no mancal 6 os rolamentos para teste, como visto na Tabela 10.

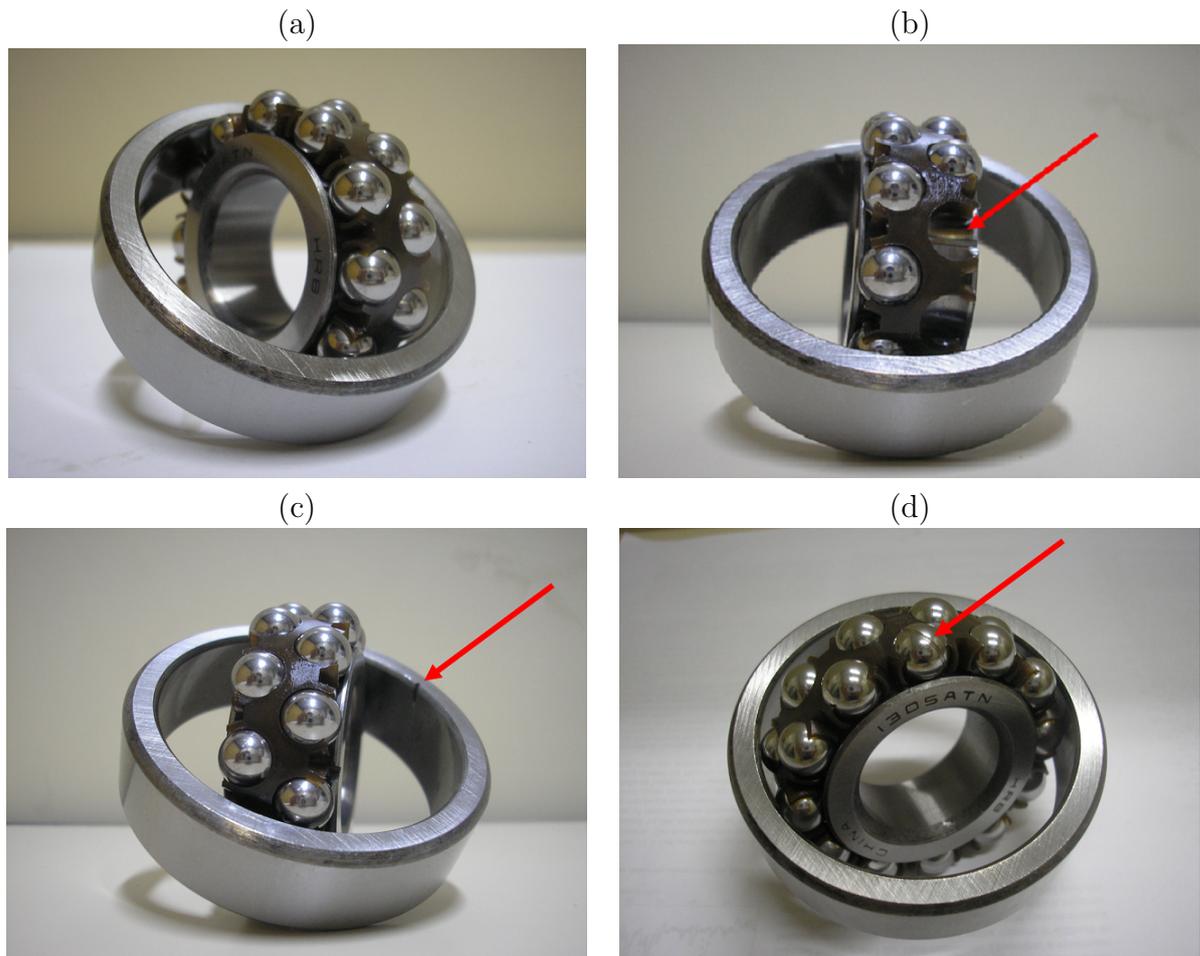


Figura 41: Apresentação das falhas induzidas no rolamento 1305ATN, em (a) sem falha, em (b) com falha na pista interna, em (c) com falha na pista externa, e, em (d) com falha na esfera.

Tabela 10: Testes realizados na bancada de ensaios de roletes de correias transportadoras.

Ensaio	Mancal 2	Mancal 6
1	Sem Falha	Sem Falha
2	Sem Falha	Falha na Pista Interna
3	Sem Falha	Falha na Pista Externa
4	Sem Falha	Falha na Esfera
5	Falha na Pista Externa	Falha na Pista Externa
6	Sem Falha	02 Falhas na Pista Externa

A velocidade foi mantida em 1980 rpm, com 400 kg de carga. Para cada ensaio foi utilizado um tempo de 5s. Foram obtidas três amostras em cada teste, resultando em um banco de dados com 18 amostras (seis sequências com três amostras). Foi utilizado um acelerômetro em cada mancal, cuja especificação é: PCB Piezotronics, modelo 353B34, com dados de calibração vistos na Tabela 11, montados nos suportes dos eixos, como visto

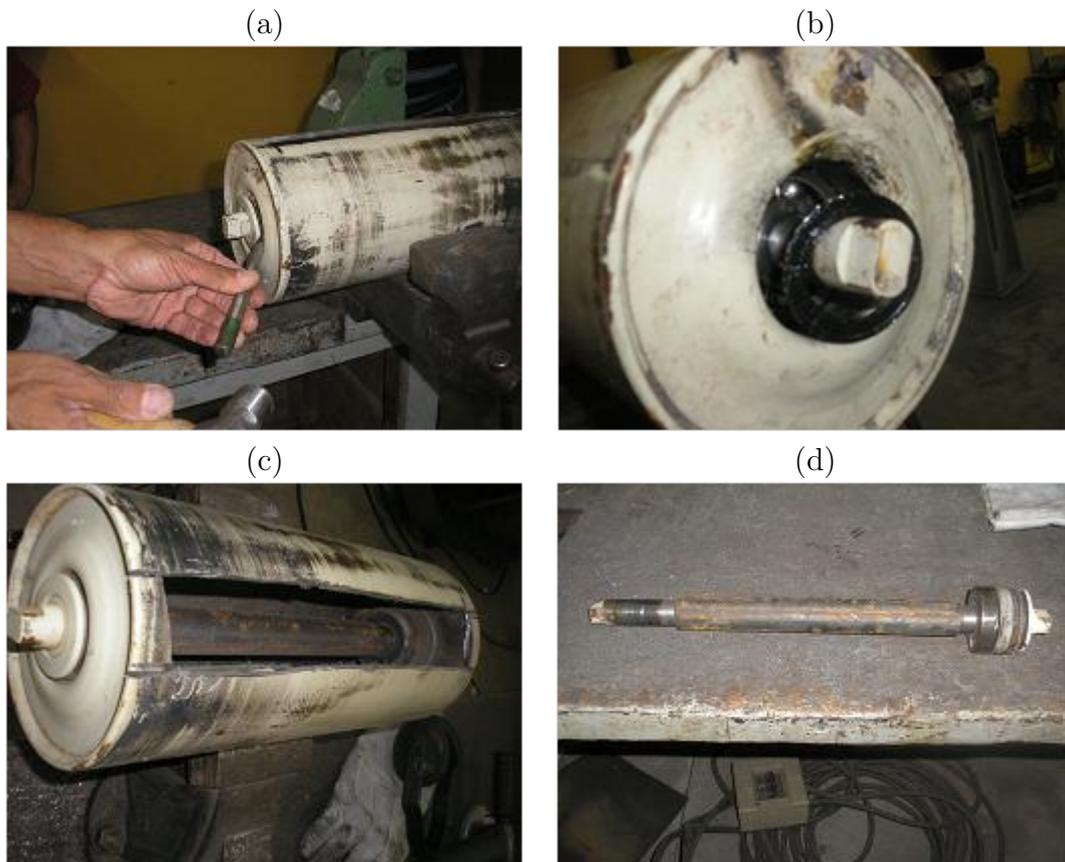


Figura 42: Retirada de componentes do rolete para acessar o rolamento, em (a) processo de retirada dos componentes que protegem o rolamento, em (b) visualização do rolamento interno ao rolete, em (c) vista do interior do rolete com o eixo, rolamentos e componentes que protegem o rolamento, e em (d) vista em separado do eixo, do rolamento e dos componentes que protegem o rolamento.

na Figura 44.

Tabela 11: Características do acelerômetro 353B34.

Dado	Valor
Sensibilidade	97,7 mV/g
Frequência de Ressonância	26 kHz
Faixa de Medição	± 50 g
Resolução	0,001 g
Faixa de Temperatura	-54 a +121 C

4.2.1 Resultados

Os testes realizados com dados reais de falhas induzidas nas pistas e esferas dos rolamentos apresentaram sinais no domínio do tempo, como aqueles apresentados na

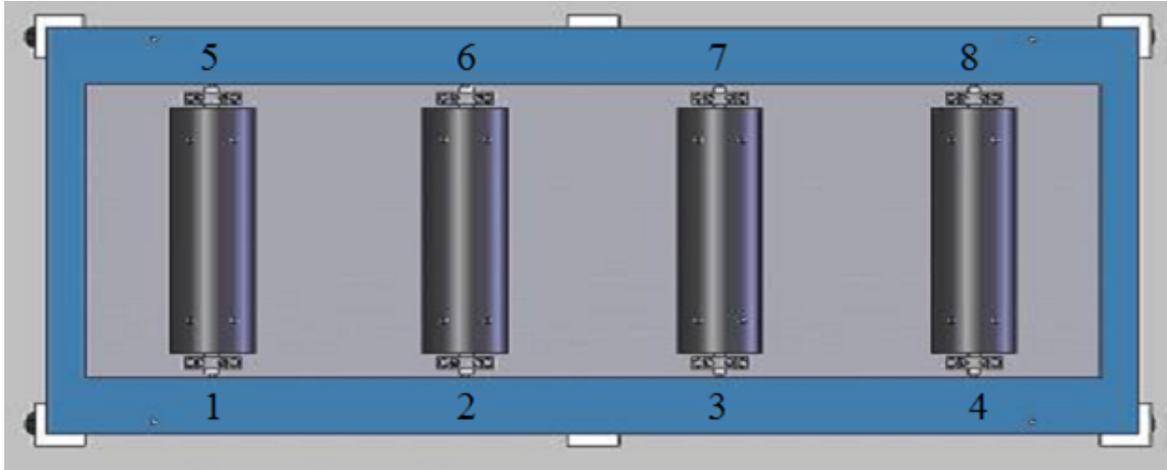


Figura 43: Visão superior do esquema da bancada de ensaio de roletes com a indicação da numeração dos mancais de rolamentos.

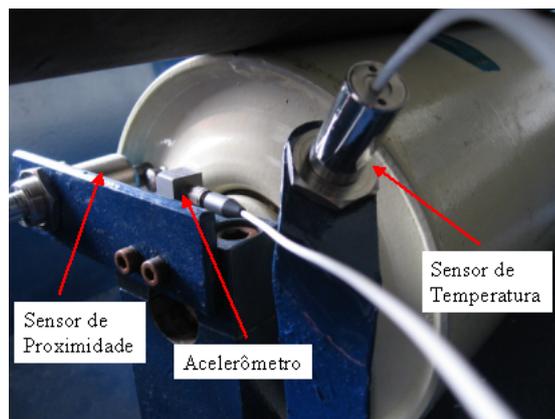


Figura 44: Configuração dos sensores instalados na bancada de ensaios de roletes, com destaque para o acelerômetro modelo 353B34 utilizado para obtenção dos sinais reais de vibração de falhas induzidas nos rolamentos.

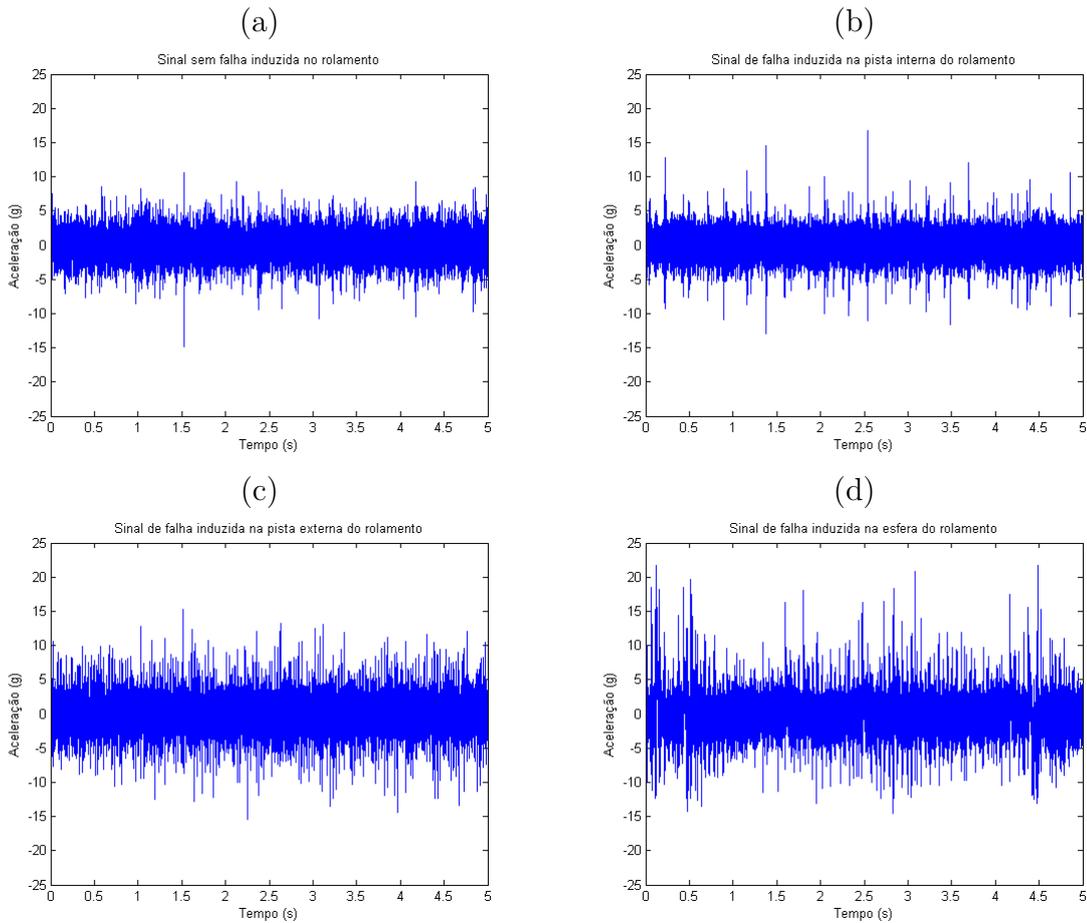


Figura 45: Sinais reais de vibração, em (a) sem falha, em (b) falha na pista interna, em (c) falha na pista externa, e, em (d) falha na esfera.

Figura 45, e no domínio da frequência apresentados na Figura 46. A Tabela 12 mostra os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta.

No caso dos sinais reais, o sistema de inferência se comportou de fato como um especialista, uma vez que o mesmo provavelmente chegasse a mesma conclusão. Por exemplo, no caso da falha real na pista interna (Figura 47), o especialista tenderia a dizer que esta é uma falha na pista externa, devido aos picos significativos nas faixas A e C. O que justifica o resultado visto na Tabela 12 para o caso “Interna3”.

4.3 Análise dos Resultados

As Figuras 48 a 50 apresentam os resultados comparativos entre sinais simulados e sinais reais de vibração. Destaca-se que os picos de frequências características de defeitos

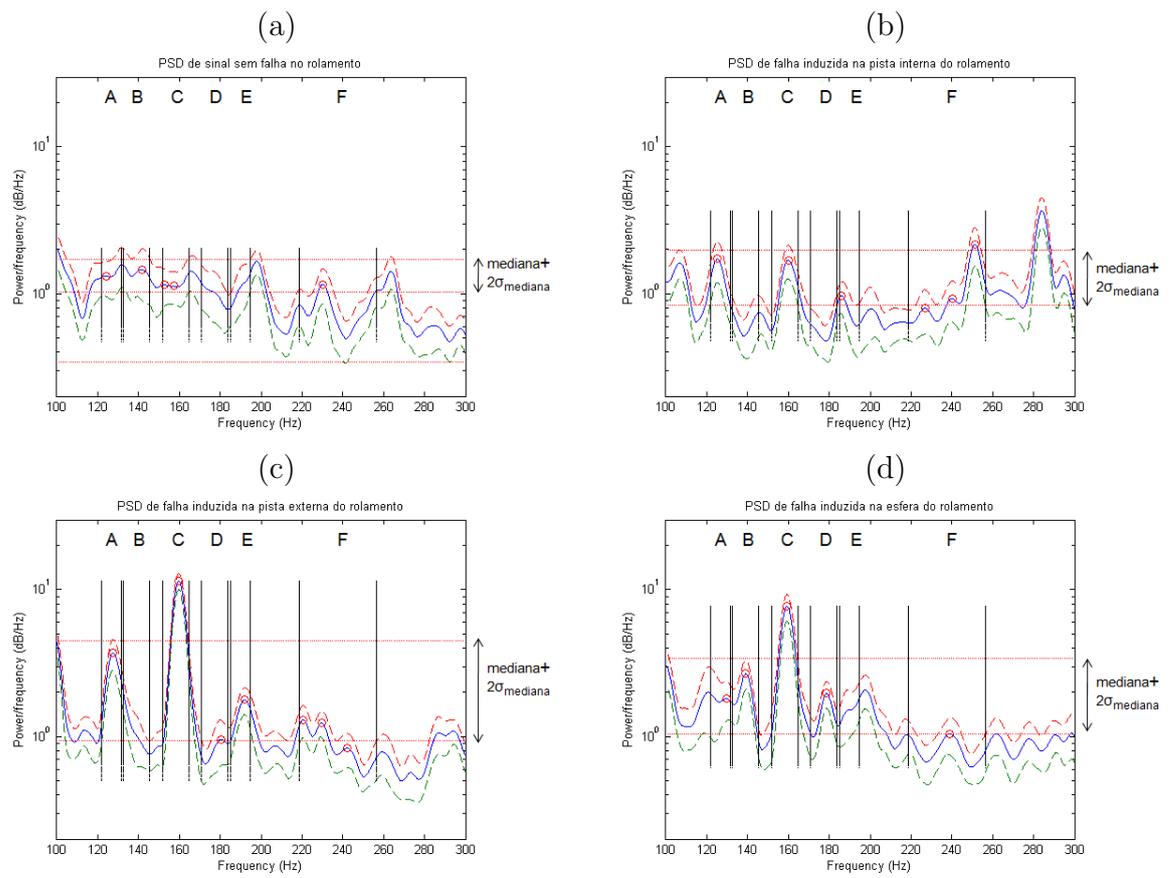


Figura 46: PSD dos sinais reais de falhas induzidas, em (a) sem falha, em (b) com falha na pista interna, em (c) com falha na pista externa, e, em (d) com falha na esfera.

Tabela 12: Resultados da aplicação da máquina de inferência nebulosa aos sinais de vibração reais. Na tabela são apresentados os resultados da análise no domínio do tempo e no domínio da frequência para sinais sem falha e com falhas nas pistas interna e externa e nas esferas, com a aplicação de carregamento da correia transportadora no valor de 4000N.

Tipo	Tempo	Frequência
SemFalha1	NF - grau de pertinência 1	Normal - grau de pertinência 1
SemFalha2	NF - grau de pertinência 1	Normal - grau de pertinência 1
SemFalha3	NF - grau de pertinência 1	Normal - grau de pertinência 1
Interna1	NF - grau de pertinência 1	Normal - grau de pertinência 0,56
Interna2	NF - grau de pertinência 1	PI ou PE - grau de pertinência 0,50
Interna3	NF - grau de pertinência 1	PE - grau de pertinência 1
Externa1	F - grau de pertinência 1	PE - grau de pertinência 1
Externa2	F - grau de pertinência 1	PE - grau de pertinência 1
Externa3	F - grau de pertinência 1	PE - grau de pertinência 1
Esfera1	F - grau de pertinência 1	ESF - grau de pertinência 1
Esfera2	F - grau de pertinência 1	PE - grau de pertinência 1
Esfera3	F - grau de pertinência 1	ESF - grau de pertinência 1

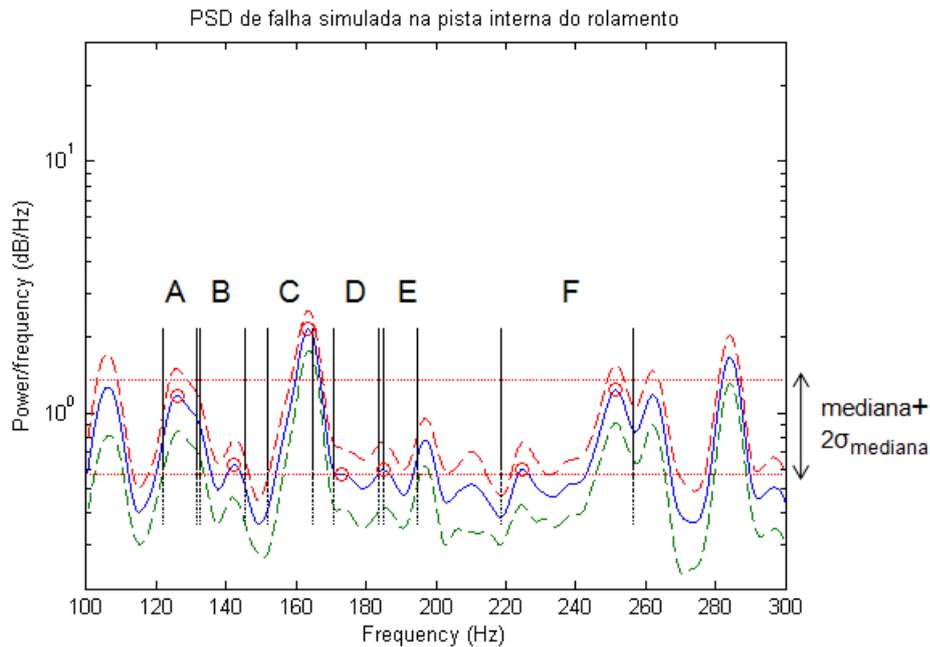


Figura 47: PSD do sinal real de falha induzida na pista interna do rolamento.

encontradas no sinal simulado são de fato muito semelhantes aos encontrados nos sinais reais. Constata-se ainda que os sinais reais têm uma relação sinal-ruído menor do que o sinal simulado, mas ainda assim obteve-se bons resultados usando a técnica de detecção de falhas proposta, como visto na Tabela 13.

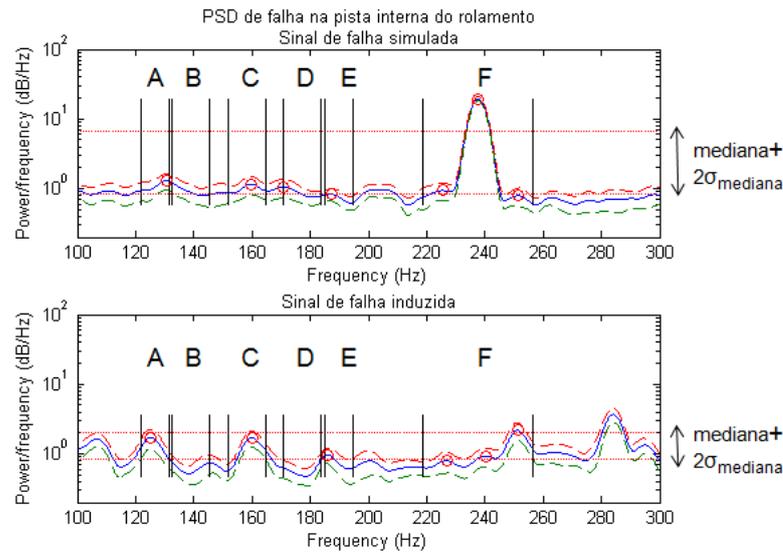


Figura 48: Apresentação dos resultados da estimativa de PSD para falha na pista interna do rolamento, em (a) resultado para o sinal de vibração simulado, e em (b) resultado para o sinal de vibração real.

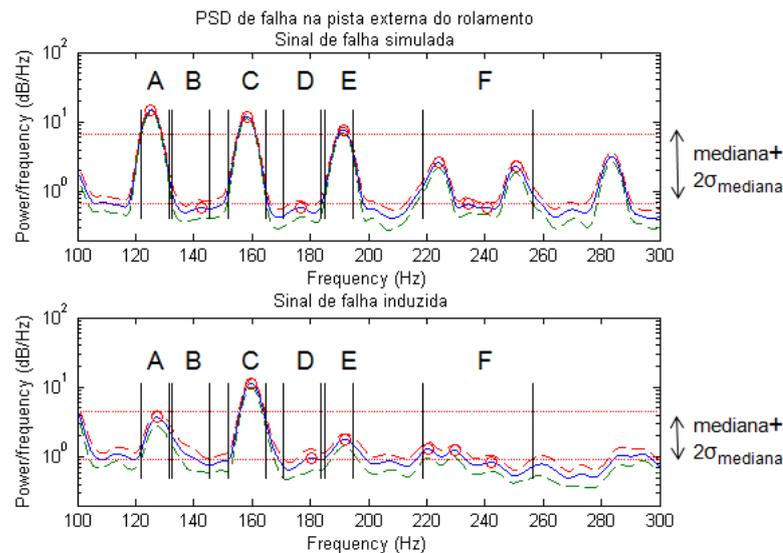


Figura 49: Apresentação dos resultados do PSD para falha na pista externa do rolamento, em (a) resultado para o sinal de vibração simulado, e em (b) resultado para o sinal de vibração real.

Os especialistas em falhas de rolamentos podem fazer as análises de sinais de vibração por meio de avaliação visual, ou seja, nem sempre é possível obter um resultado quantitativo quanto ao grau em que determinado pico é significativo e com que probabilidade ele de fato é um pico, em relação aos seus vizinhos. Como exemplo, a Figura 51 apresenta uma situação na qual um especialista poderia hesitar quanto à conclusão de que o defeito ocor-

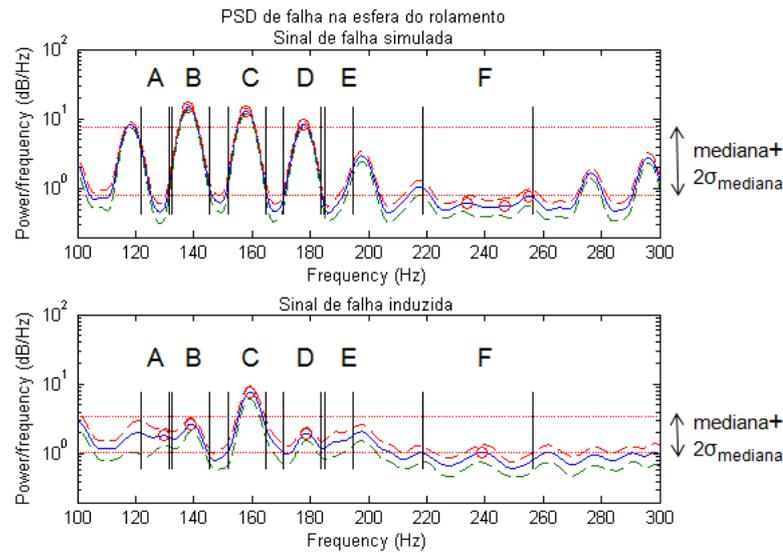


Figura 50: Apresentação dos resultados do PSD para falha nas esferas do rolamento, em (a) resultado para o sinal de vibração simulado, e em (b) resultado para o sinal de vibração real.

Tabela 13: Índice de acerto na aplicação da máquina de inferência nebulosa proposta para análise no domínio do tempo e no domínio da frequência de sinais de falhas simuladas e de falhas induzidas.

Tipo	Tempo	Frequência
Falhas simuladas	100%	100%
Falhas induzidas	75%	67%

reu apenas na pista externa ou se teria ocorrido defeito na pista interna também, devido ao fato de os picos (marcados na Figura 51) estarem próximos à frequência característica de falhas na pista interna.

Por meio da aplicação da metodologia proposta, vista na Figura 52, conclui-se que somente as faixas A, C e E são importantes, levando-se em consideração a probabilidade de ser pico, o quão significativos são os valores de pico em relação ao ruído estimado, e que o valor RMS é alto, obtendo-se como resultado que a falha é na pista externa com grau de pertinência 1.

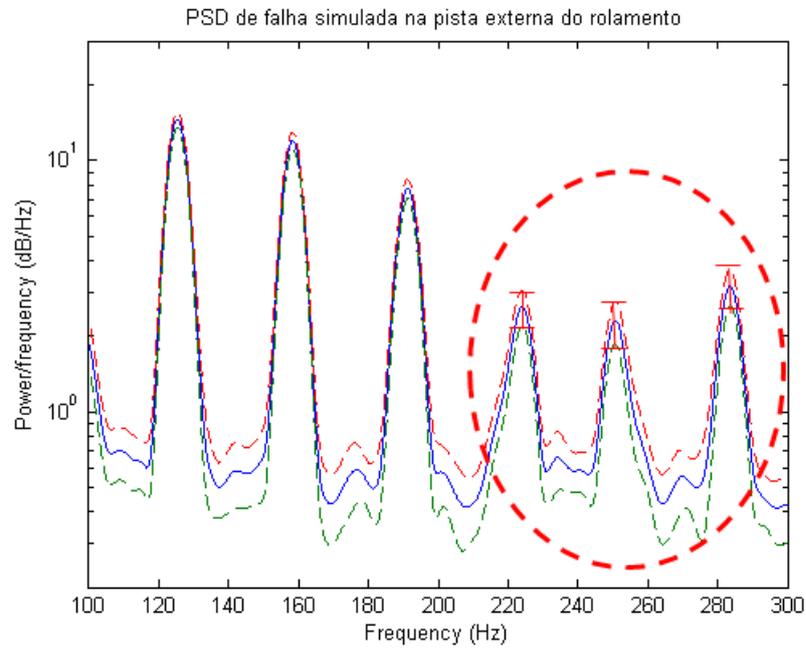


Figura 51: PSD de falha simulada no rolamento.

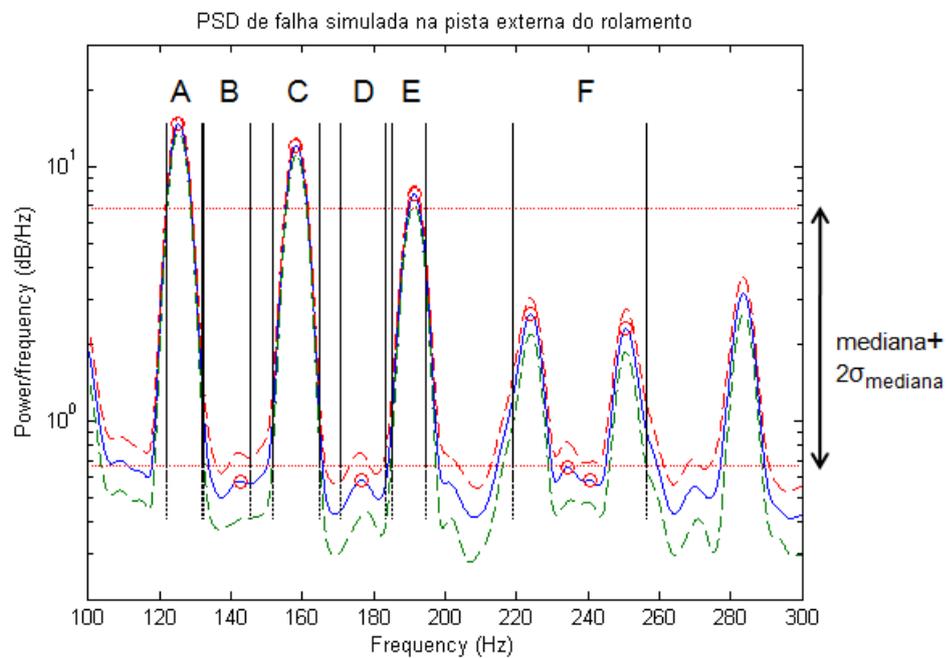


Figura 52: Aplicação da máquina de inferência nebulosa proposta em sinal de vibração simulado de falha em rolamento com a detecção da falha na pista externa do rolamento.

5 *Conclusões*

5.1 **Considerações Finais**

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para detecção de falhas em roletes de correias transportadoras por meio da incorporação da incerteza na estimativa de densidade espectral de potência em um sistema de inferência nebulosa. Os resultados mostraram que a inclusão do parâmetro proposto facilitou a análise dos picos no espectro de frequência do sinal, ajudando a compará-los com o ruído de fundo estimado, e possibilitando a obtenção da probabilidade de serem picos em relação aos picos vizinhos.

Primeiramente foi realizado o desenvolvimento de um modelo matemático dos roletes com simulação de falhas em rolamentos. A metodologia proposta para detecção de falhas foi então aplicada aos dados simulados. No domínio do tempo e no domínio da frequência, usando a metodologia apresentada, foram obtidos resultados corretos para todos os sinais simulados. Para o caso em que foram simuladas várias falhas, o sistema realizou corretamente a detecção e a classificação das mesmas. Já nos casos em que não há carregamento, como a relação sinal-ruído é muito pequena, o sistema não classificou corretamente todas as falhas.

A metodologia foi então aplicada em falhas induzidas nos rolamentos internos dos roletes para avaliação da sua aplicabilidade nestes sinais. Foi possível verificar que de fato é possível realizar a detecção de falhas em roletes por meio da análise de defeito em seus rolamentos internos, uma vez que foram encontradas as frequências características esperadas para cada tipo de defeito. No domínio do tempo e no domínio da frequência foram obtidos resultados corretos para sinais reais sem falha e sinais reais de falhas na pista externa. No caso de falhas na pista interna e de uma das falhas em esferas, não se obteve uma classificação correta, mas tal resultado é compatível com o que se esperaria de um especialista, tendo em vista o valor eficaz e as estimativas de densidade de potência

espectral correspondentes a este caso.

Destaca-se que o ideal seria o ajuste da máquina de inferência nebulosa para dados reais, entretanto este procedimento não foi possível de ser realizado devido ao pequeno volume de dados reais disponíveis. Caso houvesse um banco de dados de sinais reais de vibração maior seria possível realizar a otimização dos parâmetros das funções de pertinência da máquina de inferência nebulosa, assim como o que é realizado em redes neurais nebulosas.

Os resultados preliminares obtidos neste trabalho mostram que a metodologia pode ser usada para aprimorar a representação do conhecimento de um especialista para diagnóstico de falhas em rolamentos usados em roletes de correias transportadoras.

É importante ainda analisar a metodologia proposta, cuja representação está mostrada na Figura 2 na página 25 em três grandes áreas: modelagem matemática, processamento de sinais e inteligência computacional.

- Modelagem matemática

Optou-se por considerar o rolete como um rotor rígido apoiado em dois mancais de rolamentos. Como entrada do sistema foram utilizados os impulsos gerados por defeitos em rolamentos. Como variável medida considerou-se a aceleração.

A comparação entre sinais simulados e sinais de falhas induzidas mostrou que os picos significativos estão localizados nas mesmas faixas, tendo o sinal de falha induzida uma relação sinal-ruído pior do que o sinal simulado.

- Processamento de sinais

Para processamento dos sinais foi utilizado o PSD do envelope do sinal temporal, com a inclusão da:

- importância do valor de pico encontrado, comparando-o a uma estimativa da densidade espectral de potência de ruído branco presente nos dados; e,
- probabilidade de que um dado valor de PSD, reconhecido numericamente como um máximo local, seja de fato um valor de pico.

A inclusão destes parâmetros foi fundamental para minimizar o subjetivismo da análise e julgamento no momento da classificação da falha. Assim, falhas que os

especialistas provavelmente classificariam de forma incorreta, foram corretamente classificadas pelo sistema.

Já em sinais com baixa relação sinal-ruído, o sistema não foi capaz de classificar corretamente para todos os casos, uma vez que os picos estão muito próximos do valor do ruído de fundo estimado.

- **Inteligência computacional**

Foi escolhida uma máquina de inferência nebulosa para desenvolvimento da metodologia de detecção automática de falhas. O sistema foi desenvolvido por meio de três sub-sistemas: *Tempo*, *Faixa* e *Detecta*.

O sub-sistema de inferência nebulosa *Tempo* foi utilizado para a análise no domínio do tempo, detectando não somente falhas em rolamentos, mas quaisquer variações bruscas no sistema, indicando outros tipos de falhas.

Os sub-sistemas de inferência nebulosa *Faixa* e *Detecta* representaram a análise no domínio da frequência. Com estes sub-sistemas foi possível obter a classificação das falhas de acordo com sua localização (pistas interna e externa ou esfera).

A maior dificuldade encontrada foi na definição de quais regras produzem os melhores resultados para o problema de detecção e classificação de falhas em rolamentos.

5.2 Trabalhos Futuros

Propõe-se como trabalhos futuros:

- Realizar os testes com sinais reais de falhas em roletes, de acordo com o planejamento de testes experimentais realizado neste trabalho, e avaliar a aplicação da metodologia proposta neste trabalho.
- Representar toda a estrutura da bancada e mais tipos de falhas em rotores rígidos (ex: desbalanceamento).
- Implementar o sistema de inferência nebulosa *Tempo* para outros parâmetros estatísticos, como: Curtose e Valor de Pico, por exemplo.
- Realizar o procedimento de extração de características usando, ao invés da estimativa de PSD, parâmetros da Transformada Wavelet.

- Implementar outras ferramentas de inteligência computacional (redes neurais ou redes neuro-fuzzy) para análise dos parâmetros de entrada propostos neste trabalho.
- Realizar o ajuste dos parâmetros das funções de pertinência por meio da otimização, no contexto de treinamento de redes *neuro-fuzzy*.

APÊNDICE A – Teste de Vida Acelerada

A confiabilidade é um aspecto importante que aparece nos requisitos da qualidade de produtos, estando associada à capacidade dos mesmos de “funcionarem de maneira satisfatória durante um longo período de tempo” (FREITAS; COLOSIMO, 1997). Uma das ferramentas utilizadas para medir a confiabilidade de produtos é o Teste de Vida Acelerado, no qual estes produtos são submetidos a testes em condições diferentes das condições de uso, e permitem que a falha ocorra mais rapidamente. Para garantir a validade das informações obtidas nestes testes é importante o cuidado no planejamento e na realização dos experimentos, sendo necessária atenção para os aspectos práticos, tais como normas técnicas de engenharia e disponibilidade de máquinas, além de condições ótimas, levando em consideração os critérios estatísticos.

No presente trabalho é realizado o planejamento dos testes de vida acelerados para determinação do tempo até a ocorrência de falhas de roletes de correias transportadoras.

Para a elaboração do plano de testes foram necessárias informações técnicas sobre os roletes e obtenção das condições normais de uso dos mesmos em correias transportadoras. Como não foram realizadas simulações de dados preliminares, todas as informações técnicas foram obtidas com fornecedores.

Para realização dos testes acelerados nos roletes é utilizada uma bancada, vista na Figura 1 na página 22. Para reduzir o tempo até a falha dos roletes, a bancada projetada permite operá-los em velocidades de rotação e cargas mais elevadas do que aquelas normalmente experimentadas em campo.

A.1 Testes de Vida e Testes Acelerados

O sucesso de determinado experimento depende do planejamento adequado dos testes de vida acelerados, sendo necessárias especificações corretas: das condições de uso, da

forma de teste e do planejamento experimental. O planejamento e realização dos testes acelerados deve ser desenvolvido de forma conjunta, por engenheiros e estatísticos (FREITAS; COLOSIMO, 1997).

A forma de teste consiste na determinação de (FREITAS; COLOSIMO, 1997):

1. **Medida de performance:** variável que se deseja obter como resposta do teste de vida acelerado.
2. **Condições de teste:** é desejável que as condições de teste sejam ao máximo similares às condições reais de uso.
3. **Variável de estresse:** quantas e quais são a(s) variável(is) a ser(em) utilizada(s) para acelerar a vida do produto.
4. **Forma de aplicação da carga de estresse:** a aplicação do estresse pode ser constante, em escada, progressiva, cíclica ou aleatória.
5. **Mecanismo de censura:** o mecanismo pode ser do tipo I (por tempo), do tipo II (por falha) ou aleatório .

Existem três propostas de planos experimentais: Plano Tradicional, com níveis de estresse igualmente espaçados e mesmo número de unidades para cada nível; Planos Ótimos, com dois níveis de estresse com alocações desiguais de unidades; e Plano de Compromisso, com três níveis de estresse (alto, intermediário e baixo). O plano experimental consiste na determinação de (FREITAS; COLOSIMO, 1997):

1. **Número de níveis da variável de estresse:** quantos níveis de estresse serão utilizados. O número de níveis não deve ser pequeno (<3), pois torna difícil avaliar o modelo utilizado e conseqüentemente fazer a extrapolação para as condições de uso. O número não deve ser grande, pois se torna um complicador em termos práticos e inviabiliza os cálculos para a escolha de um plano ótimo.
2. **Proporção de alocação em cada nível:** dado o número de níveis de estresse e o tamanho da amostra, deve-se definir quantas amostras serão alocadas em cada nível.

3. **Níveis de estresse:** quais níveis serão utilizados. Sendo que o menor nível de estresse precisa estar próximo da condição normal de uso, e o maior nível não pode ser escolhido de forma que ocorram falhas que não ocorreriam normalmente, tornando a extrapolação imprecisa. Sendo o segundo nível um valor intermediário.
4. **Tamanho da amostra:** quantas unidades serão submetidas a teste. O livro (FREITAS; COLOSIMO, 1997) fornece algumas formas para cálculos de tamanhos de amostras para dois tipos de testes: testes acelerados e testes de vida.
 - Testes acelerados: cálculo para estimação dos percentis (t_p) da distribuição do tempo até a falha (equação (A.1)).

$$n = \left[\frac{z_\gamma \sigma}{\ln(r)} \right]^2 V \quad (\text{A.1})$$

onde, z_γ é o $100\gamma\%$ percentil da distribuição normal padrão sendo γ a probabilidade que indica o nível de confiança desejado; σ é o valor considerado para o parâmetro de escala; $r = m + 1$, onde $m \times 100\%$ é o erro especificado para a estimativa do percentil; e, V é a variância assintótica da estimativa do percentil de interesse, multiplicada por $n\sigma^2$. Para obtenção de V , são necessários valores de: percentil($100P\%$) da distribuição do tempo de falha do produto que é de maior interesse para o estudo (P); probabilidade de falha no nível alto de estresse durante o período de teste (p_a); e, probabilidade de falha nas condições de projeto durante o período de duração do teste (p_o).

- Testes de vida: tamanho da amostra para estimação da taxa de falha ($\lambda(t)$) em um determinado tempo (equação (A.2)) e estimação dos percentis (t_p) da distribuição do tempo até a falha para a Distribuição Weibull (equação (A.3)).

$$n = \left[\frac{z_\gamma}{\ln(r)} \right]^2 V(\varepsilon_e; \varepsilon_c) \quad (\text{A.2})$$

onde, $V(\varepsilon_e; \varepsilon_c)$ é o fator de variância.

$$n = \left[\frac{z_\gamma}{\delta \ln(r)} \right]^2 V \quad (\text{A.3})$$

onde, δ é o valor do parâmetro de forma da Distribuição Weibull.

A Distribuição Weibull descreve adequadamente a vida de manuais (FREITAS; COLOSIMO, 1997), sendo a aceleração por alta taxa de uso a mais indicada para estes produtos, de

tal forma que a velocidade de rotação dos mancais pode ser aumentada em três ou mais vezes para testes de vida acelerados (ESCOBAR; MEEKER, 2006).

Ainda, de acordo com Colosimo e Freitas (1997), deve-se atentar, durante os testes, para outras variáveis, tais como:

- Experimentais: são controláveis e são investigadas com o objetivo de estudar seus efeitos.
- Fixas: devem ser mantidas constantes durante o teste (mesmo lote, mesmo operador, etc).
- Não controláveis, mas observáveis: seus valores devem ser anotados para que se aprenda a respeito do seu efeito.
- Não controláveis e não observáveis: podem se confundir com o efeito do estresse, podendo-se utilizar a aleatorização.

A.2 Condições de Uso e de Projeto

As condições de uso dos roletes em uma mina de extração de minério de ferro são:

- Carga: 160 kg;
- Velocidade: 600 rpm.

Nestas situações os fornecedores garantem 15.000 horas (~ 21 meses) de funcionamento. Durante o projeto da bancada foram propostos os seguintes valores para carga e velocidade.

- Carga: 260 kg;
- Velocidade: 0 a 1600 rpm.

Espera-se que o aumento de carga e velocidade reduza a vida útil dos roletes. Para calcular essa redução, de forma analítica, pode-se utilizar conhecimentos físicos do processo. Sabe-se que o desgaste em discos é função da pressão exercida sobre eles (P_O) e da

velocidade linear aplicada (v). A pressão (P_O) pode ser reescrita como função da força aplicada (F) e da área de contato (A), e a velocidade linear como função da velocidade angular (ω) e do raio do rolete (r), como visto na equação (A.4).

$$Desgaste \cong P_O v \cong \frac{F}{A} \omega r \quad (\text{A.4})$$

A área (A) e o raio (r) são iguais em todos os roletes, podendo ser desconsiderados no cálculo teórico do modelo determinístico da resposta da relação entre o aumento da velocidade e a redução no tempo de vida dos roletes. Este modelo é calculado por meio da física do processo, não sendo capaz de explicar a variabilidade para a variável resposta em um mesmo nível de estresse. Torna necessário o acréscimo do componente probabilístico, afinal em cada nível de estresse os tempos de falha dos roletes seguem uma certa distribuição de probabilidade (FREITAS; COLOSIMO, 1997).

Os valores obtidos para o cálculo do modelo físico do processo são vistos na Figura 53. Neste modelo considera-se uma utilização similar à da mina, ou seja, 24 horas por dia durante 30 dias por mês, o que é viável de ser realizado na bancada. Assim, obtém-se uma estimativa de:

- 1000 rpm : 7 meses e 21 dias (\sim 5540 horas)
- 1300 rpm : 5 meses e 28 dias (\sim 4260 horas)
- 1600 rpm : 4 meses e 24 dias (\sim 3460 horas)

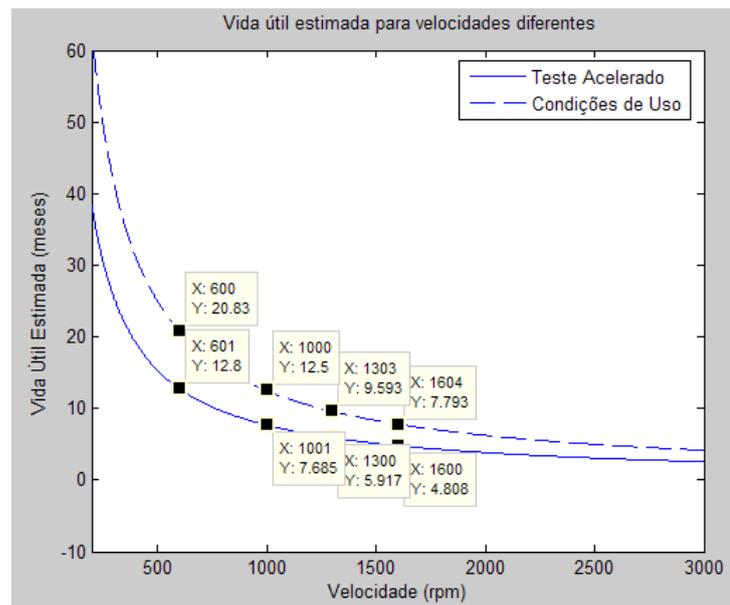


Figura 53: Resposta teórica para a relação Estresse-Resposta.

A.3 Planejamento dos Testes Acelerados

A.3.1 Forma do Teste

1. Medida de performance:

O percentil 5% ($t_{0,05}$) é uma medida de performance interessante, afinal determina o tempo no qual se espera que 5% dos roletes colocados em operação venham a falhar, havendo a possibilidade de danos nas correias transportadoras caso não haja substituição destes componentes.

2. Condições de teste:

Para simulação do ambiente de operação dos roletes, foram propostos: um sistema de gotejamento de uma solução com água e minério de ferro nas extremidades dos eixos dos roletes e o revestimento dos rolos de carga com material polimérico, similar ao utilizado em correias.

Devido a impossibilidade de controlar todas as fontes de variabilidade envolvidas no experimento, tais como as de variáveis não controláveis e não observáveis, foi proposta a alternativa de testes aleatórios, onde: serão retirados dois dados e a numeração indicará qual dos fornecedores e qual nível de velocidade será utilizado em

cada rolete.

3. Variável de estresse:

Quantas? 1 variável de estresse

Qual? Velocidade

obs: A carga também foi alterada de 160 Kg para 260 kg, mas é mantida constante para todos os roletes, não sendo considerada variável de estresse.

4. Forma de aplicação do estresse:

Constante (Figura 54), pois é mais próxima da realidade e permite que o teste seja mais simples.

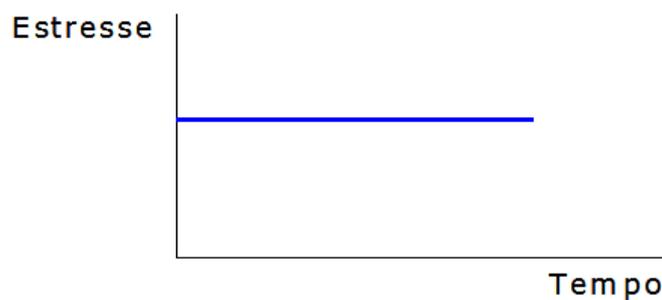


Figura 54: Forma de aplicação de carga de estresse.

5. Mecanismo de Censura:

Tipo I (por tempo), uma vez que tem-se uma estimativa do tempo de falha para cada nível de estresse. Além disso, este tipo de censura torna possível prever o término dos testes.

A.3.2 Planejamento do Experimento

Para o planejamento experimental foi utilizado o Plano de Compromisso.

1. Número de níveis de estresse:

Quantos? 3 níveis

2. Proporção de alocação em cada nível:

Plano de Compromisso: Baixo (4) : Intermediário (2) : Alto (1), como indicado pelo Plano de Compromisso.

3. Determinação dos níveis de estresse:

Baixo: 1000 rpm

Intermediário: 1300 rpm

Alto: 1600 rpm

A velocidade mais baixa de 1000 rpm foi selecionada de forma que seja próxima à velocidade nas condições normais de uso (600 rpm), mas permita acelerar a vida útil dos roletes. O valor máximo de 1600 rpm foi escolhido devido a limitações mecânicas do sistema¹. Os níveis de estresse são vistos na Figura 55.

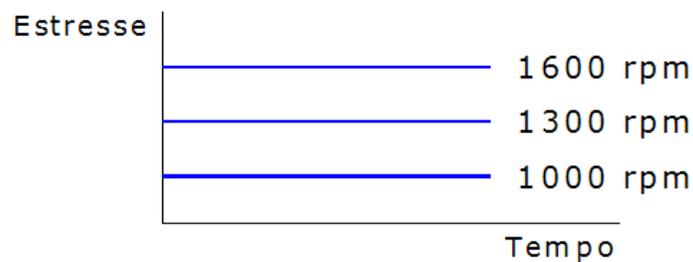


Figura 55: Níveis de estresse.

4. Tamanho da amostra:

Deseja-se calcular o tamanho da amostra em testes acelerados necessária para estimar o percentil de 5% da distribuição do tempo até a falha para as condições de uso com a probabilidade γ de 95%, e o mínimo erro cometido (m).

Como visto, estão sendo utilizados três níveis de estresse, sendo o nível mais alto 1600 rpm. Está sendo utilizada a Distribuição Weibull para os tempos de falha nos

¹No momento do planejamento dos testes, a velocidade máxima permitida para ensaios na bancada era de 1600 rpm, entretanto durante os testes reais na bancada houveram mudanças no projeto e a velocidade máxima foi alterada para 1980 rpm. Esta foi a velocidade de fato utilizada nos testes.

níveis de estresse, e a alocação de acordo com o Plano de Compromisso, que é de 4:2:1. Foram estabelecidos os seguintes valores para cálculo do tamanho da amostra, de acordo com a equação (A.1):

- 18 meses de testes : disponibilidade para os primeiros resultados com a bancada
- $\gamma = 95\% \therefore z_\gamma = 1,96$
- $\sigma = 1/\delta = 1/1,5$ ($\delta > 1$ quando há efeito gradual de envelhecimento)
- $t_{0,05}$: foi escolhido um percentil baixo para evitar danos nas correias
- $p_0 = 0,01$
- $p_a = 0,80$
- $r = 1,1$ a $1,5$ (5 a 50% de erro) o percentil encontrado terá uma estimativa entre $(t_{0,05}/r)$ e $(t_{0,05}^*r)$, ou seja, o aumento de r aumenta a imprecisão da medida de performance
- $V = 61,83$ (para o Plano de Compromisso)

O tamanho de amostra neste caso varia de acordo com o erro, como visto na Figura 56, e mais detalhadamente na Tabela 14, na qual pode ser visualizada a alocação nos níveis de estresse de acordo com o Plano de Compromisso. Como visto, para valores menores de erro, o tamanho da amostra cresce significativamente, ou seja, são necessários tamanhos grandes de amostra quando se deseja obter maior precisão na estimativa.

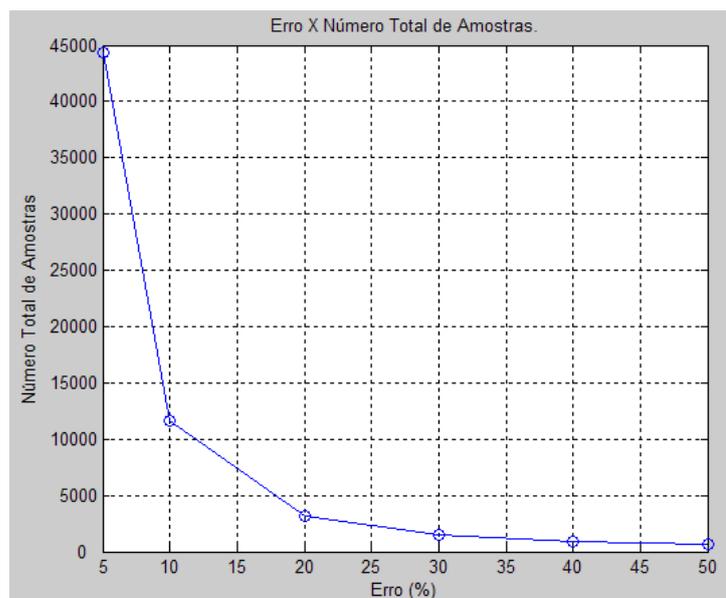


Figura 56: Variação do número de amostras com aumento do erro.

Tabela 14: Resultado do número de amostras para valores variados de erro.

Erro	Tamanho da Amostra	4	2	1
5%	44345	25340	12670	6335
10%	11621	6640	3320	1660
20%	3176	1815	907	454
30%	1534	876	438	219
40%	932	533	266	133
50%	642	367	183	92

Para que seja viável realizar os testes com o tamanho de amostra calculado, seria necessário pensar em dois fatores: aumento do tempo de teste ou construção de mais bancadas, que permitam a realização de testes simultâneos com um número maior de roletas. Afinal, com a estrutura da bancada, seria impossível, mesmo aceitando um erro de 40%, ensaiarmos 932 roletas em 18 meses, para garantirmos a confiabilidade do resultado.

Levando em consideração os dados determinísticos, há possibilidade de realizar testes em aproximadamente 12 roletas no período de 18 meses, afinal pela estimativa apresentada na Figura 53, pode-se realizar um ensaio com cada velocidade utilizando quatro roletas, o que levaria a 18 meses. Esta diminuição no número de

roletes ocasionaria uma diminuição da confiança dos resultados de 95% para aproximadamente 17,42%, considerando o erro de 40%, sendo reduzida a 4,78% caso admitíssemos um erro apenas de 10%.

Como levou-se em consideração valores determinísticos para estimar o número de falhas em 18 meses, ou seja, vários roletes podem falhar antes ou após o previsto, de acordo com uma distribuição de probabilidade.

Considerando um fator estatístico, ou seja, vários roletes podem falhar antes ou após o previsto, de acordo com uma distribuição de probabilidade, pode-se prever um aumento no número de roletes a serem testados em 18 meses, e verificar o aumento na probabilidade. Como visto na Figura 57, se for possível ensaiar 20 roletes, pode-se obter probabilidade de 22,82%. Este valor só aumenta com o aumento de tamanho de amostra, chegando a 47,78% no caso de testarmos 100 roletes, e 95% para 932 roletes.

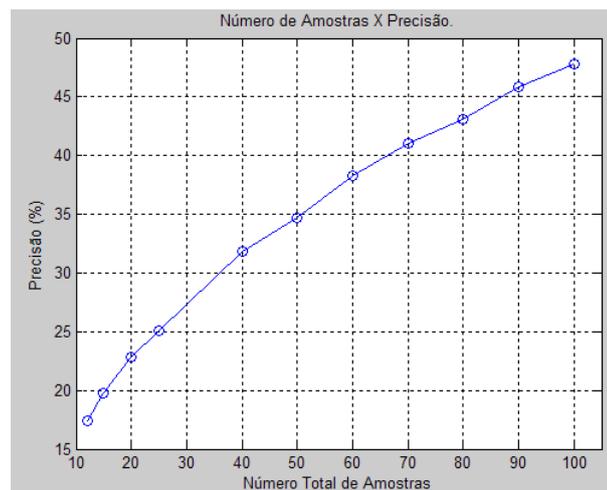


Figura 57: Variação da precisão com aumento do tamanho da amostra.

APÊNDICE B – Lógica Nebulosa

A lógica nebulosa consiste em se mapear um espaço de entrada em um espaço de saída (CAMINHAS, 1997). Na lógica clássica um certo valor pertence ou não pertence a um determinado conjunto (0 ou 1, sim ou não), enquanto na lógica nebulosa o valor pode pertencer ao conjunto com um certo grau de pertinência (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997), representado por valores intermediários entre 0 e 1. A lógica nebulosa consegue representar conceitos vagos como, por exemplo, a definição se uma pessoa é ou não velha, se ela tiver um dia a menos, ou até horas a menos de vida que uma pessoa de 70 anos.

Dentro da lógica nebulosa são utilizadas palavras, que apesar de possuírem menor precisão que valores numéricos, são mais próximas da intuição humana (FUJIMOTO, 2005). Assim, os conjuntos nebulosos definidos na lógica nebulosa são utilizados para expressar conceitos como: alto, baixo, longe, próximo, muito longe, muito próximo, entre outros. Para tratar problemas como este, a lógica nebulosa trabalha com regras nebulosas e funções de pertinência que mapeiam cada elemento do universo de discurso(X) em uma grade de pertinência de 0 a 1.

A construção da lógica nebulosa depende da identificação do universo de discurso (ex. idade) e da especificação de uma função de pertinência adequada. Um conjunto nebuloso (A) pode ser representado por (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997):

$$A = \{x \in X \mid 0 \leq \mu_A(x) \leq 1\}, \quad (\text{B.1})$$

sendo que X é o universo de discurso ao qual o conjunto pertence, x é um componente do conjunto nebuloso e $\mu_A(x)$ é a função de pertinência.

A função de pertinência $\mu_A(x)$ fornece o grau de pertinência de um componente do universo de discurso X a um determinado conjunto nebuloso (JANG; SUN; MIZUTANI,

1997).

B.1 Funções de Pertinência

As funções de pertinência podem ser triangulares, trapezoidais ou gaussianas, dentre outras possibilidades. Neste trabalho foram utilizadas as funções de pertinência triangulares e trapezoidais, vistas nas Figuras 58(a) e (b), respectivamente.

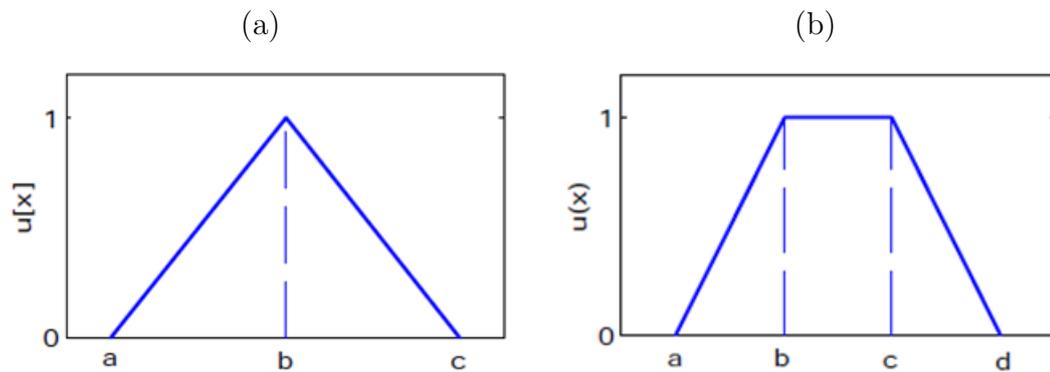


Figura 58: Funções de Pertinência, em (a) triangular, em (b) trapezoidal.

As equações que descrevem as funções de pertinência triangulares e trapezoidais são:

$$\mu_{Triang}(x; a; b; c) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b; \\ \frac{x-c}{b-c}, & b < x < c; \\ 0, & x \geq c. \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

$$\mu_{Trap}(x; a; b; c) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b; \\ 1, & b \leq x \leq c; \\ \frac{x-d}{c-d}, & c < x < d; \\ 0, & x \geq d. \end{cases} \quad (\text{B.3})$$

B.2 Regras de Inferência

A inferência nebulosa pode ser implementada a partir de sentenças que relacionam causa e consequência via regras se-então (*if-then*). Um exemplo de regra de inferência é (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997):

SE Pressão é Alta ENTÃO Volume é Baixo.

Podendo ser a regra dividida em:

- Premissa: [Característica] é [Variável Linguística].
- Regra: SE [Característica] é [Variável Linguística] ENTÃO [Saída] é [Variável Linguística].
- Consequência: [Saída] é [Variável Linguística].

Um operador importante é o de Agregação. Este une a influência de todas as regras obtidas após a aplicação do operador ENTÃO sobre o resultado final, apresentando a consequência do sistema como um todo devido às entradas do sistema nebuloso (FUJIMOTO, 2005).

B.3 Máquina de Inferência Nebulosa

A máquina de inferência nebulosa incorpora o conhecimento humano e o representa via regras se-então, uma vez que o conhecimento humano lida com dados abstratos e imprecisos, não tendo um limite bem definido (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997).

Um sistema de inferência nebulosa pode ser dividido em cinco etapas:

1. Fuzzificação da entrada;
2. Aplicação dos operadores E e/ou OU e/ou NÃO;
3. Aplicação do operador ENTÃO;
4. Aplicação do operador de Agregação;
5. Defuzzificação.

Na fuzzificação os valores de entrada são transformados em variáveis linguísticas. A Inferência Nebulosa tem a finalidade de relacionar as variáveis entre si com regras *se-então*. Na etapa de defuzzificação é realizada a operação inversa, ou seja, os dados finais são obtidos por meio de resultados linguísticos, assim pode-se dizer que esta é a fase de tradução do resultado lingüístico do processo de inferência fuzzy em um valor numérico.

Os operadores de defuzzificação (Figura 59) são:

- Centróide: centro de massa de gravidade;
- Bisector: divide a saída em duas regiões de mesma área;
- MOM: média do máximo;
- SOM: menor dos máximos;
- LOM: maior dos máximos.

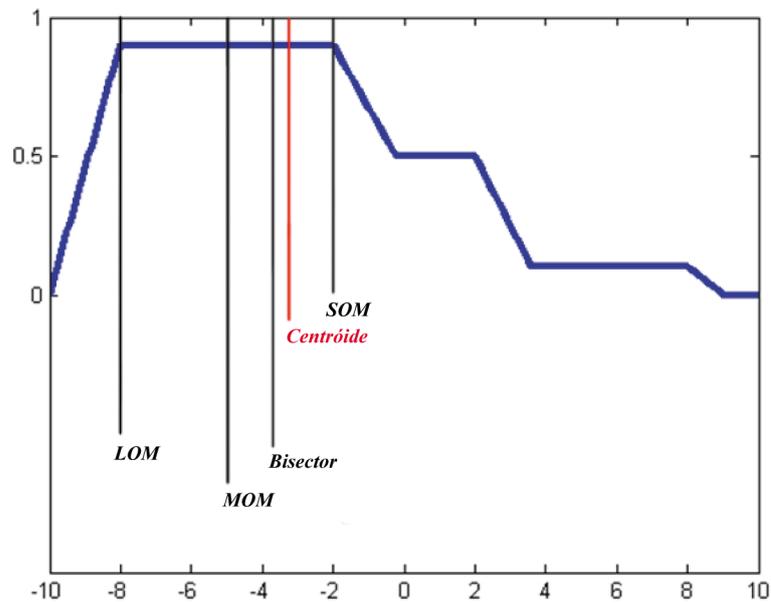


Figura 59: Operadores de defuzzificação.

Neste trabalho foi utilizado o operador de defuzzificação Centróide, que realiza a soma de todos os momentos (localização x da massa) em torno do centro de gravidade, forçando a soma a ser zero, ou seja, a soma de todos os momentos deve ser nula (CAMPONOGARA, 2009). Então sendo y_0 o centro de gravidade, y_i a localização de cada massa e m_i a massa, onde $i = 1, 2, \dots, n$, a centróide é calculada como:

$$0 = (y_1 - y_0)m_1 + (y_2 - y_0)m_2 + \dots + (y_n - y_0)m_n \quad (\text{B.4})$$

$$0 = (y_1m_1 + y_2m_2 + \dots + y_nm_n) - y_0(m_1 + m_2 + \dots + m_n)$$

$$y_0(m_1 + m_2 + \dots + m_n) = y_1m_1 + y_2m_2 + \dots + y_nm_n$$

Assim, chega-se à equação:

$$y_0 = \frac{y_1m_1 + y_2m_2 + \dots + y_nm_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (\text{B.5})$$

Neste trabalho a massa é representada pela função de pertinência μ e y corresponde às saídas das regras. Desta forma:

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(i)y(i)}{\sum_{i=1}^n \mu(i)} \quad (\text{B.6})$$

Os 3 tipos principais de inferência nebulosa: Mamdani, Sugeno e Tsukamoto. Neste trabalho foi utilizada apenas a máquina de inferência nebulosa do tipo Mamdani.

1. Máquina de Inferência Mamdani

Utiliza funções de pertinência na entrada e na saída para obter a resposta desejada. Para a obtenção da saída (y) é necessário fornecer as funções de pertinência μ da entrada (x) e as regras (se-então) (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997). Desta forma, considera-se o exemplo a seguir como uma máquina de inferência nebulosa Mamdani “max-min” e defuzzificação por meio do método centróide para um sistema com variáveis de entrada x_1 , x_2 e x_3 , além de uma variável de saída y .

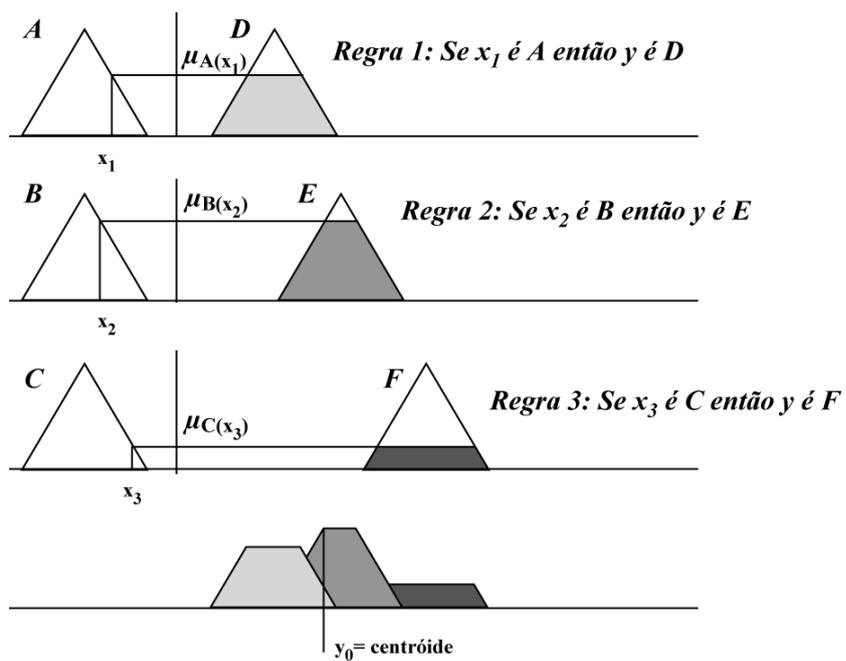


Figura 60: Máquina de Inferência Mamdani. Fonte: Modificado de (CAMPONOGARA, 2009).

Referências

- ALMEIDA, F. R. do V.; ALMEIDA, M. T. de. Statistical analysis of vibration signals for condition monitoring of defects in rolling element bearings. *Proceedings of COBEM*, 2005.
- BÜCHNER, P. C. *Análise de mancais de rolamentos através dos sinais de vibração, usando método da curtose e do envelope*. Dissertação (Mestrado) — PUCPR - Faculdade de Engenharia Mecânica, Curitiba - Paraná, 2001.
- BEZERRA, R. de A. *Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração*. Tese (Doutorado) — UNICAMP - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2004.
- CAMINHAS, W. M. *Estratégias de Detecção e Diagnóstico de Falhas em Sistemas Dinâmicos*. Tese (Doutorado) — UNICAMP - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 1997.
- CAMPONOGARA, E. *Referência: Conjuntos, Lógica e Controle Fuzzy*. [S.l.], 2009.
- CASTEJÓN, C.; LARA, O.; GARCÍA-PRADA, J. C. Automated diagnosis of rolling bearings using mra and neural networks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 24, p. 289–299, 2010.
- CHANGQING, B.; QINGYU, X. Dynamic model of ball bearings with internal clearance and waviness. *Journal of Sound and Vibration*, v. 294, p. 23 – 48, 2006.
- CHEN, J.; PATTON, R. J. *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- CORREIA, F. de A. G. *Determinação de Características de Desempenho de Mancais Radiais Elípticos Utilizando o Método de Elementos Finitos*. Dissertação (Mestrado) — UFMG - Faculdade de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte - MG, 2007.
- ESCOBAR, L. A.; MEEKER, W. Q. A review of accelerated test models. *Statistical Science*, v. 21, n. 4, p. 552–557, 2006.
- FENG, N. S.; HAHN, E. J.; RANDALL, R. B. Using transient analysis software to simulate vibration signals due to rolling element bearing defects. *3rd Australian Congress on Applied Mechanics*, 2002.
- FREITAS, M. A.; COLOSIMO, E. A. *Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados*. 1. ed. Escola de Engenharia da UFMG - Belo Horizonte: [s.n.], 1997.

- FUJIMOTO, R. Y. *Diagnóstico Automático de Defeitos em Rolamentos Baseado em Lógica Fuzzy*. Dissertação (Mestrado) — USP - Departamento de Engenharia Mecânica, 2005.
- FUKATA, S. et al. On the vibration of ball bearings. *Bulletin of JSME*, v. 28, p. 889 – 904, 1985.
- GAO, X. Z.; OVASKA, S. J. Soft computing methods in motor fault diagnosis. *Applied Soft Computing*, p. 73 – 81, 2001.
- GERTLER, J. J. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1998.
- GHAFAARI, S. H. *A Fault Diagnosis System for Rotary Machinery Supported by Rolling Element Bearings*. Tese (Doutorado) — University of Waterloo - Canadá - School of Mechanical Engineering, 2007.
- GODDU, G.; LI, B.; HUNG, J. C. Motor bearing fault diagnosis by a fundamental frequency amplitude based fuzzy decision system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 4, p. 1961–1965, 1998.
- HARRIS, T. A. *Rolling Bearing Analysis*. New York: John Wiley Sons Inc., 1966.
- HENG, A. et al. Rotating machinery prognostics:state of the art,challenges and opportunities. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 23, p. 724 – 739, 2009.
- JANG, G.; JEONG, S.-W. Vibration analysis of a rotating system due to the effect of ball bearing waviness. *Journal of sound and vibration*, v. 269, p. 709–726, 2004.
- JANG, J.-S. R. Anfis : Adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS*, v. 23, n. 3, p. 665–685, 1993.
- JANG, J.-S. R.; SUN, C.-T.; MIZUTANI, E. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. [S.l.]: Prentice Hall, 1997.
- JUNSHENG, C.; DEJIE, Y.; YU, Y. Application of an impulse response wavelet to fault diagnosis of rolling bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 21, p. 920–929, 2007.
- KARPENKO, E.; WIERCIGROCH, M.; CARTMELL, M. Regular and chaotic dynamics of a discontinuously nonlinear rotor system. *Chaos, Solitons Fractals*, v. 13, p. 1231 – 1242, 2002.
- Kärkkäinen, A.; SOPANEN, J.; MIKKOLA, A. Dynamic simulation of flexible rotor during drop on retainer bearings. *Journal of Sound and Vibration*, v. 103, p. 610 – 617, 2007.
- LI, B. et al. Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 47, p. 1060–1069, 2000.

- LIU, T. I.; SINGONAHALLI, J. H.; IYER, N. R. Detection of roller bearing defects using experts system and fuzzy logic. *Mechanical systems and Signal Processing*, v. 10, n. 5, p. 595–614, 1996.
- LIU, X. Using fuzzy c-means and fuzzy integrals for machinery fault diagnosis. *In Proceedings International Conference on Condition Monitoring*, p. 1–9, 2005.
- LOPARO, K. A. et al. Fault detection and diagnosis of rotating machinery. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, v. 47, n. 5, p. 1005–1014, 2000.
- LOURES, M. M. *Automação de Bancada de Ensaios de Roletes de Correias Transportadoras de Minério de Ferro*. [S.l.], 2006.
- MCFADDEN, P. D.; SMITH, J. D. Model for the vibration produced by a single point defect. *Journal of Sound and Vibration*, v. 96, p. 69 – 82, 1984.
- MECHEFSKE, C. K. Objective machinery fault diagnosis using fuzzy logic. *Mechanical systems and Signal Processing*, v. 12, n. 6, p. 855–862, 1998.
- MENDEL, E. et al. Automatic bearing fault pattern recognition using vibration signal analysis. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2008.
- MENDEL, E. et al. Detecção de falhas em rolamentos por análise de sinais de vibração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA. [S.l.], 2008.
- MOLLAZADE, K. et al. An intelligent combined method based on power spectral density, decision trees and fuzzy logic for hydraulic pumps fault diagnosis. *International Journal of Intelligent Systems and Technologies*, p. 251 – 263, 2008.
- NASCIMENTO, G. H. et al. Procedimentos para avaliação de desempenho de roletes em correias transportadoras utilizando uma bancada de testes em condições de operação. *61º CONGRESSO ANUAL DA ABM*, Julho 2006. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/congresso/2006>>. Acesso em: 25 out. 2006.
- PADOVESE, L. R. *Automação de diagnóstico de falhas em plantas industriais*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2002.
- PEREIRA, P. J. C. *Introdução à Dinâmica de Rotores*. [S.l.], 2003.
- PONCI, L. P.; CUNHA, P. M. R. da. Previsão de falha em rolamentos por análise espectral e de envelope. *Teknikão*, p. 1–11, 2005.
- PRASHAD, H. Determination of stiffness of roller bearings - an alternative approach. *IE(I) J-MC*, v. 84, p. 186–192, 2004.
- PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. *Digital Signal Processing (Third Edition)*. [S.l.]: Prentice-Hall International, 1996.

- PUROHIT, R. K.; PUROHIT, K. Dynamic analysis of ball bearings with effect of preload and number of balls. *Journal of Applied Mechanics and Engineering*, v. 11, p. 77–91, 2006.
- SANTOS, F. L. et al. Balancing of a rigid rotor using artificial neural network to predict the correction masses. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 31, n. 2, p. 151–157, 2009.
- SAWALHI, N. *Diagnostics, Prognostics and Fault Simulation for Rolling Element Bearings*. Tese (Doutorado) — The University of New South Wales - School of Mechanical and Manufacturing Engineering, 2007.
- SAWALHI, N.; RANDALL, R. B. Simulating gear and bearing interactions in the presence of faults. part i. the combined gear bearing dynamic model and the simulation of localised bearing faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 22, n. 8, p. 1924–1951, 2008.
- SAWALHI, N.; RANDALL, R. B. Simulating gear and bearing interactions in the presence of faults. part ii. simulation of the vibrations produced by extended bearing faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 22, n. 8, p. 1952–1966, 2008.
- SELIGER, B. K.; FRANK, P. M. Fault detection and isolation in technical processes with neural networks. *Proceedings of the 34th IEEE Conference*, v. 3, p. 2414 – 2419, 1995.
- SHAMES, I. H. Estática: Mecânica para engenharia. In: _____. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002. p. 461.
- SHIN, K.; HAMMOND, J. *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*. [S.l.]: John Wiley and Sons Ltd, 2008.
- SILVA, E. L. da. *Dinâmica de Rotores: Modelo Matemático de Mancais Hidrodinâmicos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná - Faculdade de Engenharia Mecânica, Curitiba - Paraná, 2004.
- SILVA, K. R. da; FAGUNDES, F.; GALLI, C. T. *Catálogo Rolo PIM - Pedido SAMARCO nº 4500027973*. 2005.
- SKF. *Calculations*. 2008. Site: www.skf.com.
- SMITH, J. O. *Spectral Audio Signal Processing*. 2009. [Http://cerma.stanford.edu/jos/sasp/](http://cerma.stanford.edu/jos/sasp/).
- SOUZA, M. M. de et al. Transportadores de correia. 2010.
- SZOLC, T. et al. Damage identification in vibrating rotor-shaft systems by efficient sampling approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 23, p. 1615 – 1633, 2009.
- TIWARI, M.; GUPTA, K.; PRAKASH, O. Effect of radial internal clearance of a ball bearing on the dynamics of a balanced horizontal rotor. *Journal of Sound and Vibration*, v. 238, n. 5, 2000.

VANCE, J. M. Rotordynamics of turbomachinery. In: _____. 1. ed. New York: Wiley, 1988. cap. IV, p. 116–169.

VICENTE, S. A. V.; FUJIMOTO, R. Y.; PADOVESE, L. R. Rolling bearing fault diagnostic system using fuzzy logic. *The 10thIEEE International Conference on Fuzzy Logic*, v. 2, 2001.

VICENTE, S. A. V. et al. Automatic diagnosis of defects in bearings using fuzzy logic. *Anais do COBEM 2001*, 2001.

ZIO, E.; GOLLA, G. A neuro-fuzzy technique for fault diagnosis and its application to rotating machinery. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 94, n. 6, p. 78–88, 2009.