

**RODOLFO DE SOUSA SANTOS**

**DETECÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MÁQUINAS ROTATIVAS  
UTILIZANDO TÉCNICAS DE PROCESSAMENTOS DE SINAIS**

**RODOLFO DE SOUSA SANTOS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do  
Campus de Guaratinguetá, Universidade  
Estadual Paulista, para a obtenção do título de  
Doutor em Engenharia Mecânica na linha de  
pesquisa de Gestão e Otimização.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias

Santos, Rodolfo de Sousa  
S237d Detecção de falhas em rolamentos de máquinas rotativas  
utilizando técnicas de processamentos de sinais / Rodolfo de  
Sousa Santos – Guaratinguetá, 2017  
136 f. : il.  
Bibliografia: f. 126-130

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.  
Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias

1. Vibração. 2. Rolamentos. 3. Processamento de sinais.  
I. Título

CDU 534.1(043)

*RODOLFO DE SOUSA SANTOS*

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: PROJETOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

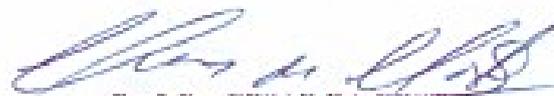
  
Prof. Dr. Ana Paula Rosafini Alves Claro  
Coordenadora

*BANCA EXAMINADORA:*

  
Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS  
Orientador / UNESP-FEG

  
Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. LUIS FERNANDO DE ALMEIDA  
UNIFAU

  
Prof. Dr. CESAR DA COSTA  
UNESP

  
Prof. Dr. CICERO DA ROCHA SOUTO  
UEPB

## **DADOS CURRICULARES**

### **RODOLFO DE SOUSA SANTOS**

<b>NASCIMENTO</b>	29-03-1965 – João Pessoa/ PB
<b>FILIAÇÃO</b>	José Antônio dos Santos Ruth de Sousa Santos
<b>1984 – 1996</b>	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica na Universidade Federal da Paraíba
<b>1997 - 1999</b>	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
<b>2013 - 2017</b>	Curso de Pós-Graduação em Engenharia, nível de Doutorado, linha de Gestão e Otimização, na Faculdade de Engenharia do <i>Campus</i> de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista (UNESP).

Aos meus pais, a minha esposa Geane Xavier, e os meus filhos, ofereço com muito amor e carinho, pelo apoio e paciência que tiveram nas muitas horas despendidas na elaboração desta tese, dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias, pela orientação, ensinamentos e sobretudo, pelo estímulo dado para a conclusão da redação desta tese.

Ao Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias, pela paciência e os valiosos ensinamentos na disciplina ferramentas de diagnóstico de máquinas, durante a vigência do curso.

Ao meu amigo e Dr. Rodolfo José Sabiá, pela valiosa contribuição na elaboração deste trabalho.

À minha esposa Geane Xavier da Silva, pelo grande incentivo na elaboração e conclusão desta tese.

Às minhas irmãs, Rosangela e Rejane, pelo grande incentivo na elaboração desta tese.

À CAPES, pelo apoio financeiro durante a vigência deste curso.

E aos demais, que de alguma forma contribuíram na elaboração desta tese.

E acima de tudo, a Deus, nosso criador, que é onipotente, onipresente e onisciente, o principal responsável pela minha vida e pela paz nos momentos em que me encontrei incapaz de prosseguir neste trabalho de tese.

“Sábio são aqueles que conhecem  
os limites da própria ignorância.”

“Sócrates”

## RESUMO

Os sinais de vibrações de máquinas rotativas conduzem a informações dinâmicas da máquina e esta análise é de grande importância no que diz respeito ao monitoramento de condição e diagnósticos de máquinas. Vários métodos de análises têm sido empregados no sentido de diagnosticar falhas em componentes de máquinas tais como engrenagens, rolamentos, dentre outros. Este trabalho apresenta uma análise sobre detecção de falhas em rolamentos de máquinas rotativas, e para esta apreciação utilizou-se os bancos de dados da CASE WESTERN RESERV UNIVERSITY e o banco de dados da FEG/UNESP. O objetivo principal deste trabalho foi a implementação de técnicas avançadas para identificar e caracterizar as falhas que são geradas em rolamentos, vislumbrando o aprimoramento da manutenção baseada na condição. Inicialmente, realizou-se a implementação e simulação no banco de dados da (CWRU), utilizando o *software* MATLAB e por meio da técnica de ressonância de alta frequência (HFRT), obteve-se resultados satisfatórios, entretanto esta metodologia é limitada uma vez que ela é empregada apenas para regime estacionário. A implementação da técnica HFRT não identificou em alguns casos as frequências para caracterização dos defeitos nas pistas dos rolamentos. Em seguida, utilizou-se a técnica *Short Time Fourier Transform*-STFT. A implementação proporcionou uma análise bem mais sensível aos impactos gerados nas pistas, pois, com a utilização da STFT, foi possível identificar as frequências características de defeitos. Para efeito de comparação optou-se por utilizar a técnica Wavelet combinada com a técnica do envelope. Esta análise foi aplicada usando a Wavelet Daubechies de ordem 4 (db4), em cuja implementação, realizou-se a decomposição do sinal de um rolamento com defeito e verificou-se qual destes apresentou o maior nível RMS e selecionou-se este sinal, pois o mesmo é o nível ideal para aplicação do método. Realizou-se a mesma apreciação ao banco de dados da FEG/UNESP. A análise realizada da técnica de Wavelet combinada com a técnica HFRT foi a que demonstrou melhor capacidade em relação às técnicas HFRT e STFT. Em seguida realizou-se a implementação da técnica de curtose espectral associada à técnica do envelope foi a que proporcionou os resultados mais precisos e satisfatórios, pois com a aplicação dessa metodologia foi possível a determinação de forma automática da região de ressonância e conseqüentemente uma melhora na caracterização das frequências de defeitos observadas nos rolamentos dos experimentos realizados em máquinas rotativas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Monitoramento de vibração, transformada de Wavelet, Diagnósticos de falhas, Condição de monitoramento, análise do envelope, Curtose Espectral.

## ABSTRACT

The vibration signals from rotating machines provide a set of dynamic information, which are very important for continuous condition monitoring of machinery. Several analytical methods have been employed in order to diagnose faults in machines components such as gears, bearings and others. This paper presents a fault detection analysis of rotating machinery bearings, using data from CASE WESTERN UNIVERSITY RESERVOIR and the FEG / UNESP database. The main objective of this work is the implementation of advanced techniques to identify and characterize bearing failures, with the purpose to improve maintenance under working conditions. At first, the implementation and simulation were done with data extracted from the database of (CWRU) using MATLAB software and high-frequency resonance technique (HFRT), which led to satisfactory results. However, this technique is limited since it is used only in a stationary regime. In some cases, the implementation of HFRT technique was not able to identify the defect frequencies of the bearing's races. Next the STFT Short-Time Fourier Transform technique was used. Its implementation provided a much more sensitive analysis of the impacts on the slopes; using STFT allowed to identify the characteristic defect frequencies. For comparison purposes, the wavelet technique combined with the envelope technique were used. This analysis was applied using Daubechies Wavelet of order 4 (DB4). In its implementation, a defective bearing signal was decomposed into various parts. The signal part with the highest RMS level was selected, because it provides best conditions for applying the method. Analogously, data from the FEG / UNESP database were treated. The Wavelet analysis technique combined with HFRT technique demonstrated better capability with respect to the HFRT and STFT techniques. The implementation of the spectral kurtosis technique associated with the envelope technique provided the most accurate and satisfactory results, since with the application of this methodology it was possible to determine the resonance region automatically. Consequently, this is an improvement regarding the characterization of the defect frequencies of the bearings observed in experiments with rotating machinery.

**KEYWORDS:** Vibration monitoring, Wavelet Transform, fault diagnostics, condition monitoring, envelope analysis, Spectral Kurtosis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Técnicas de extração de características baseadas em sinais de vibrações .....	31
Figura 2-Visão geral de diagnóstico de falhas com base em sinais de vibração .....	32
Figura 3 - Curva de Tendência de vibração da máquina .....	35
Figura 4 - Algoritmo da técnica HFRT (MOUMENE;OUELAA, 2016).....	38
Figura 5 - Etapas do Método de análise do envelope utilizando a transformada de Hilbert ....	38
Figura 6 - Procedimento de análise do envelope utilizando a transformada de Hilbert .....	39
Figura 7- Frequência dos elementos do rolamento (BEZERRA, 2004).....	40
Figura 8 - Características geométricas do rolamento .....	40
Figura 9 - Frequências nos elementos rolantes.....	41
Figura 10 - Velocidades nos elementos rolantes .....	41
Figura 11- Sinais típicos e sinais de envelope de falhas locais em mancais de rolamento .....	46
Figura 12 - Transformada de Fourier de Tempo curto STFT (ou Transformada de Gabor) ....	48
Figura 13 - Transformada por janelas de Fourier .....	48
Figura 14 - Transformada de Wavelet proporciona uma representação em tempo e escala ....	49
Figura 15 - Valor de um sinal senoidal em diferentes escalas.....	52
Figura 16 - Translação de uma Wavelet em k unidades.....	52
Figura 17- Decomposição principal da DWT .....	53
Figura 18 - Decomposição do Sinal com Downsampling .....	54
Figura 19 - Reconstrução do Sinal via coeficientes de Wavelet .....	55
Figura 20 - Cálculo do espectro Curtose para um sinal de falha simulada: (a) Sinal simulado do tempo; (b) STFT; e (c) Espectro curtose em função da frequência.....	58
Figura 21 - Diagrama das etapas necessárias para a obtenção do diagnóstico.....	59
Figura 22 - Diagrama da configuração experimental e Algoritmo.....	61
Figura 23 - (a) Bancada de teste do rolamento (b) Sistema Experimental.....	63
Figura 24 - Diagrama esquemático do sistema experimental.....	64
Figura 25 - Sinal de um rolamento sem defeito.....	70
Figura 26 - Espectro do Envelope de um rolamento sem defeito.....	70
Figura 27- Etapas para implementação da técnica do Envelope .....	71
Figura 28 - Sinal de um rolamento com defeito na pista interna.....	72
Figura 29 - Sinal de um rolamento com defeito na pista externa .....	73
Figura 30 - Sinal de um rolamento com defeito na esfera.....	74
Figura 31- Sinal no domínio do tempo de um rolamento sem defeito .....	76

Figura 32 - Característica do rolamento com defeito na pista interna.....	77
Figura 33 - Espectro de frequência de um rolamento com defeito na pista interna .....	78
Figura 34 - Espectrograma de um rolamento com defeito na pista interna.....	78
Figura 35 - STFT de um rolamento com defeito na pista interna.....	79
Figura 36 - Decomposição principal da DWT .....	80
Figura 37- Sinal no domínio do tempo de um rolamento sem defeito .....	81
Figura 38 - Sinal no domínio do tempo de um rolamento com defeito na pista interna .....	81
Figura 39 - Sinal no domínio do tempo de um rolamento com defeito na pista externa.....	82
Figura 40 - Decomposição de Wavelet do rolamento com falha na pista interna.....	82
Figura 41- Decomposição de Wavelet do rolamento com falha na pista externa .....	83
Figura 42 - Energia de distribuição (defeito na pista interna) .....	83
Figura 43 - Energia de distribuição (defeito na pista externa) .....	84
Figura 44 - Espectro de um rolamento com defeito na pista interna.....	85
Figura 45 - Espectro de um rolamento com defeito na pista externa .....	85
Figura 46 - Espectro do rolamento com defeito na pista interna.....	87
Figura 47 - Espectrograma do rolamento com defeito na pista interna.....	87
Figura 48 - STFT de um rolamento com defeito na pista interna.....	88
Figura 49 - Gráfico tridimensional do valor dos coeficientes calculados aplicando a CWT ...	89
Figura 50 - Espectrograma dos coeficientes calculados da CWT .....	89
Figura 51- Decomposição de Wavelet do rolamento com falha na pista interna (FEG).....	90
Figura 52 - Nível de energia do sinal do rolamento com defeito na pista interna (FEG).....	90
Figura 53 - Sinal do rolamento com defeito na pista interna (FEG) .....	91
Figura 54 - Espectro dos rolamentos sem falha e com falha na pista interna.....	93
Figura 55 - Diferença em dB dos espectros entre o rolamento bom e com defeito.....	94
Figura 56 - Kurtogram da amostra de dados .....	95
Figura 57 - (a) Sinal original, (b) Envelope do sinal filtrado, (c) Amplitude do espectro do envelope.....	96
Figura 58 - Kurtogram rápido do rolamento com defeito na pista externa .....	96
Figura 59 - Simulação de um rolamento com defeito na pista externa .....	97
Figura 60 - Kurtogram rápido do rolamento com defeito na esfera .....	98
Figura 61- Simulação de um rolamento com defeito na esfera .....	99
Figura 62 - Espectro do sinal do rolamento com defeito na pista externa.....	101
Figura 63 - Kurtogram do rolamento com defeito na pista externa DATA/FEG.....	101
Figura 64- Espectro do envelope do rolamento com defeito na externa .....	102

Figura 65- Kurtogram do rolamento com defeito na pista interna .....	103
Figura 66 - Espectro do sinal do rolamento com defeito na pista interna DATA/FEG .....	104
Figura 67- Kurtogram do rolamento com defeito nas esferas DATA/FEG .....	104
Figura 68 - Espectro do envelope do sinal nas esferas DATA/FEG .....	105
Figura 69 - Valor RMS do rolamento com falha na pista interna .....	107
Figura 70 - Valor de pico do rolamento com falha na pista interna .....	109
Figura 71 - Valor de pico e valor RMS do rolamento com defeito na pista interna. ....	110
Figura 72 - Fator de crista do rolamento com defeito na pista interna.....	111
Figura 73 - Curtose do rolamento com falha na pista interna .....	111
Figura 74 - Indicadores de vibração do rolamento com defeito na pista interna.....	113
Figura 75 - Valor RMS do rolamento com falha na esfera .....	114
Figura 76 - Valor de pico do rolamento com falha na esfera .....	115
Figura 77 - Fator de crista do rolamento com falha na esfera .....	115
Figura 78 - Valor de curtose do rolamento com falha na esfera.....	116
Figura 79 - Indicadores de vibração do rolamento com defeito na esfera.....	116
Figura 80 - Gráfico de frequência simulada e calculada para a pista interna.....	119
Figura 81- Gráfico de coeficiente de correlação para a pista interna .....	120
Figura 82 - Gráfico de frequência simulada e calculada para a esfera .....	121
Figura 83 - Gráfico de correlação para o rolamento com defeito na esfera .....	122

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características extraídas no domínio do tempo de um rolamento sem defeito.....	71
Quadro 2- Características extraídas no domínio do tempo de um rolamento com defeito na pista interna. ....	73
Quadro 3 - Características extraídas no domínio do tempo de um rolamento com defeito na pista externa.....	74
Quadro 4 - Características extraídas no domínio do tempo de um rolamento com defeito na esfera.....	75
Quadro 5 - Interpretação do coeficiente de correlação.....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Frequências características de defeito nos elementos dos rolamentos .....	45
Tabela 2- Detalhes do rolamento .....	64
Tabela 3 - Especificações do rolamento .....	64
Tabela 4 - Rolamento sem defeito .....	65
Tabela 5 - Especificação das falhas – em polegadas (CWRU, 2008) .....	65
Tabela 6 - Rolamento localizado o Drive end (12.000 amostras/segundo).....	66
Tabela 7- Rolamento localizado no Drive end. (48.000 amostras/segundo).....	67
Tabela 8 - Rolamento localizado na extremidade do ventilador (12.000 amostras/segundo)..	67
Tabela 9 - Características geométricas do mancal de rolamento NSK 6205.....	68
Tabela 10 - Frequência característica de defeito .....	69
Tabela 11 - Dados geométricos e frequências de defeitos.....	86
Tabela 12 - Informação do rolamento do acionamento (Drive End).....	93
Tabela 13 - Informação do rolamento do experimento DATA/FEG.....	100
Tabela 14 - Dados de falha do rolamento localizado no (Drive end) - Taxa de amostragem de 12K .....	106
Tabela 15 - Valores de severidade de vibração sugeridos na norma ISO 10816 .....	108
Tabela 16 - Parâmetros estatísticos de falha na pista interna do rolamento .....	112
Tabela 17 - Parâmetros estatísticos de falha na esfera do rolamento .....	113
Tabela 18 - Valores de frequências características de defeito da pista interna calculados e observados na simulação. ....	118
Tabela 19 - Valores de frequências características de defeito da esfera calculados e observados na simulação. ....	120

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AR	Auto Regressivo
CBM	Manutenção baseada condição
CWRU	Case Western Reserve University
CWT	Contínua Wavelet Transform
DWT	Discret Wavelet Transform
EMD	Empirical Model Decomposition
FFT	Transformada de Fourier
HFRT	Técnica de ressonância de alta frequência
HMMs	Hidden Markov models
MRA	Análise de Multiresolução
NBR	Norma Brasileira
PdM	Manutenção Preditiva
PSD	Densidade Espectral de Potência
RCFA	Análise da Causa Raiz da Falha
RMS	Valor RMS do sinal
SK	Spectral Kurtosis
STFT	Short-Time Fourier Transform
WVD	Wigner -Ville Distribution

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	parâmetro de escala
$b$	parâmetro de deslocamento
$\alpha$	Ângulo de contato
$D$	Diâmetro Pitch do rolamento
$d$	Diâmetro da esfera
$d_{pe}$	Diâmetro da pista Externa do rolamento
$d_{pi}$	Diâmetro da pista Interna do rolamento
$F_c$	Fator de Crista
$F_e$	Frequência da esfera
$F_g$	Frequência da gaiola
$f_{pi}$	Frequência da pista interna
$f_{pe}$	Frequência da pista externa
$f_r$	Frequência de rotação do eixo
$f(t)$	Sinal a ser decomposto
$H$	Filtro Passa-Alta
$L$	Filtro Passa- Baixa
$r_{pe}$	Raio da pista externa
$r_{pi}$	Raio da pista interna
$V_g$	Velocidade da gaiola
$V_{pe}$	Velocidade da pista interna
$V_{pi}$	Velocidade da pista interna
$\omega_{pe}$	Velocidade angular da pista externa
$\omega_{pi}$	Velocidade angular da pista interna

$\bar{x}$	Média do Sinal
$\Psi_{a,b}(t)$	Função base (Wavelet Mãe);
$C\Psi$	Constante que depende da função Wavelet ( $\Psi$ ) escolhida
$\psi(t - k)$	Translação da função de Wavelet

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	20
1.1 OBJETIVO GERAL.....	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	23
1.3 JUSTIFICATIVA .....	24
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	25
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	26
2.1 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO .....	26
<b>2.1.1 Manutenção Corretiva</b> .....	26
<b>2.1.2 Manutenção Preventiva</b> .....	27
<b>2.1.3 Manutenção Preditiva</b> .....	28
<b>2.1.4 Manutenção Proativa</b> .....	29
2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES .....	30
<b>2.2.1 Técnicas Estatísticas</b> .....	32
<b>2.2.2 Técnicas no domínio do tempo</b> .....	34
<b>2.2.3 Técnicas no domínio da frequência</b> .....	36
<b>2.2.4 Técnicas no domínio tempo-frequência</b> .....	39
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	59
3.1. MÉTODO PROPOSTO.....	60
3.2 ESTUDO DE CASOS .....	62
<b>3.2.1 Case Western Reserve University Bearings Data Center</b> .....	62
<b>3.2.2 Banco de dados da UNESP</b> .....	68
<b>4 ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	69
4.1 RESULTADOS SIMULADOS NO BANCO DE DADOS DA (CWRU) .....	76
4.2 SIMULAÇÃO REALIZADA NO BANCO DE DADOS DATA/FEG.....	86
4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CURTOSE ESPECTRAL NO BANCO DE DADOS DA CWRU .....	91
4.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO CURTOSE ESPECTRAL NO BANCO DE DADOS DA FEG/UNESP.....	100
4.5 ANÁLISE DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO BANCO DE DADOS DA CWRU .....	105
4.6 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA PRECISÃO DAS INFORMAÇÕES DO MODELO .....	117
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	123
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	125
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	126
<b>APÊNDICE - Programas Gerados Através do Matlab Programa</b> .....	131



## 1 INTRODUÇÃO

Os sinais de vibrações mecânicas que as máquinas rotativas emitem, são de fundamental importância para a avaliação da condição de máquina. No setor industrial, as máquinas rotativas possuem diversas aplicações, e um componente muito importante para o funcionamento destas máquinas é o rolamento. Cerca de 90% dos maquinários industriais possuem rolamentos. Um rolamento com falhas pode causar avaria nas máquinas, impossibilitando o seu funcionamento (XU; CHEN, 2013). Portanto, faz-se necessária a implementação de técnicas de processamentos de sinais para a identificação das falhas incipientes nestes componentes com o objetivo de aumentar a vida útil das máquinas.

Os mancais de rolamento são componentes críticos em vários campos de engenharia. Por isso, é de suma importância a detecção de possíveis falhas, especialmente em um estágio inicial, que podem levar a interrupções inesperadas de produção ou, pior, a acidentes graves (GEORGOULAS et al., 2015). A capacidade de detectar rapidamente, com precisão, a presença e gravidade de uma falha em uma instalação durante a operação é muito importante. Uma falha inesperada da máquina pode resultar em longos intervalos de tempos inaceitáveis de paradas para manutenção. Assim, devido à importância dos rolamentos, uma infinidade de métodos de monitoramento e procedimentos de diagnóstico de falhas tem sido desenvolvido, a fim de reduzir os custos de manutenção, melhorar a produtividade e evitar problemas de funcionamento e falhas durante a operação que poderia levar à paralisação da máquina (YIAKOPOULOS; GRYLLIAS; ANTONIADIS, 2011). A detecção de falhas por meio da análise de vibrações em componentes de máquinas como rolamentos tem sido um tema extensivamente estudado na engenharia.

Na indústria atual, existem basicamente três tipos de estratégias de manutenção: corretiva, preventiva e preditiva. A Estratégia corretiva, é uma manutenção tradicional na qual a máquina produz até que um defeito ocorra, forçando a sua parada e a realização de sua manutenção, isto é, a máquina produz até quebrar. Outro tipo de estratégia de manutenção é a preventiva, que requer uma base estatística. Essa estratégia é uma manutenção planejada baseada no tempo esperado de durabilidade de um componente de máquina a fim de se evitar a manutenção corretiva. Porém isso pode resultar na troca de um elemento de máquina antes do seu fim de vida útil. Uma das estratégias mais eficientes utilizada para identificar falhas incipientes é a manutenção preditiva, que se baseia na condição de operação e funcionamento do equipamento, visando determinar, por meio de instrumentos de medição, quando e como fazer uma intervenção na máquina. A manutenção preditiva diferencia-se da corretiva pelo fato

de que a intervenção no equipamento somente ocorrerá a partir do momento em que ele apresentar os sinais de falha, e não quando ocorre a quebra, implicando no aumento de custos de manutenção (horas de parada, mão-de-obra, falta de reposição, etc.). A estratégia de manutenção preditiva faz uso de vários métodos para avaliação da condição de máquina como: análise de vibrações, termografia, análise de óleo, ensaios não destrutivos, partículas magnéticas, ultrassom e emissão acústica. Isso permite, realizar uma avaliação segura das condições de funcionamento dos equipamentos, por meio de acompanhamento da evolução das falhas detectadas nos elementos de máquinas, sendo possível prever a quebra dos equipamentos. Com isso, pode-se garantir a operação até a execução de uma parada planejada. Existem várias técnicas de processamentos de sinais que podem ser utilizadas na análise para a caracterização de falhas em rolamentos.

As técnicas podem ser realizadas no domínio do tempo, no domínio da frequência, no domínio tempo-frequência e no domínio cíclico. Nas duas últimas décadas, o interesse em diagnósticos eficientes e robustos de mancais de rolamentos via abordagens em condições de monitoramento, bem como processamento de sinal tem tido um aumento extremamente elevado. Com o avanço tecnológico a busca por técnicas modernas na identificação de falhas em sistemas mecânicos tem aumentado. As técnicas modernas como Redes Neurais Artificiais (RNA), Lógica Fuzzy, Wavelet, Wigner Ville, têm sido implementadas com sucesso na identificação de falhas em rolamentos, engrenagens e outros elementos de máquinas (BOUZID et al., 2007; GHATE; DUDUL, 2009; SEERA et al., 2012; BOUDIAF et al., 2016).

Técnicas avançadas como Ciclo estacionários têm sido utilizadas para identificação de falhas em sistemas mecânicos. Estudos recentes indicam que a análise ciclo estacionária se apresenta como uma ferramenta robusta capaz de identificar a presença de sinais de falhas em elementos de máquina com bastante precisão. Ciclo estacionário pertence a nova técnica de processamento de sinal que está revolucionando o campo da análise de assinaturas mecânica. Resumidamente, ciclo estacionário é um sinal que exhibe alguma periodicidade escondida sobre seu fluxo de energia. Essa definição abrange uma ampla classe de sinais, tais como vibrações mecânicas ou medições acústicas. Isso ocorre em muitos sistemas mecânicos (ANTONI, 2009).

As vibrações em equipamentos rotativos são produzidas por uma combinação de sinais periódicos e aleatórios devido ao ciclo de rotação da máquina. A combinação de tais componentes pode dar origem a sinais que têm periodicidades estatísticas e são considerados como ciclo estacionários em que as propriedades estatísticas variam com o tempo. Na última década, a pesquisa de análise de sinal foi dominada por modelos que englobam não estacionaridade como uma característica importante. O ciclo estacionário é uma subclasse de

sinais não estacionários. Ciclo estacionário tornou-se um processo essencial para a representação de sinais de vibração e sinais acústicos produzidos por máquinas rotativas. No entanto, para ser aplicável a abordagem, requer que a velocidade de rotação da máquina seja constante, o que impõe um limite para diversas aplicações (NAPOLITANO, 2014). A teoria de ciclo estacionaridade tem sido usada em diversos campos da engenharia, tais como: telecomunicações, telemetria, radar, sonar, emissão acústica e recentemente em estudos de vibrações mecânicas, pois alguns parâmetros estatísticos variam periodicamente com o tempo.

Muitos métodos convencionais de processamento de sinais estatísticos tratam sinais aleatórios como se eles fossem estatisticamente estacionários, ou seja, como se os parâmetros dos mecanismos físicos subjacentes gerassem os sinais que não variam com o tempo. No entanto, isso não ocorre em muitos sistemas mecânicos. Uma técnica clássica de processamento de sinais muito utilizada na identificação de falhas em rolamentos é a *High Frequency Resonance Technique*, (HFRT) (MOUMENE; OUELAA, 2016). Este método é alternativamente conhecido como análise de ressonância demodulado ou análise de densidade de potência espectral envelope (RANDALL, 1987), uma vez que consiste em um filtro passa banda na faixa de frequência em torno da ressonância estrutural da máquina, que está excitada com a forças impulsiva de excitação periódica, gerados em rolamentos com defeitos localizados. Além disso, a demodulação desta banda gera um " envelope do sinal "que apresenta uma natureza impulsiva mais clara do que o próprio sinal, capaz de identificar e caracterizar a natureza do defeito. Essa técnica tem sido utilizada com muito sucesso em sistemas mecânicos, porém se torna limitada uma vez que ela considera a velocidade da máquina constante, fato este que impõe limite a sua aplicação. Em processos reais isto não ocorre, pois existem variações de cargas e velocidades. Nas últimas décadas, devido ao rápido crescimento do poder computacional, foram introduzidas novas técnicas de modelagem e simulação.

Atualmente, as indústrias mais modernas, dentro de seus programas de manutenção preditiva, utilizam o monitoramento de máquinas a partir da análise de vibração, a fim de estabelecer o bom estado do equipamento e, em particular, seus elementos mais críticos, tais como rolamentos, mancais, engrenagens, e desta forma, prevenir falhas catastróficas. A parada imprevista de algum equipamento da planta fabril pode causar prejuízo financeiro ou de natureza ambiental. As falhas em rolamentos são comuns em vários seguimentos industriais.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar um procedimento para monitoramento e análise de falhas em rolamentos que são utilizados nas máquinas rotativas, vislumbrando o aprimoramento da manutenção preditiva para setor industrial.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Discutir os principais mecanismos de falhas em mancais de rolamentos;
- Determinar procedimentos para auxílio na área de manutenção com base nas ferramentas de análise de vibrações em máquinas rotativas;
- Aplicar técnicas de análise de sinais como a técnica espectral e técnica do envelope para identificação da falha;
- Implementar técnicas avançadas de processamento de sinais como, “*Short-Time Fourier Transform Technique, STFT*”, Wavelet, Curtose espectral, para diagnosticar falhas em rolamentos.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A partir de sinais de vibrações, que são emitidos em máquinas rotativas, é possível realizar uma avaliação da condição de máquina, visto que 90% dos problemas encontrados nos maquinários da planta industrial são ocasionados devido às falhas em elementos de máquinas denominados rolamentos (XU; CHEN, 2013). Portanto, faz-se necessária a implementação de técnicas de processamento avançadas, com o objetivo de aumentar a vida útil dos equipamentos, minimizando o custo da produção e elevando o nível produtivo dos maquinários das indústrias e conseqüentemente teremos uma melhor qualidade do produto. A falta de uma manutenção preditiva, pode levar a custos desnecessários, quando ocorre a quebra prematura de uma máquina rotativa, bem como a interrupção inesperada de um processo. A fim de diminuir estes problemas, serão aplicadas técnicas que possam identificar os defeitos antes que comprometam a máquina como um todo, o que permitirá uma manutenção planejada e sem custos com substituições desnecessárias de componente de máquinas.

A tese em epígrafe tem objetivo de contribuir no aprimoramento das técnicas avançadas de processamento de sinais, desenvolvendo uma metodologia para determinar de forma automática a região ótima de ressonância que possui a maior impulsividade no domínio da frequência por meio da curtose espectral e Kurtogram rápido, o que torna mais sensível e eficaz a análise dos sinais de vibrações coletados em máquinas rotativas. Por meio da implementação dessa metodologia aplicada nas técnicas de processamento de sinais avançadas é possível verificar quais os elementos de máquinas devem ser substituídos e sendo assim, será possível programar reparos e trocas destes componentes de forma proativa no diagnóstico das condições do rolamento.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Presente trabalho se desenvolve em 5 capítulos, organizado conforme descrito.

O capítulo 1, faz uma abordagem sobre vibrações mecânicas em máquinas rotativas e técnicas aplicadas para detecção de falhas em mancais de rolamentos.

O capítulo 2, realiza-se uma revisão sobre as estratégias de manutenção e técnicas de análise de vibrações no domínio do tempo, no domínio da frequência e tempo-frequência. Realiza-se também um tratamento matemático para dedução de fórmulas das frequências características de defeitos nos elementos constituintes dos rolamentos.

O capítulo 3, faz-se uma descrição das metodologias propostas para a detecção de falhas em rolamentos e com o objetivo de caracterizar os sinais de vibrações em rolamentos utilizou-se os bancos de dados da CWRU e DATA/FEG.

O capítulo 4, apresenta a análise de resultados. Nessa análise, realiza-se a implementação dos métodos do envelope, STFT, Wavelet e curtose espectral. Por meio da aplicação dessas técnicas, observou-se que o método da curtose espectral combinada com o envelope, fornece uma maior precisão na caracterização dos defeitos em rolamentos que as técnicas Wavelet e STFT. Portanto, é um método mais robusto para a identificação das frequências características de defeitos dos rolamentos.

O capítulo 5, apresenta conclusões finais sobre as técnicas em estudo e algumas sugestões para futuros trabalhos que venham ser realizados com relação a detecção de falhas em rolamentos, com o objetivo da otimização da mesma, por meio de utilização de novas técnicas avançadas de processamento de sinais.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO**

Quando são utilizadas determinadas ações que visam evitar a degradação dos equipamentos pelo seu uso ou desgaste natural está se referindo à manutenção. Segundo Kardec e Nascif (2014), a manutenção pode ser definida como a garantia da disponibilidade da função dos equipamentos e instalações que visa atender a um processo de produção e a preservação do meio ambiente tendo como requisitos básicos a confiabilidade, segurança e custos adequados.

Os dois elementos fundamentais da abordagem da estratégia de manutenção são de que a gestão de manutenção é uma atividade vital, núcleo crucial para a sobrevivência e sucesso de uma empresa, e, como tal, deve ser gerida de forma estratégica. Em segundo lugar, a manutenção eficaz, precisa basear-se em modelos de negócios quantitativos que a integram com outras decisões, como a produção e operações.

A falta de manutenção dos equipamentos da produção pode causar inúmeros prejuízos para uma organização, tais como, aumento do custo do setor de produção, indisponibilidade dos equipamentos, paradas não programadas que podem prejudicar a qualidade do produto, insatisfação do cliente, dentre outros. Segundo Branco Filho (2008), por meio de um planejamento de manutenção adequado, no qual, um sistema de manutenção programada proporciona inúmeros benefícios para as organizações, pode-se obter índices significativos de disponibilidade do equipamento e, portanto, um processo produtivo maior, no qual a disponibilidade operacional torna-se um indicador da excelência da manutenção e da garantia de produtividade.

Existem vários tipos de manutenção sendo que suas formas de intervenções definem e classificam cada uma delas. A utilização de determinados procedimentos nos instrumentos de produção, está relacionada com algumas variações relevantes para a adaptação de cada organização.

#### **2.1.1 Manutenção Corretiva**

De acordo com Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em seu documento NBR 5462 a “manutenção corretiva é efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”. Nessa circunstância a manutenção corretiva é ação de uma tarefa de manutenção realizada para identificar, isolar e

corrigir uma falha de modo que, a máquina, ou o sistema que falhou pode ser restaurado a uma condição operacional dentro dos limites de tolerância ou limites estabelecidos em operações de serviço.

Esse tipo de manutenção pode ser de emergência, urgência ou programada, dependendo dos efeitos, e conseqüentemente, das necessidades de atendimento. Quando a intervenção é realizada apenas no momento em que o equipamento parar de funcionar, na busca da correção da falha podem ocorrer grandes prejuízos para produção. Então, a gestão de manutenção necessita de uma visão ampla do custo/benefício para utilização da manutenção corretiva.

O pesquisador Mobley (2004), relatou que mesmo algumas empresas, ao utilizarem este tipo de estratégia de manutenção, também adotam algumas atividades preventivas como a lubrificação e ajustes do maquinário. Porém, não são realizados outros tipos de reparos antes do equipamento parar de funcionar.

As principais despesas relacionadas a esse tipo de manutenção são: alto custo na reposição das peças, custos de valores relacionados às horas extras trabalhadas, tempo de inatividade e baixa disponibilidade na produção. O departamento de manutenção precisa prover um estoque de peças sobressalentes de reposição, no mínimo alguns componentes importantes para todo o equipamento crítico da planta, tendo, como alternativa, manter contato com os fornecedores de equipamentos para a entrega imediata de todas as peças de reposição necessárias, e, por conseguinte, o aumento substancialmente dos custos.

A manutenção corretiva dentro de uma planta é associada aos elevados custos, perda de produtividade e da qualidade do produto. Portanto, faz-se necessário a implementação de técnicas que possibilitem uma atuação mais eficaz e que reduza o custo associado à manutenção dos equipamentos da planta industrial.

### **2.1.2 Manutenção Preventiva**

A manutenção preventiva consiste num trabalho de prevenção de defeitos que podem dar origem às paradas inesperadas ou a um baixo rendimento dos equipamentos em operação. A prevenção é baseada em estudos estatísticos, ou condição do equipamento. A manutenção preventiva visa eliminar ou reduzir as possibilidades de falhas por manutenção (limpeza, lubrificação e substituição) das instalações em intervalos previamente planejados. Ela obedece um padrão previamente esquematizado, que estabelece paradas periódicas com a finalidade de permitir a troca de peças gastas por novas, assegurando, assim o funcionamento perfeito da máquina por um período predeterminado.

A manutenção preventiva ocorre antes da quebra da máquina. Sua função é evitar que haja uma parada não programada na produção devido a qualquer falha do equipamento. No entanto, para Nogueira, Guimarães e Silva (2012), existem dois tipos distintos de paradas dos equipamentos: a primeira é quando acontece a parada do maquinário antes do necessário para fazer a manutenção do mesmo; a segunda situação é julgar o período de reparo de maneira incorreta, podendo ocorrer falha do equipamento.

Os programas de manutenção preventiva são baseados por programações orientadas pelo tempo. Todos os programas de gestão de manutenção preventiva admitem que as máquinas serão degradadas dentro de um determinado tempo, típico da sua classificação em particular. A utilização deste tipo de manutenção varia muito e, os programas que a aplicam tornam-se extremamente limitados, consistindo em: agendar reparos, lubrificação, ajustes a máquina em processos de reconstruir todas as máquinas críticas da planta. Ao realizar uma análise dos custos da manutenção preventiva, foi identificado que os reparos feitos em uma máquina para reativá-la após sua falha são, normalmente, três vezes maiores do que os mesmos consertos realizados numa base programada (MOBLEY, 2004).

A manutenção preventiva, mesmo com ações que visam paradas programadas, não consegue prevenir tais fatos, tornando-se ineficaz, além do alto custo para as empresas com esse tipo de estratégia. Apesar de ser uma manutenção baseada no tempo de utilização, seus programas não são eficientes para algumas organizações.

### **2.1.3 Manutenção Preditiva**

A manutenção preditiva é uma estratégia de manutenção planejada em que se faz um acompanhamento de variáveis de determinados fenômenos como: temperatura, vibração, desgaste, entre outros, medidos por meio de equipamentos e componentes de máquinas. Quando os fenômenos apresentam valores próximos aos limites preestabelecidos, faz-se a intervenção no equipamento procurando corrigir as falhas causadoras da mudança de variável. Esse tipo de manutenção é baseado nas condições de operação e funcionamento dos equipamentos.

A manutenção baseada na condição (CBM) ou manutenção preditiva (PdM) pode ser melhor descrita como a manutenção praticada quando a necessidade surge. Isso é feito pela monitorização do estado da máquina/equipamento continuamente ou periodicamente, dependendo da necessidade e da disponibilidade da máquina. Esse tipo de manutenção permite o acompanhamento do equipamento por meio de medições realizadas quando o mesmo estiver

em pleno funcionamento e não se faz necessário ter que desmontar a máquina para identificar o defeito em um dos componentes.

A principal função da condição de monitoramento é fornecer conhecimento sobre a real condição de funcionamento da máquina em cada momento sem parar a linha de produção. Isso permite evitar as perdas de produção e melhora a disponibilidade e a segurança (TANDON; PAREY, 2006).

A (PdM) é um processo voltado para a detecção das condições de uma máquina que eventualmente, levem, as falhas e para a estimativa do tempo disponível, até que ocorra uma falha. Esse tipo de manutenção atua na condição ou desempenho do equipamento, por meio da avaliação destes maquinários com medição, acompanhamento ou monitoração de parâmetros.

Segundo Otani e Machado (2008), a técnica de manutenção preditiva possibilita algumas atuações e intervenções, permitindo o mínimo de interferência no processo de produção, pois a coleta de dados é realizada muitas vezes com o equipamento em funcionamento, além de permitir a análise de tendência. Um dos principais métodos da predição é a análise de vibração por meio de acompanhamento, utilizado geralmente em equipamentos rotativos (bombas, turbinas, redutores, ventiladores, compressores). O avanço constante no desenvolvimento de determinados instrumentos, sistemas de monitoração e *softwares* especialistas, possibilita o monitoramento de outras variáveis, acompanhadas simultaneamente, pelos instrumentos.

#### **2.1.4 Manutenção Proativa**

Para explicar os conceitos sobre manutenção foi utilizado o rolamento, elemento fundamental e comum em qualquer máquina. A manutenção corretiva acontecerá se realizar apenas a sua substituição após sua falha. Desta forma, deve-se levar em consideração uma parada inesperada de um equipamento da produção e o tempo de sua reposição, podendo ocorrer fatores inesperados como: falha do rolamento, indisponibilidade dos técnicos de manutenção, entre outros. A manutenção preventiva ocorreria caso se programasse um período de operação por meio de análise dos registros de falhas destes rolamentos, determinando-se o período de substituição do mesmo.

Nessa perspectiva, a manutenção preventiva em relação à manutenção corretiva promoveria uma redução de custo e tempo, porém na substituição do rolamento poderia ocorrer uma margem de segurança exagerada, ocasionando a substituição do rolamento antes do fim da sua vida útil. Sendo assim, surge a técnica de manutenção preditiva que realizaria uma análise baseada na condição de máquina por meios de inspeções instrumentadas, medições e

elaborações de gráficos visando identificar o melhor tempo de substituição do rolamento, contribuindo para um ganho significativo no prolongamento da utilização do mesmo. Neste sentido, aparece a manutenção proativa com o intuito de eliminar a necessidade de substituição do rolamento, por meio da utilização de alguns componentes como os lubrificantes adequados e um sistema de filtragem do óleo, para possibilitar a eliminação ao máximo de todas as partículas de atrito. Esta técnica não busca a substituição do rolamento mais a identificação da causa que induz a sua falha na tentativa de removê-las. Esse rastreamento da causa raiz da falha proporciona a tomada de decisões proativas que favorecem a não ocorrência dessa falha. Diferenciando das demais técnicas, esse tipo de estratégia de manutenção utiliza a prevenção em conjunto com a causa raiz da falha (RCFA), detectando e apontando os problemas que causam defeito, podendo surgir a necessidade da reformulação ou alteração de equipamentos para evitar a ocorrência de tais problemas, sendo observada a utilização de técnicas de instalação e reparo adequada para serem adotadas e aplicadas.

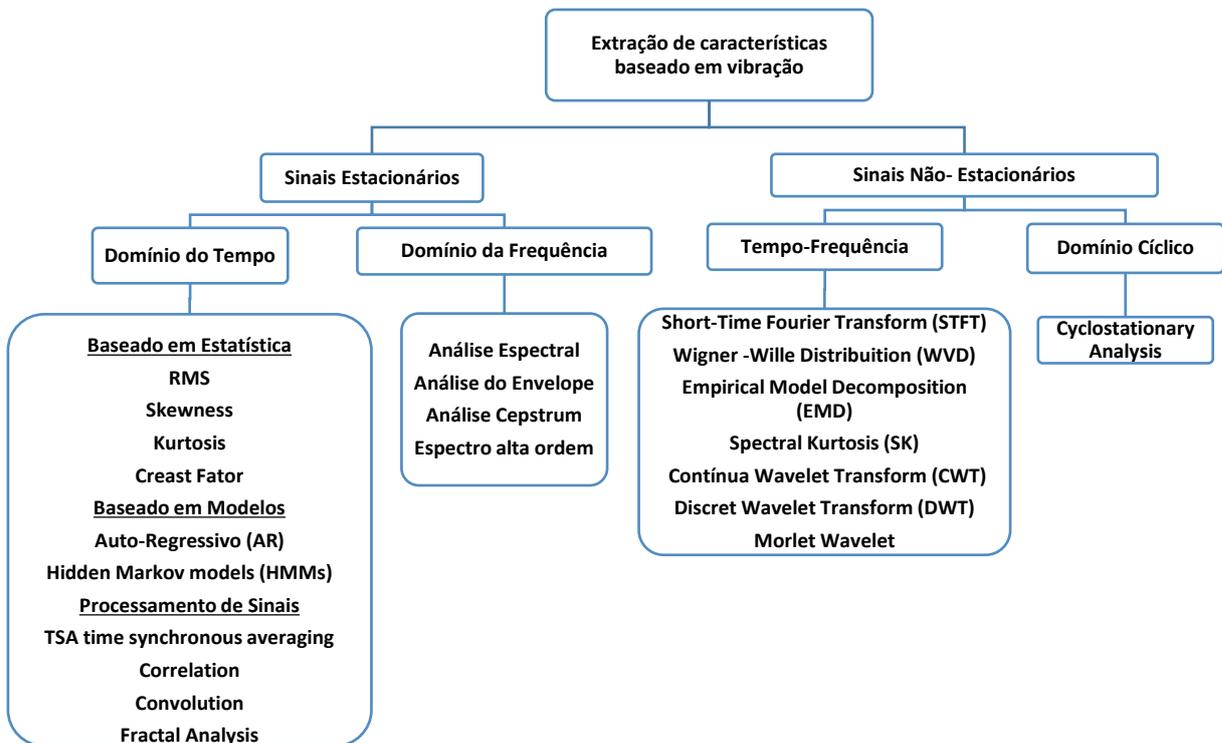
## 2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Existem várias técnicas de análise de vibrações utilizadas para avaliação das condições de monitoramento de máquinas. Técnicas eficazes e eficientes de extração de características são fundamentais de forma fiável para o diagnóstico de falhas em máquinas rotativas. Vários métodos de extração de sinais de vibração têm sido propostos para diferentes tipos de máquinas rotativas, durante as últimas décadas. No entanto, restrita investigação foi conduzida sobre a síntese e a análise destas técnicas, resultando em apreensão quando os técnicos precisam escolher uma técnica adequada para a aplicação. Embora uma variedade de abordagens possam ser utilizadas em aplicações de monitorar o estado do equipamento, a análise de vibração é a técnica mais utilizada para determinar o estado mecânico da máquina e a suas partes desde os últimos 50 anos (DUBE; DHAMANDE; KULKARNI, 2013). Os sinais de vibrações coletados de rolamentos transportam uma rica informação sobre as condições do estado da máquina. Portanto, os métodos baseados em sinais de vibração receberam estudo intensivo durante as últimas décadas. É possível obter informações características fundamentais dos sinais de vibrações através da utilização de técnicas de processamento de sinal (LEI; HE; ZI; HU, 2007). Diversos autores classificam a análise de sinais de vibração de rolamentos em três abordagens: análise no domínio do tempo, no domínio da frequência e no domínio do tempo-frequência (CASTEJON; LARA; GARCIA-PRADA, 2010; ALMEIDA, 2011). 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 (CASTEJON; LARA; GARCIA-PRADA, 2010). Finalmente, no domínio do tempo-frequência, uma técnica bastante utilizada é a Transformada de Wavelet, especialmente para sinais com características não estacionárias (CASTEJON et al., 2010).

As técnicas eficazes de extração de característica são muito críticas para o sucesso de diagnóstico de falhas (YANG; MATHEW; MA, 2003). A Figura 1, mostra um resumo das técnicas utilizadas para extração de características baseadas em sinais de vibrações.

Figura 1-Técnicas de extração de características baseadas em sinais de vibrações



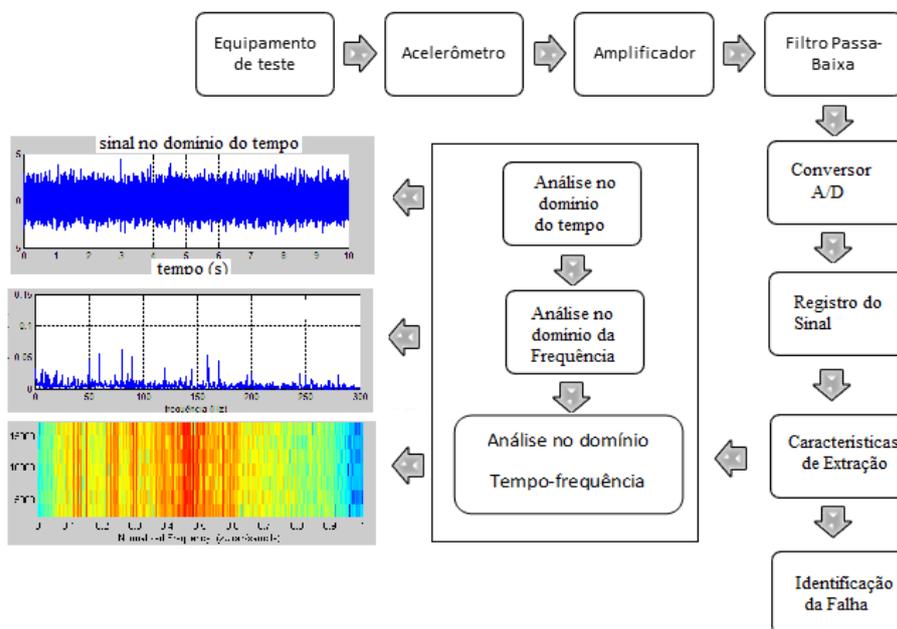
Fonte: Autoria própria

Em condições normais de operação, os mancais de rolamento sempre geram algum grau de vibração e ruído, embora a um nível muito baixo para um rolamento devidamente instalado em boas condições. Fontes de vibração incluem movimento imperfeito dos rolamentos durante a rotação, emissão acústica e vibração externa transmitidos por meio dos rolamentos (RAI, AKHAND; UPADHYAY, S. H., 2016). O movimento que não é perfeitamente regular é a

principal fonte de vibração do rolamento. As causas das irregularidades podem ser rotuladas em áreas de fabricação, aplicação e operação, e deterioração do serviço.

As máquinas rotativas são amplamente utilizadas nas indústrias e algumas delas são complexas, e muitas vezes extremamente exigentes nos critérios de desempenho. As falhas que ocorrem nas máquinas podem ser catastróficas resultando em tempo de inatividade e um custo relativamente alto. Quando não se aplica um diagnóstico eficaz, é impossível de fazer uma previsão confiável da falha. Portanto, a realização eficaz do diagnóstico de falha é desejável e imprescindível na indústria. Contudo, diagnóstico de falhas em máquinas rotativas é muitas vezes uma prática demorada e de trabalho intensivo. Isto torna a previsão da falha eficaz e eficiente no diagnóstico um desafio para os técnicos e mantenedores de plantas industriais. O diagnóstico de falha é realizado, normalmente, nas seguintes fases: aquisição de dados, extração de características, e detecção de falhas e identificação, como mostrado na Figura 2. As técnicas de extração de característica eficazes são muito decisivas para o sucesso do diagnóstico de falhas (YANG et al., 2003).

Figura 2-Visão geral de diagnóstico de falhas com base em sinais de vibração



Fonte: Adaptado (YANG et al., 2003)

### 2.2.1 Técnicas Estatísticas

Com as técnicas estatísticas obtêm-se características globais do sinal, perdendo-se a dependência temporal e da frequência.

Os sinais de vibrações podem ser avaliados por medidas estatísticas como o nível RMS, valor de pico, da média, fator de crista e curtose, que são expressas pelas seguintes equações:

- **Valor de pico** do sinal é simplesmente definido como metade da diferença entre o máximo e mínimo níveis de vibração.

$$pico = \frac{1}{2} [\max(x(t)) - \min(x(t))] \quad (3.1)$$

O valor de pico, é um parâmetro útil para identificar eventos de curta duração, como choques de curta duração.

- **Valor RMS** (*Root Mean Square*) do sinal normalizado é o segundo momento estatístico do sinal (desvio padrão) e mede a energia do sinal de vibração.

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

Onde T é o período do sinal no tempo usado para o cálculo do RMS e  $\bar{x}$  é o valor médio do sinal dado por:

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (3.3)$$

Para sinais discretos (amostra), o valor RMS do sinal é definido como:

$$RMS = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - \bar{x})^2} \quad (3.4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \quad (3.5)$$

O valor RMS de sinal é usado para descrever o "estado estacionário" ou amplitude "contínua" de um sinal de tempo variável.

- **Fator de Crista (Fc)** é definido como a razão entre o valor de pico e valor RMS do sinal, descrito pela seguinte equação:

$$Fc = \frac{\text{pico}}{RMS} \quad (3.6)$$

O fator de crista é frequentemente utilizado como uma medida de natureza impulsiva do sinal. Ele irá aumentar na presença de impulsos discretos que são maiores em amplitude que o sinal de base, mas que não ocorrem com uma frequência suficiente para majorar significativamente o nível RMS do sinal.

- **Curtose** é o momento estatístico de quarta ordem normalizado do sinal. Para sinais contínuos no tempo é definida como:

$$\text{Curtose} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \bar{x})^4}{(RMS)^4} \quad (3.7)$$

Para sinais discretos a curtose é definida como:

$$\text{Curtose} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x(t) - \bar{x})^4}{(RMS)^4} \quad (3.8)$$

O nível de curtose de um sinal é usado de forma semelhante à do fator de crista, isto é, proporcional à medida da natureza impulsiva do sinal. Aumentando o sinal à quarta potência, efetivamente amplifica picos isolados no sinal. Para um rolamento sem defeitos com uma distribuição gaussiana, o valor do coeficiente de curtose é próximo a 3. Um valor superior ao citado é considerado como uma indicação de uma falha iminente. Entretanto, percebe-se que esse valor se reduz à medida que o defeito atinge estágios avançados, o que caracteriza uma desvantagem para confiabilidade de diagnósticos feitos a partir de sua utilização. Alguns estudos apontam ineficiências na detecção de falhas incipientes. Logo, esse método não se tornou popular na indústria para o monitoramento de mancais de rolamento.

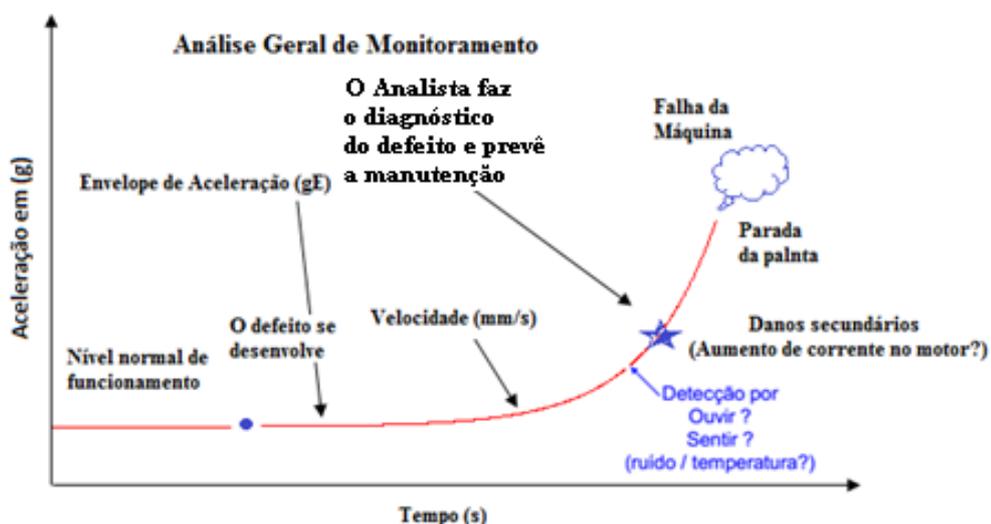
### 2.2.2 Técnicas no domínio do tempo

A análise da forma de onda da vibração no domínio do tempo é uma das técnicas úteis para realizar a detecção de defeitos em rolamentos. Essa análise da forma de onda pode revelar detalhes importantes das vibrações que não são visíveis no espectro da frequência, porém, a análise no domínio do tempo não é capaz de mostrar a localização do defeito no rolamento. A

principal aplicação desta análise é na identificação de ocorrência de fenômeno que possuem curta duração, como os impactos e determinação da taxa de repetição. Por meio de alguns parâmetros de monitoramento é possível identificar se um rolamento apresenta defeito ou não. Um dos parâmetros importantes para avaliar a condição de estado do rolamento é o valor RMS (*Root Mean Square*) do sinal. Esse nível global constitui um primeiro indicador da severidade de vibração e qualifica a energia de vibração global do sinal. O valor RMS de um sinal é calculado a partir do sinal temporal. 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 ; RANDALL, 2008).

O valor eficaz ou RMS é relacionado ao nível de energia ou potência de um dado sinal. A 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 (MESQUITA; SANTIAGO; BEZERRA, 2002). Com a progressão da falha o valor RMS tende a aumentar, pois, o número de picos no sinal cresce. Desta forma é possível utilizar níveis de alarme para manutenção. O monitoramento do equipamento por meio do valor RMS deve sempre considerar dados históricos para permitir uma avaliação dos pontos de parada e alarme. Conforme ilustrado na Figura 3, a curva de tendência apresenta a distribuição dos valores globais de vibração. Deve-se sempre estar atento às mudanças bruscas que ocorrem nesta curva, pois, essas mudanças indicam sempre anomalias que estão a ocorrer.

Figura 3 - Curva de Tendência de vibração da máquina



## **2.2.3 Técnicas no domínio da frequência**

### **2.2.3.1 Análise Espectral**

Análise espectral (ou frequência) é um termo usado para descrever a análise do sinal no domínio da frequência. A análise espectral é uma técnica já consagrada na análise de vibração em sistemas de transmissão de engrenagens e rolamentos. Essa técnica provou ser uma ferramenta valiosa para a detecção e diagnóstico de falhas em máquinas rotativas. O processo fundamental comum das técnicas de análise espectral é a conversão de uma representação no domínio de tempo do sinal de vibração numa representação no domínio da frequência. Isto pode ser conseguido pelo uso de filtros de banda estreita ou, mais frequentemente nos últimos anos, usando a transformada de Fourier discreta (DFT) de dados digitalizados, isto é, decompondo um sinal periódico qualquer em componentes mais simples.

Uma desvantagem desse tipo de análise é que só pode ser aplicada quando o sinal é estacionário, motivo este que limita a sua aplicação. Portanto, faz-se necessário o uso de técnicas avançadas para suprir essa deficiência. Fenômenos de caráter não estacionário e impulsos transientes estão presentes em sinais de vibrações de máquinas rotativas e fornecem informações importantes sobre o seu estado de funcionamento, o que indica a presença de falhas incipientes.

### **2.2.3.2 Técnica do Envelope**

A detecção por envelope ou técnica de ressonância de alta frequência (HFRT) é uma técnica importante no processamento de sinais, que tem o objetivo de identificar defeitos em rolamentos, por meio da extração de características das frequências de defeitos do sinal de vibração do rolamento defeituoso. Na prática, o sinal é filtrado pelo filtro passa banda ao redor de uma das frequências de ressonância, eliminando assim muitos sinais de vibração indesejados vindos de outras fontes. Este sinal filtrado é então demodulado por um detector de envelope que o retifica o envelope, para se obter as frequências do sinal de defeito, analisando-se, a seguir, as condições do rolamento (TANDON; CHOUDHURY, 2000). O essencial para a HFRT é o entendimento de que cada vez que um defeito em um elemento do rolamento faz o contato sob carga com outra superfície do rolamento, um impulso de vibração é gerado. Esse impulso é extremamente de curta duração em comparação com o intervalo entre os impulsos, e assim a sua energia é distribuída em um nível muito baixo ao longo de uma larga faixa de

frequências, e esta ampla distribuição de energia faz com que seja dificultado a identificação de defeitos por meio de análise convencional na presença de vibrações de engrenagens e de outros elementos de máquinas.

Felizmente, o impacto normalmente excita uma ressonância no sistema a uma frequência muito mais elevada do que a vibração gerada pelos outros elementos da máquina com consequência de que uma parte da energia está concentrada numa banda estreita, que é mais facilmente detectado do que a amplamente na energia distribuída. A ressonância pode ser ocasionada pelo efeito da vibração entre o elemento rolante e as pistas internas e externas, as vibrações das próprias pistas sobre o eixo, a vibração da carcaça ou estrutura da máquina, vibração de um transdutor (MCFADDEN; SMITH, 1984).

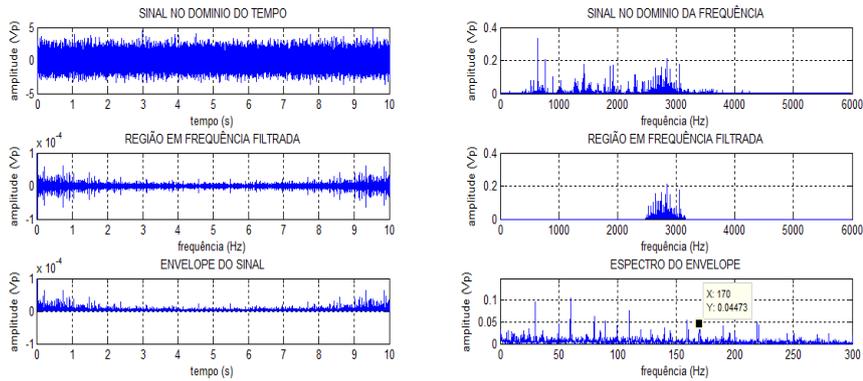
À medida que as técnicas digitais, especialmente a transformada de Hilbert, foram introduzidas, a análise do envelope tornou-se popular para o diagnóstico de falhas de rolamento nos últimos anos (PENG, 2014). Uma vez que os sinais de ressonância gerados por falhas de rolamento geralmente são concentrados em uma faixa de frequência, localizar essa faixa pode conduzir a identificação de uma falha de rolamento. A análise do envelope isola uma banda de frequência de ressonância, excluindo a maioria das vibrações gerado por outras partes de uma máquina e, em seguida, desmodula o sinal isolado para obter o sinal do envelope. O aparecimento de linhas espectrais nas frequências características do rolamento indica a presença e a localização de uma falha no rolamento (AMIRAT et al., 2011).

### **3.2.3 Algoritmo para a implementação de técnica HFRT**

A técnica do envelope pode ser implementada por meio de vários procedimentos no qual será realizada uma descrição.

Segundo Brito, Pereira e Brito (2012), a análise de Envelope é uma técnica de sinais que consiste, basicamente, em evidenciar a repetição de um pulso dentro de um intervalo de tempo. Para rolamentos, a função da técnica de envelope é identificar a frequência de repetição dos pulsos, causados pelos sucessivos impactos gerados pela passagem de um elemento rolante sobre um defeito. Na técnica de envelope, há uma formulação complexa, que se resume nos passos descritos a seguir e apresentado, de forma simplificada na Figura 4.

Figura 4- Algoritmo da técnica HFRT (MOUMENE; OUELAA, 2016)



Fonte: Autoria própria

Para a implementação da técnica HFRT, deve-se seguir os seguintes passos:

- 1- Inicialmente, aplica-se a transformada de Fourier ao sinal coletado. A partir da resposta no domínio da frequência pode-se definir a faixa de frequências com intuito de se determinar a faixa de filtragem, isto é, qual a região foi mais excitada pela falha;
- 2- Aplica-se o filtro passa banda. O objetivo desse filtro é eliminar as frequências indesejáveis, como por exemplo, as baixas frequências de alta amplitude que em geral estão associadas ao desalinhamento e desbalanceamento;
- 3- Aplica-se o Filtro Passa Alta para eliminação da componente DC;
- 4- Aplica-se a transformada de Hilbert para obtenção do envelope do sinal do defeito. Essa transformada é responsável por evidenciar quantas vezes o pulso se repetiu num segundo, ou seja, ela diz qual é a frequência característica de defeito do rolamento;
- 5- Com o sinal no tempo, aplica-se novamente a Transformada de Fourier ao envelope do sinal para obtenção das frequências características do defeito.

A extração do envelope do sinal utilizando-se a Transformada de Hilbert segue a sequência descrita na Figura 5.

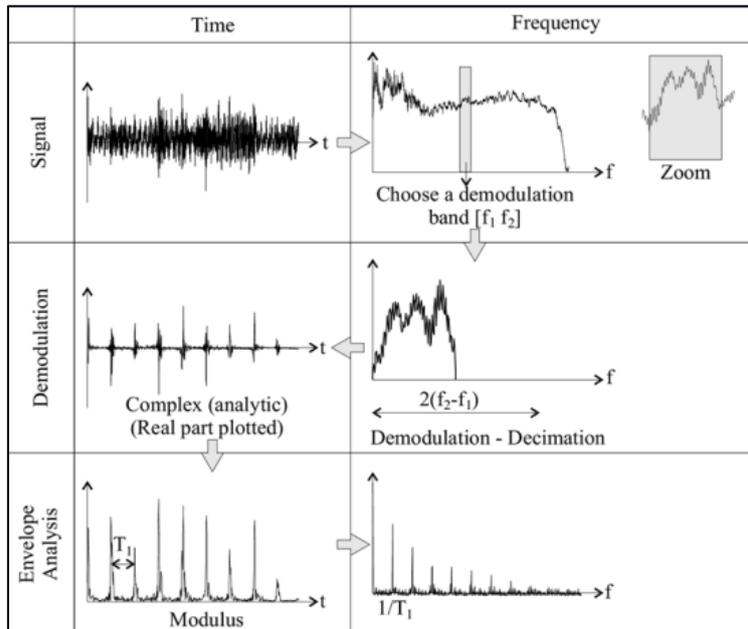
Figura 5- Etapas do Método de análise do envelope utilizando a transformada de Hilbert



Fonte: Autoria própria

A Figura 6, ilustra as etapas para aplicação da transformada de Hilbert (OSMAN; WANG, 2016).

Figura 6 - Procedimento de análise do envelope utilizando a transformada de Hilbert



Fonte: ( RANDALL, 2011)

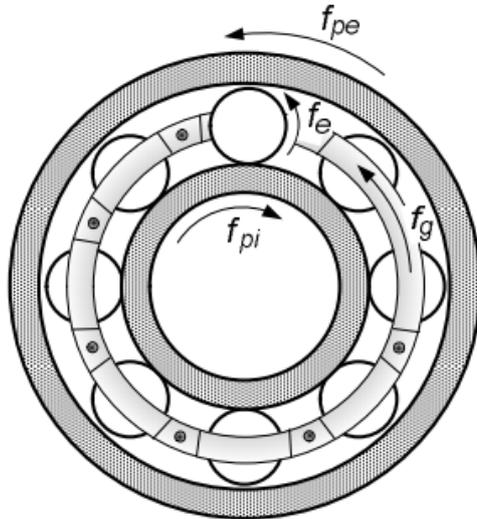
## 2.2.4 Técnicas no domínio tempo-frequência

### 2.2.4.1 Frequências características de defeito nos rolamentos

Dependendo da localização do defeito no rolamento, geram-se vibrações de diferentes frequências. Quando uma área defeituosa faz contato com a sua superfície, produzem-se pulsos periódicos de curta duração. Os períodos com que se produzem tais pulsos são em função da geometria do rolamento, da velocidade de rotação e da localização do defeito (HARRIS, 2001).

Assim como outros componentes num equipamento, os rolamentos quando estão com defeitos apresentam frequências características, em função da localização do defeito. Defeitos em rolamentos podem ser prognosticados através da medição de vibração e pelo monitoramento da presença das frequências de defeitos e os seus múltiplos, portanto na detecção da falha não deverá levar em conta apenas a amplitude. As frequências de defeito são calculadas levando em consideração as características construtivas dos rolamentos. A Figura 7, apresenta as frequências características de defeito da pista externa, pista interna, esfera e gaiola.

Figura 7- Frequência dos elementos do rolamento (BEZERRA, 2004)



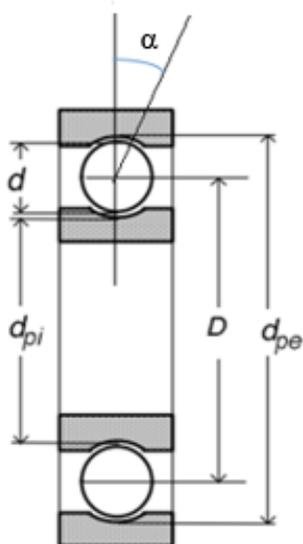
Fonte: (BEZERRA,2004)

Onde:

$f_{pi}$  = frequência da pista interna  
 $f_{pe}$  = frequência da pista externa  
 $f_e$  = frequência da esfera  
 $f_g$  = frequência da gaiola

A Figura 8, mostra as dimensões que serão utilizadas nos cálculos das frequências características dos rolamentos.

Figura 8 - Características geométricas do rolamento



Fonte: Adaptado (BEZERRA,2004)

Onde :

$D$  = Diâmetro Pitch do rolamento

$d_{pi}$  = Diâmetro da pista interna do rolamento

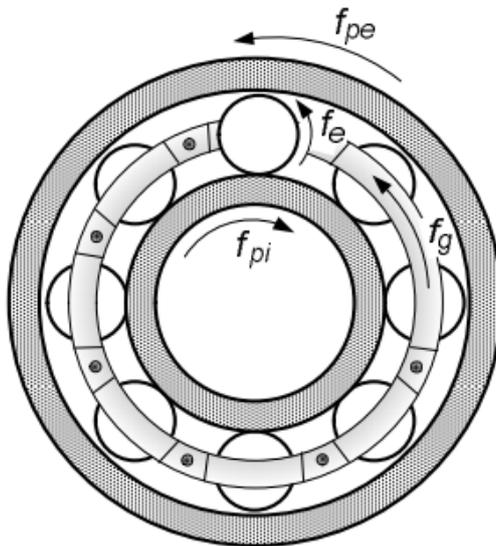
$d_{pe}$  = Diâmetro da pista Externa do rolamento

$d$  = Diâmetro da esfera

$\alpha$  = Ângulo de contato

A Figura 9, mostra as frequências das pistas dos elementos do rolamento

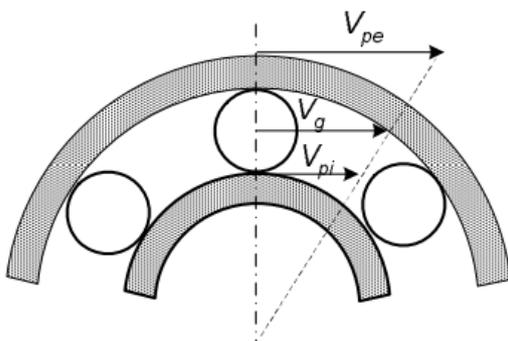
Figura 9- Frequências nos elementos rolantes



Fonte: (BEZERRA, 2004)

A Figura 10, apresenta relações entre as velocidades de rotação dos elementos rolantes, e podem ser obtidas a partir das velocidades tangenciais dos elementos.

Figura 10 -Velocidades nos elementos rolantes



Fonte: (BEZERRA, 2004)

Onde:

$V_{pi}$  = Velocidade da pista interna

$\omega_{pi}$  = Velocidade angular da pista interna

$V_{pe}$  = Velocidade da pista externa

$\omega_{pe}$  = Velocidade angular da pista externa

$V_g$  = Velocidade da gaiola

$\omega_g$  = Velocidade angular da gaiola

$r_{pi}$  = raio da pista interna =  $(\frac{d_{pi}}{2})$

$r_{pe}$  = raio da pista externa =  $(\frac{d_{pe}}{2})$

Assumindo que o rolamento tem um ângulo de contato constante, então os diâmetros da pista podem ser expressos em termos do diâmetro do círculo primitivo.

$$d_{pi} = D - d \cos(\alpha) \quad (3.9)$$

$$d_{pe} = D + d \cos(\alpha) \quad (3.10)$$

As velocidades circunferenciais dos elementos de apoio podem ser expressas em termos da velocidade angular. Portanto, tem-se:

$$V_{pi} = \omega_{pi} \frac{d_{pi}}{2} \quad (3.11)$$

$$V_{pe} = \omega_{pe} \frac{d_{pe}}{2} \quad (3.12)$$

A velocidade de gaiola, que é também a velocidade média, é dada pela seguinte expressão:

$$V_g = \frac{V_{pi} + V_{pe}}{2} \quad (3.13)$$

Substituição  $V_{pi}$  e  $V_{pe}$  das equações (3.11) e (3.12) em (3.13), tem-se:

$$V_g = \frac{\omega_{pi}(D - d \cos(\alpha))}{4} + \frac{\omega_{pe}(D + d \cos(\alpha))}{4} \quad (3.14)$$

Convertendo as velocidades em frequências da equação (3.14), utilizando  $V_g = f_g \pi D$ ,  $\omega_{pi} = 2\pi f_{pi}$  e  $\omega_{pe} = 2\pi f_{pe}$

$$f_g \pi D = \frac{2\pi f_{pi}(D - d \cos(\alpha))}{4} + \frac{2\pi f_{pe}(D + d \cos(\alpha))}{4} \quad (3.15)$$

Simplificando a equação (3.15), encontra-se:

$$f_g = \frac{f_{pi}(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha))}{2} + \frac{f_{pe}(1 + \frac{d}{D} \cos(\alpha))}{2} \quad (3.16)$$

A equação (3.16), representa a frequência fundamental teórica da gaiola do elemento rolamento.

#### 2.2.4.2 Frequência característica de defeito na pista interna

A frequência com que a esfera passa pelo defeito na pista interna é obtida a partir da frequência relativa da gaiola e pista interna multiplicada pelo número de esferas Z. Ou seja:

$$f_{dpi} = Z |f_g - f_{pi}| \quad (3.17)$$

Substituindo a equação (3.16) na equação (3.17), obtém-se:

$$f_{dpi} = Z \left| \frac{f_{pi} \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right)}{2} + \frac{f_{pe} \left(1 + \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right)}{2} - f_{pi} \right| \quad (3.18)$$

$$f_{dpi} = \frac{Z}{2} \left| \frac{D(f_{pi} - f_{pe}) + (f_{pi} - f_{pe})d \cos \alpha}{D} \right| \quad (3.19)$$

Fazendo um tratamento matemático na equação (3.19), obtém-se:

$$f_{dpi} = \frac{Z}{2D} |f_{pi} - f_{pe}| [D + d \cos \alpha] \quad (3.20)$$

#### 2.2.4.3 Frequência característica de defeito na pista externa

Para obtenção da frequência de defeito da pista externa foi adotado o mesmo raciocínio usado na obtenção da frequência de defeito na pista interna, ou seja:

$$f_{dpe} = Z |f_g - f_{pe}| \quad (3.21)$$

Após substituições da Equação (3.16) na Equação (3.21) e fazendo os rearranjos necessários, obtém-se:

$$f_{dpe} = \frac{Z}{2D} |f_{pi} - f_{pe}| [D - d \cos \alpha] \quad (3.22)$$

A frequência de rotação da esfera demonstrada aqui está sob suposição de que não há nenhum escorregamento do contato da mesma com as pistas do rolamento.

Têm-se as seguintes relações para a frequência da esfera:

$$f_{de} D = f_{pi} d_{pi} = f_{pe} d_{pe} \quad (3.23)$$

$$f_{de} = \frac{(f_{pi} - f_{pe})(d_{pi} - d_{pe})}{D} \quad (3.24)$$

Substituindo as equações (3.9) e (3.10) em (3.24), e realizando um tratamento matemático, obtém-se:

$$f_{de} = \frac{D}{2d} (f_{pi} - f_{pe}) \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right] \quad (3.25)$$

Na maioria dos casos, a pista externa do rolamento é estacionária. Isso leva a equações listadas na Tabela 1, denominadas de equações frequência características de defeitos em rolamentos ( RANDALL, 2011).

Tabela 1- Frequências características de defeito nos elementos dos rolamentos

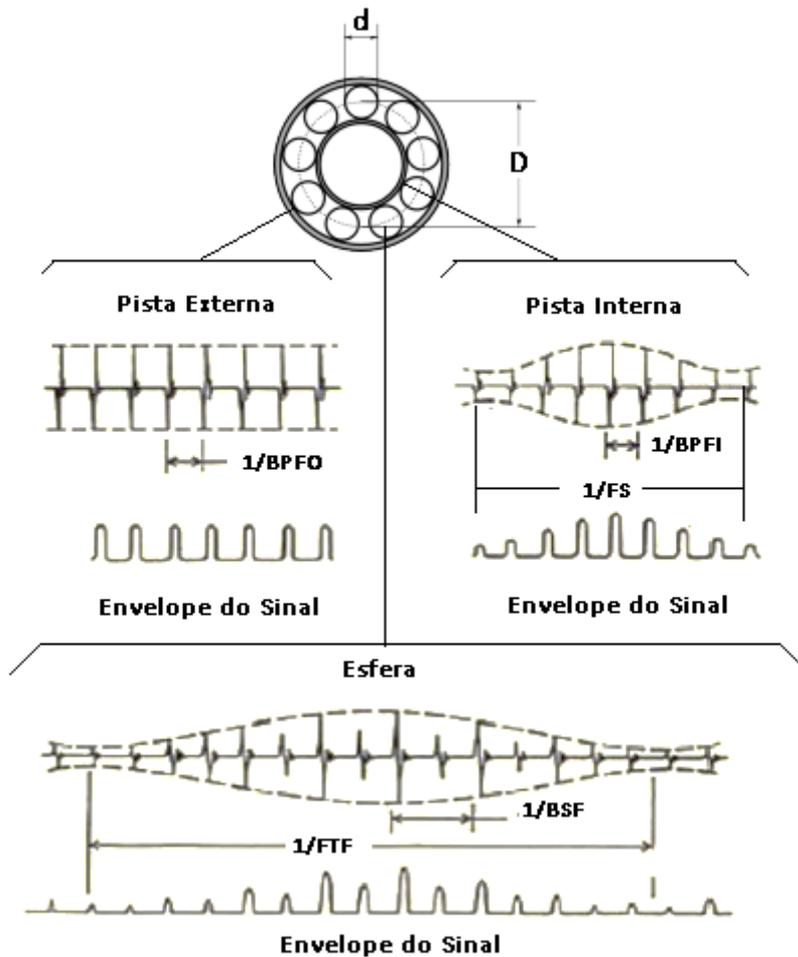
<b>Frequências</b>	<b>Equações de Frequência</b>
<i>Frequência de Defeito na Pista Interna</i>	$f_{dpi} = \frac{Zf_r}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right)$
<i>Frequência de Defeito na Pista Externa</i>	$f_{dpe} = \frac{Zf_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right)$
<i>Frequência da Gaiola</i>	$f_g = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right)$
<i>Frequência de Defeito na Esfera</i>	$f_{de} = \frac{Df_r}{2d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos(\alpha)\right)^2\right]$

Fonte: ( RANDALL, 2011)

Onde:

$f_r$  é a velocidade do eixo,  $Z$  é o número de elementos rolantes e  $\alpha$  é o ângulo de contato a partir do plano radial. Note que a frequência de defeito na esfera ( $f_{de}$ ) é a frequência com que a falha atinge a mesma pista (interna ou externa), de modo que, em geral, existem dois choques por período básico. Assim, os harmônicos de defeito na esfera são muitas vezes dominantes, especialmente em espectros de envelope conforme Figura 11.

Figura 11- Sinais típicos e sinais de envelope de falhas locais em mancais de rolamento



Fonte: Adaptado (RANDALL, 2011)

#### 2.2.4.4 Transformada de Fourier de Tempo curto STFT

A Transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*-FFT) utiliza a transformação do sinal da vibração no domínio do tempo e transforma para o domínio da frequência. Essa técnica, geralmente, realiza o diagnóstico de falha em rolamento, cujas características dos componentes de espectro estão relacionadas com um pico periódico (VORA; GAIKWAD; KULKARNI, 2015).

A Transformada de Fourier (TF) descreve as diferentes frequências contidas em um sinal, mas não a localização espacial destas frequências. Análise de Fourier é excelente quando se tem sinais estacionários, isto é, quando as propriedades estatísticas não variam com o tempo, quando o sinal apresenta as mesmas componentes de frequência durante toda sua duração.

Nesse caso, não é preciso saber “quando” um determinado componente de frequência existe, já que todas as componentes de frequência existem em todos os momentos. A

transformada de Fourier pode ser usada para sinais não-estacionários, quando se está interessado apenas em quais componentes de frequência existem no sinal, mas não em que tempo estas ocorrem. Entretanto, se for necessário identificar em que tempo um componente de frequência ocorre, então, faz-se necessário a utilização de outras técnicas avançadas. A transformada de Fourier e a transformada inversa são descritas pelas equações (3.26) e (3.27), respectivamente.

$$FFT(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.26)$$

$$FFT(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(w)e^{-j\omega t} dt \quad (3.27)$$

Quando um sinal possui características não estacionárias ou transitórias, faz-se necessário utilizar uma abordagem tanto no domínio do tempo quanto da frequência. Nesta perspectiva a transformada de Fourier de Tempo curto STFT (ou Transformada de Gabor) é uma adaptação da análise espectral clássica de Fourier em que se utiliza uma análise no domínio do tempo-frequência. De acordo com Vora; Gaikwad e Kulkarni (2015), essa técnica possibilita a identificação de quando e qual a frequência em que o evento ocorre, sabendo-se que essas informações são adquiridas por meio de janelas rígidas sem flexão do tamanho e de frequência.

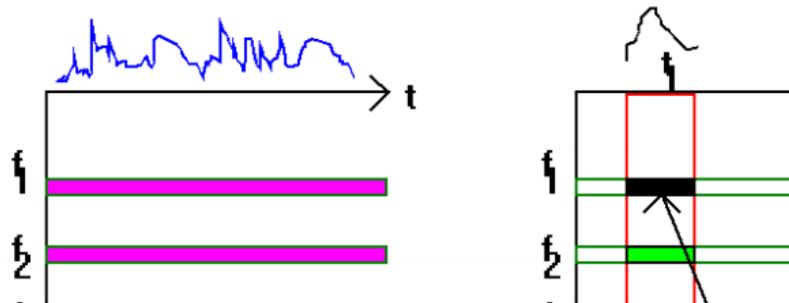
É observado o sinal em um parâmetro de frequência local por meio de uma curta "janela" dentro da qual o sinal é considerado como estacionário. Surgindo a necessidade de uma representação bidimensional  $F(t, w)$  do sinal  $f(t)$ , suas características espectrais tornam-se dependentes do tempo, sendo que  $f(t)$  é observado por meio de uma janela  $J(t)$  centrada no instante de tempo e de extensão limitada, ou seja, quando essa janela for fixada para STFT a resolução no tempo e na frequência  $f$  e  $t$  permanecerão constantes em todo o plano  $t$ - $f$ .

A equação (3.28), representa a STFT do sinal no plano  $t$ - $f$ .

$$STFT(\tau, w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)J^*(t - \tau) e^{-j\omega t} dt \quad (3.28)$$

A Figura 12, ilustra a transformada de Fourier em tempo curto, na qual evidencia as janelas fixas no instante de tempo  $t$ .

Figura 12-Transformada de Fourier de Tempo curto STFT (ou Transformada de Gabor)

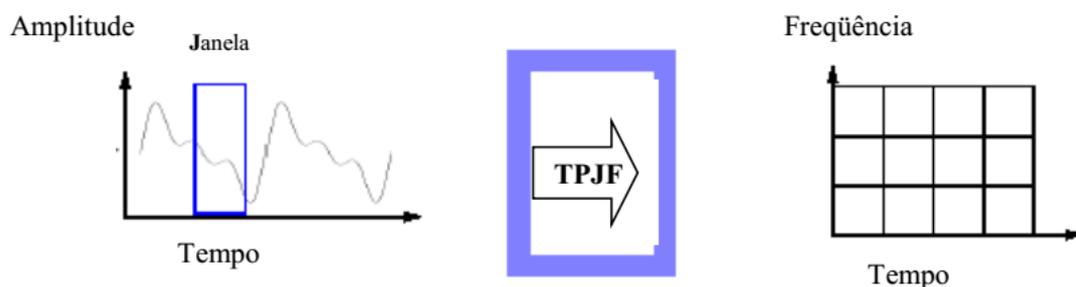


Fonte: Oliveira, 2007

Para Oliveira (2007), existem inúmeras formas para se obter a janela, contudo quando acontece a fixação da janela para a STFT, em todo o plano t-f, a resolução tempo-frequência permanece constantes. No entanto, para obter-se um diagnóstico no plano tempo-frequência precisa-se uma representação variável no tempo.

Ao selecionar uma parte do sinal por meio da janela “ $W(t)$ ” em uma escala determinada, é realizada a translação da janela por meio de toda serie temporal. Aplica-se a transformada de Fourier em pequenas séries tendo como resultado uma expansão dos dois parâmetros tempo-frequência. Entretanto, a escolha do tamanho da janela é realizada conforme a frequência, produzindo um plano de divisão retangular do tempo-frequência como mostra a Figura 13.

Figura 13-Transformada por janelas de Fourier



Fonte: Adaptada (Misiti, 2013).

Segundo Prakash (2014), o problema da STFT é que ela possui resolução única constante para todas as frequências, utilizando o mesmo tamanho da janela para a análise de sinal tanto para alta frequência como para baixa frequência. Nesta perspectiva, surge o problema da resolução de tempo-frequência que é o resultado do princípio de incerteza de Heisenberg sendo impossível aumentar um detalhamento em seguimento sem diminuir o outro, onde qualquer que

seja a transformada é necessário utilizá-lo, porém, qualquer sinal pode ser resolvido utilizando uma técnica alternativa chamada análise multiresolução (MRA).

#### 2.2.4.5 Técnica da Transformada de Wavelet

A técnica da Transformada de Wavelet (WT) por meio da dilatação e translação da Wavelet-mãe, pode-se realizar uma análise em multi-resolução usando funções da janela (SINGH; KUMAR; KUMAR, 2014). A transformada de Wavelet analisa o sinal com diferentes resoluções na frequência e no tempo, basicamente, o mesmo princípio da análise de Multiresolução (MRA), que compreende séries temporais com variações tanto no tempo como na frequência (ou escala), representado na Figura 14.

Figura 14-Transformada de Wavelet proporciona uma representação em tempo e escala



Fonte: Adaptado (MISITI, 2013)

Ao realizar uma decomposição do sinal por funções variáveis em níveis de escalas (resoluções) e tempos de localização, obtém-se como resultado uma boa resolução no tempo e na frequência para frequências altas, sendo possível fazer a reconstrução ou representação de uma função, utilizando a matriz da Wavelet e os níveis dos coeficientes.

A transformada de Wavelet pode ser considerada como ondas de curta duração em um intervalo de tempo curto. Baseado na análise de Fourier, foi proposta a análise wavelet como uma nova teoria de análise de sinal para melhor analisar e processar um sinal não estacionário, e que possui propriedades matemáticas definidas pelo espaço funcional de quadrado integrável  $L^2(\mathfrak{R})$  (LI, J; YUAN, Y, 2017).

A função  $\psi(\cdot)$  é considerada como função Wavelet- mãe, caracterizada por oscilação (onda) e decaimento rápido no tempo, ou seja, curta duração (ondinhas). As funções consideradas como núcleos da transformação são versões da mesma onda mãe comprimidas/expandidas (OLIVEIRA, 2007). A dilatação (compressão) e translações

(expansão) de uma única função mãe  $\psi(\cdot)$ , origina as famílias de funções  $\psi_{a,b}(t)$ , representada por:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a, b \in \mathbf{R}, a \neq 0 \quad (3.29)$$

Onde:

$a$ : parâmetro de escala (contração/dilatação);

$b$ : parâmetro de deslocamento.

$\Psi_{a,b}(t)$  : função base (Wavelet Mãe);

O termo  $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$  serve para normalizar a função  $\psi_{a,b}(t)$ .

Quando se observa a transformada de Wavelet pelo tempo-escala tem-se as seguintes equações (3.30) e (3.31).

$$TW^f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \psi_{a,b} dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3.30)$$

$$TW^f(j, k) = a_0^{-\frac{j}{2}} \int f(t) \psi(a_0^{-j}t - kb_0) dt \quad (3.31)$$

Essas equações são básicas para surgimento de vários tipos de transformada de Wavelet. A transformada de Wavelet (wt) possui duas versões Wavelet Contínua Transformada (CWT) e Transformada Wavelet Discreta (DWT).

A Transformada de Wavelet Contínua é dada pela família de funções  $\psi_{a,b}(t)$ , definida como translações e dilatações de uma única função  $\psi(t)$ , chamada Wavelet mãe.

$$TW^f(a, b) = \int f(t) \psi_{a,b} dt \quad (3.32)$$

A função  $\psi(t)$  tem que satisfazer a condição de admissibilidade,

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\psi(w)^2}{|w|} dw < \infty \quad (3.33)$$

Onde:

$$\int \psi(t)dt = \psi(0) = 0 \quad (3.34)$$

Onde:

$f(t)$ : sinal a ser decomposto;

$\Psi t$  : função base com duração limitada no tempo (Mother Wavelet);

$a$ : parâmetro de escala (contração/dilatação);

$b$ : parâmetro de deslocamento.

Para obter a transformada inversa contínua faz-se necessário que a condição de admissibilidade seja satisfeita  $C \psi < \infty$ , sendo assim a função  $f(t)$  de  $L_2(\mathfrak{R})$  pode ser reconstruída de sua transformação Wavelet em uma reconstrução alternativa.

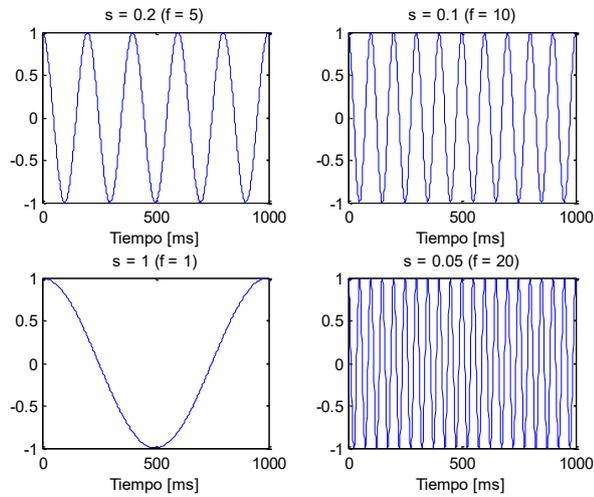
$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \iint_{-\infty}^{+\infty} TWC^f(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2} \quad (3.35)$$

Considerando que  $C\Psi$  é uma constante que depende da função Wavelet ( $\Psi$ ) escolhida.

#### 2.2.4.6 Escala

A escala de uma Wavelet tem como base o seu alongamento ou sua compressão. Deste modo, são utilizados os parâmetros das escalas dos mapas. Altas escalas representam um menor detalhamento (do sinal), ou seja, a visão global do sistema, e baixas escalas um maior detalhamento (do sinal). Da mesma maneira para frequência, baixa frequência (maior escala) fornece uma informação total, enquanto que mais altas as frequências (baixa escala) maior o detalhamento da informação. Para obter uma compreensão melhor será representado um exemplo de sinais senoidais mostrado em diferentes escalas conforme a Figura 15.

Figura 15 - Valor de um sinal senoidal em diferentes escalas

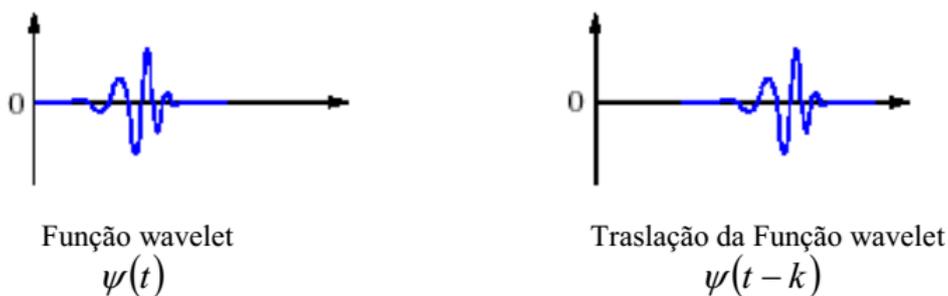


Fonte: Autoria própria

#### 2.2.4.7 Translação

A translação está relacionada com a localização da “janela”, à medida que a janela é deslocada através do sinal. Este termo, obviamente, corresponde a informações de tempo no domínio de transformação (POLIKAR, 1998). Em termos matemáticos, a translação da função  $\psi(t)$  por  $k$  é representada por  $\psi(t - k)$ , conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Translação de uma Wavelet em  $k$  unidades



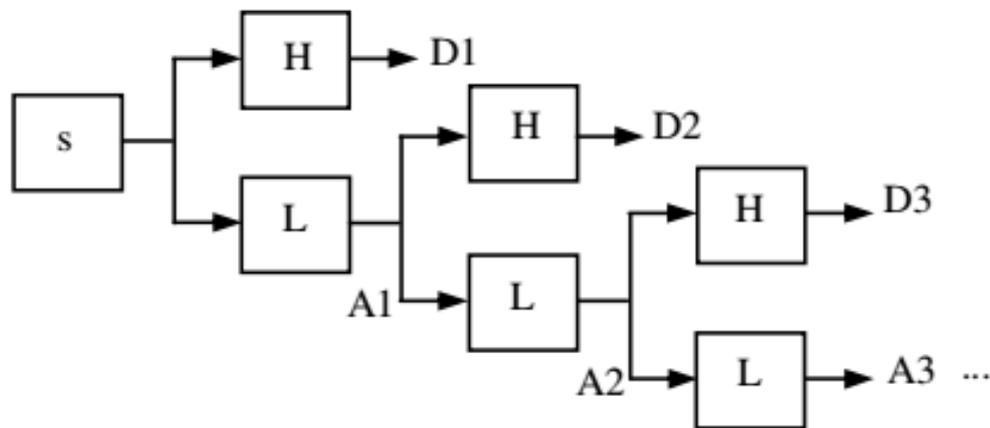
Fonte: (MISITI, 2013)

Nesse contexto, a função de Wavelet tem uma correspondência entre escala e frequência, se a escala possuir valores baixos será obtido Wavelet curtas com rápidas mudanças em altas frequências e, quando for em altas escalas, serão Wavelet longas, mudanças lentas e baixas frequências.

#### 2.2.4.8 Transformada Wavelet Discreta (DWT)

A transformada de Wavelet Discreta (DWT) pode ser considerada como uma técnica de multi-resolução, a análise do sinal acontece em diferentes escalas ou resolução por meio de funções de escala e funções de Wavelet (MALLAT, 1989). Esse conjunto de funções está associado com bancos de filtros para decompor os sinais: filtro de passa baixa (L) e filtro de passa alta (H), mostrado na Figura 17.

Figura 17- Decomposição principal da DWT



Fonte: (BENDJAMA et al., 2015)

Sabendo-se que cada filtro de passa banda é determinado pela a escolha da Wavelet mãe, esta por sua vez, possibilita a função de resposta em frequência desejada, sendo que a ordem da função Wavelet determinará a região de sobreposição do espectro, ou seja, a ordem da função de Wavelet quanto maior for empregada, menor será a região de sobreposição do espectro (CUSIDÓ et al., 2010).

Os filtros de passa baixa e passa alta são conhecidos como bases da discretização proposto por Mallat (2009), com a *Pyramidal Algorithm* ou *Quadrature Mirror Filter* (QMF). No algoritmo piramidal é necessária a utilização de três elementos: o vetor de entrada, o filtro do tipo mãe  $h(k)$  e o filtro da escala  $l(k)$  da wavelet do tipo pai. O algoritmo piramidal efetua o cálculo da transformada discreta das funções wavelet por meio de filtros distintos para cada passa banda é realizado uma filtragem depois uma decimação ou (*downsampling*). Para calcular o algoritmo piramidal utilizam-se os coeficientes  $a_{j-1,k}$ , do nível de  $j-1$ . Nessa perspectiva, tem-se as equações (3.36) e (3.37).

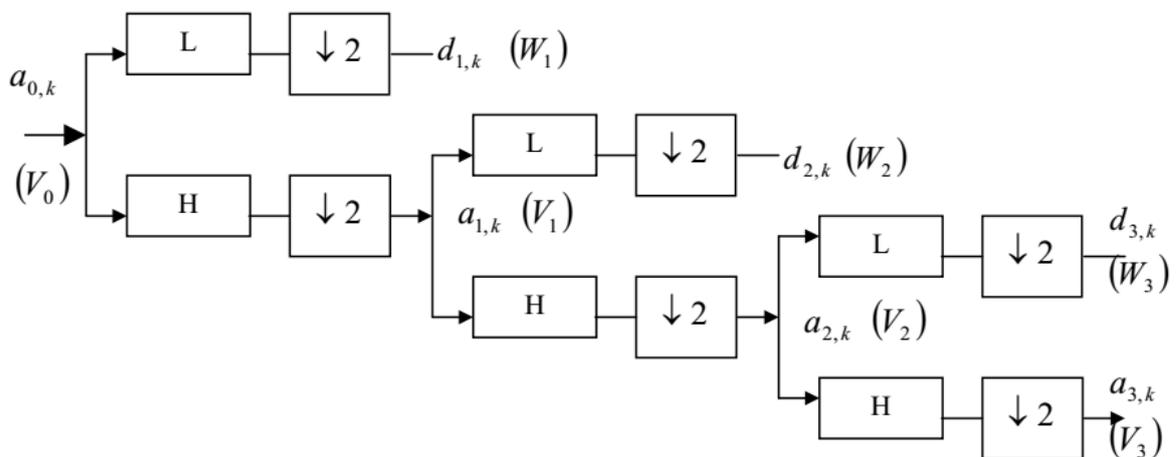
$$a_{j,k} = \sum_n l(n - 2k)a_{j-1,n} \quad (3.36)$$

$$d_{j,k} = \sum_n h(n - 2k)a_{j-1,n} \quad (3.37)$$

Nessas equações, observa-se que o número de coeficientes para a  $j, k$  que encontra-se no nível  $j$ , será a metade do número de coeficientes a  $j-1, k$  do nível  $j-1$ , da mesma forma para  $d_{j,k}$ , de tal forma que ao final se terá a mesma quantidade de dados que ao início.

A escolha da Wavelet determinará os filtros L e H e a sua perfeita reconstrução do sinal sendo:  $L = (l(k))_{k \in \mathbb{Z}}$  e  $H = (h(k))_{k \in \mathbb{Z}}$  e para os filtros de reconstrução  $L' = (l'(k))_{k \in \mathbb{Z}}$  e  $H' = (h'(k))_{k \in \mathbb{Z}}$  detalhado na Figura 18.

Figura 18 - Decomposição do Sinal com *Downsampling*



Fonte: Adaptação (MALLAT, 2009).

A decomposição do sinal tem como significado a eliminação da entrada (*downsampling* de 2), utilizado pelo símbolo ( $\downarrow 2$ ) fazendo com que a amostra inicial se mantenha constante, aplicando sempre a cada nova composição a transformada aos coeficientes de aproximação.

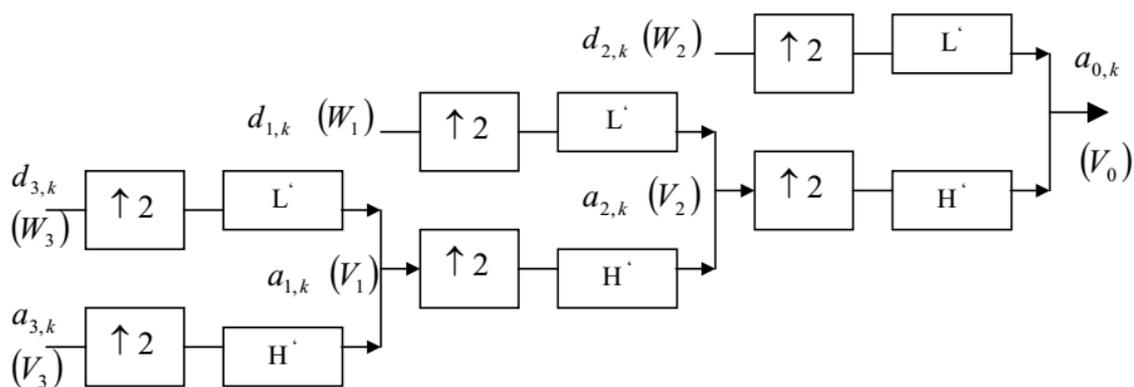
Para melhor compreensão, será realizada uma análise da Figura 18. Suponha que  $a_{0,k}$  seja a entrada do sinal e que tem como espaço de função  $V_0$  inicial. Utilizando a transformada de Wavelet discreta, tem-se dois filtros de passa baixa (L) e filtro de passa alta (H). Em seguida aplica-se *downsampling* de 2 que terá como resultado dois coeficientes  $a_{1,k}$  e  $d_{1,k}$  pertencentes respectivamente, aos espaços  $V_1$  e  $W_1$  que podem ser considerados como versões de escalas do elemento de espaço  $V_0$ . Elimina-se  $W_1$  e o espaço  $V_1$  passará novamente por dois filtros, considerando que os coeficientes de  $V_1$  são chamados de aproximação e os coeficientes de  $W_2$

de detalhes. Aplicando-se novamente o mesmo procedimento anterior nos coeficientes de aproximação  $V_2$ , até chegar na escala desejada, que na Figura 18 considera-se  $V_3$ .

De uma forma geral, pode-se considerar que o sinal original é subdividido em vários outros sinais com diferentes bandas de frequências, que o resultado de cada coeficiente da transformada tem uma banda de frequência única, onde sua análise depende do objetivo que deseja. De acordo com Shirado et al., (2015), a transformada Wavelet discreta possibilita a decomposição do sinal em componentes de frequência diferentes, permitindo o estudo de cada componente individualmente em sua escala correspondente.

Sabe-se que a DWT possibilita a decomposição do sinal inicial por meio de uma fragmentação. Existe um processo na transformada de Wavelet discreta conhecida como reconstrução ou síntese que realiza a reconstrução do sinal original sem perda de informações pelos coeficientes de Wavelet. Na reconstrução do sinal original é utilizado basicamente o mesmo processo da decomposição, porém, acontece um processo de transformada inversa discreta de Wavelet por meio de *upsampling* seguido de filtragem. Esse procedimento é realizado em todo o processo até se obter a reconstrução do sinal. O *upsampling* (simbolizado por  $2\uparrow$ ) indica que os componentes do sinal serão alongados por inserções de zero entre cada uma das amostras, conforme representado na Figura 19.

Figura 19 - Reconstrução do Sinal via coeficientes de Wavelet



Fonte: Adaptação (MALLAT, 2009).

As escolhas das Wavelets determinarão quais filtros serão utilizados para a reconstrução do sinal original, pois quando se aplica o *downsampling* nas componentes do sinal para a decomposição do mesmo, acontecerá uma distorção chamado de *aliasing* (OPPENHEIM; SCHAFER, 2013). Somente por uma seleção criteriosa destas Wavelets, ou seja, dos filtros na decomposição e na reconstrução que poderá ser possível anular os efeitos do *aliasing*, sem

perda de algumas informações ou melhor de alguns coeficientes de alta frequências relativas a cada nível do sinal decomposto quando estes são eliminados na decomposição.

#### 2.2.3.9 Curtose espectral

A curtose espectral (SK) foi utilizada pela primeira vez por (DWYER, 1984) na década de 80 para a detecção de eventos impulsivos em sinais de sonar. Ela baseia-se na Transformada de Fourier curto período de tempo (STFT) (definida como o momento normalizado de quarta ordem da parte real da STFT) e dá uma medida da impulsividade de um sinal, como uma função da frequência. Ottonello e Pagnan (1994), introduziram uma definição modificada para essa, que utiliza o momento de quarta ordem normalizada pela magnitude da STFT para estimar SK.

Recentemente, a SK tem atraído atenção, e foi redefinida por Capdevielle (1996) e Vrabie (2004) usando a teoria de estatística de ordem superior, como a normalização cumulativa de quarta ordem.

Finalmente uma compreensão da formulação e definição de SK para processos não estacionários é proposta por Antoni (2006). Isto preencheu as lacunas existentes nas definições anteriores e revelou muitas características úteis do SK e também ajudou na ligação entre conceitos teóricos com exemplos práticos e aplicações decorrentes da utilização de SK para detectar a presença de falhas nos rolamentos.

A curtose espectral (SK) é uma ferramenta estatística que pode indicar a presença de uma série de transientes e suas localizações no domínio da frequência (ANTONI; RANDALL, 2006). Essa técnica é um complemento da abordagem de densidade espectral de potência e elimina completamente a informação de não estacionaridade. A curtose espectral soluciona o problema de encontrar a banda de frequência de maior impulsividade que é utilizada na implementação da técnica do envelope. O método proposto é baseado na STFT, e provê o quanto é impulsivo o sinal em função da frequência. A curtose espectral tornou-se uma poderosa ferramenta de análise de falhas para detectar presença de sinais transientes, até mesmo quando o sinal está misturado com fortes ruídos, onde a mesma consegue determinar qual a banda de frequência que contém maior impulsividade. A seleção da banda de frequência que contém ressonância é de extrema importância para o desempenho da análise do envelope.

Na literatura, a curtose espectral é apresentada como uma ferramenta usada para determinar componentes não estacionário de um sinal. São apresentados vários métodos de diagnósticos de falhas mecânicas e a maioria deles é baseado na análise do sinal de vibrações. O objetivo da curtose espectral é detectar componentes não estacionários de um sinal. A curtose

espectral é representativa do comportamento dos componentes espectrais de um sinal, enquanto a análise PSD é representativa da distribuição de energia de um sinal. A espectral curtose fornece uma maneira robusta para detectar falhas incipientes que produzem sinais de impulsos, mesmo na presença de fortes ruídos. A curtose espectral é um parâmetro estatístico definido pela seguinte equação:

$$Kurtosis = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^2} \quad (3.37)$$

Onde  $x$  é o sinal no tempo amostrado,  $i$  é o índice da amostra,  $N$  é o tamanho da amostra e  $\bar{x}$  é a média da amostra. O momento de quarta ordem normalizado foi projetado para refletir o “pico crescente” do sinal.

A curtose espectral de um sinal  $x(t)$  pode ser definida como o momento espectral de quarta ordem normalizado segundo Antoni (2006), isto é:

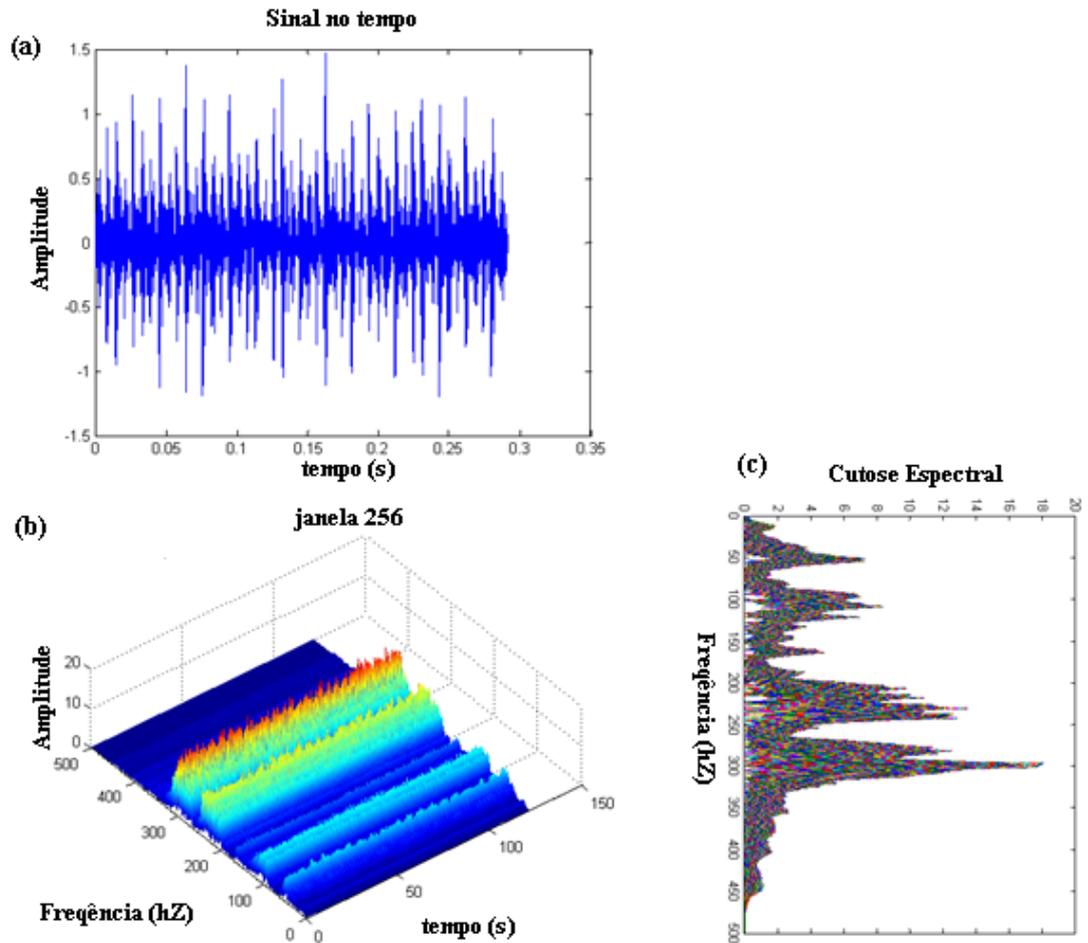
$$SK(f) = \frac{\langle |X(t,f)|^4 \rangle}{\langle |X(t,f)|^2 \rangle^2} - 2 \quad (3.38)$$

Onde  $\langle \cdot \rangle$ , representa o operador de média tempo-frequência  $\langle X(t,f)^4 \rangle$  e  $\langle X(t,f)^2 \rangle^2$  são os cumulantes de quarta e segunda ordem respectivamente de um sinal filtrado de um filtro passa-banda em torno da frequência. A curtose espectral é um complemento da clássica PSD para a detecção de falhas em sinais não estacionário (ANTONI, 2006). Entretanto é necessário um número mínimo de espectros para que seja possível a estimação da curtose espectral de um sinal. Na prática, o parâmetro de SK é encontrado por meio da transformada em tempo curto de Fourier (STFT), que faz uso do princípio de dividir o sinal em  $k$  segmentos e calcula-se a FFT em cada segmento considerando o sinal como estacionário. Por meio do uso da técnica da STFT é possível encontrar a banda de frequência que tem um alto valor de curtose.

O espectro curtose do sinal  $x(t)$  é calculado a partir da STFT (*Short Time Fourier Transform*), que é a transformada local de Fourier no instante  $t$  obtido passando uma janela pelo sinal. Quando visto como uma função da frequência, o quadrado da magnitude retorna a força do espectro no momento  $t$ . Quando visto como uma função do tempo, pode ser interpretado como o envelope do sinal complexo  $x(t)$ . Isso pode ser facilmente detectado calculando o curtose do envelope complexo  $X(t,f)$ , como representado na equação (3.38). A Figura 20, apresenta o espectro de curtose de um sinal de

falha simulado. A Figura (20) (a), mostra o sinal original simulado no domínio do tempo. A Figura 20 (b), representa a transformada de Fourier em tempo curto do sinal original, e a Figura 20 (c) é a curtose espectral representada no domínio da frequência.

Figura 20 - Cálculo do espectro Curtose para um sinal de falha simulada: (a) Sinal simulado do tempo; (b) STFT; e (c) Espectro curtose em função da frequência

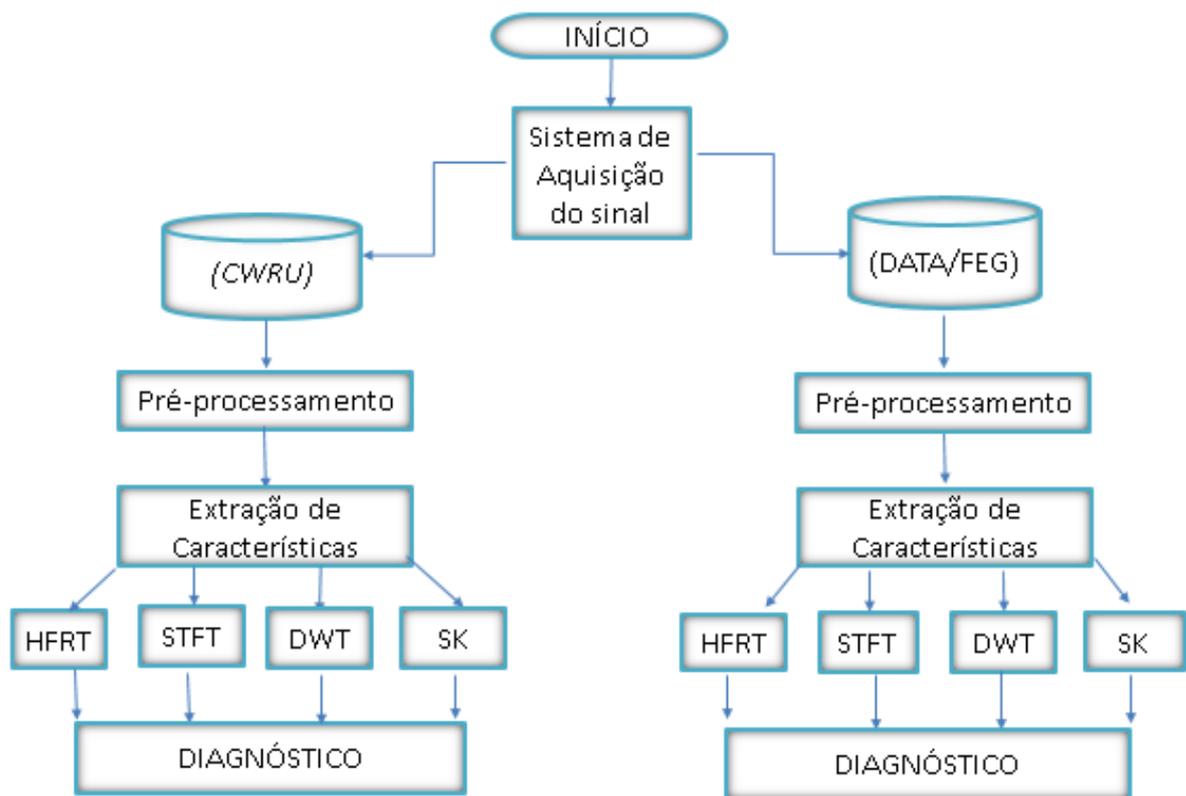


Fonte: Autoria própria.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os instrumentos utilizados para o desenvolvimento desse trabalho foram por meio da aquisição dos sinais de vibrações dos rolamentos rígidos de esferas disponíveis no banco de dados da CASE WESTERN RESERV e no banco de dados de (FEG/UNESP). Após esse procedimento foi realizado uma análise de indicadores de vibrações no domínio do tempo e no domínio da frequência para a extração das frequências características de defeitos nos elementos constituintes dos rolamentos na pista interna, pista externa e esferas. Implementou-se as técnicas de processamentos de sinais: HFRT, STFT, WAVELET E CURTOSE ESPECTRAL conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21- Diagrama das etapas necessárias para a obtenção do diagnóstico



Fonte: Autoria própria

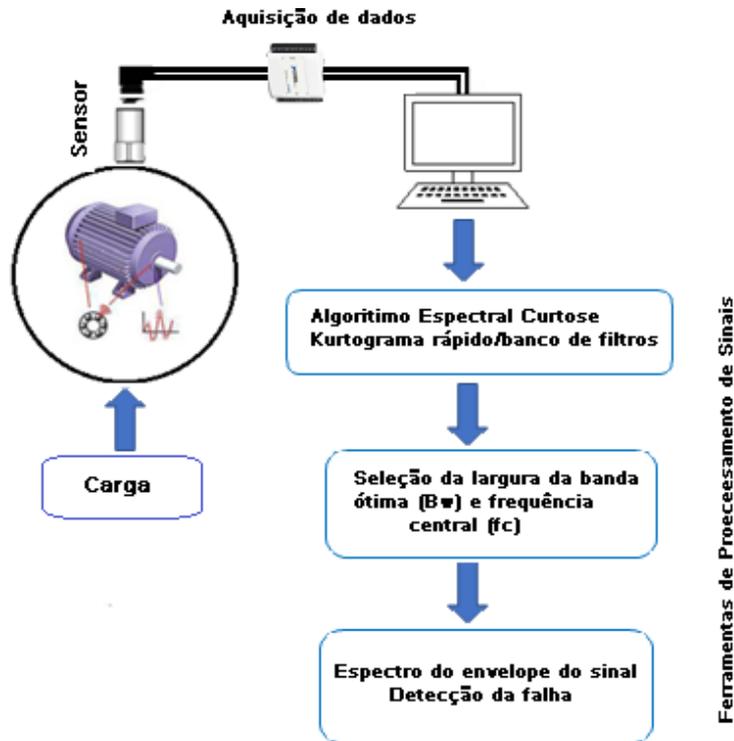
Além desses procedimentos, foi realizado a combinação das técnicas de processamentos de sinais (Wavelet e HFRT) e (Curtose Espectral e HFRT), com o objetivo de se obter um refinamento nas técnicas, melhorando o processamento e tornando a técnica mais robusta.

### 3.1. MÉTODO PROPOSTO

A seleção da banda de frequência de demodulação ótima é um passo significativo no diagnóstico de falhas de rolamentos, pois determina se a informação de falha pode ser extraída do sinal demodulado através de análise de envelope. Um método bem conhecido para selecionar a banda de demodulação é o Kurtogram rápido, baseado na curtose do sinal de filtrado no tempo. Embora esse método tenha sido aplicado com sucesso em muitos casos, ele pode falhar em ambientes específicos, como na presença de interferência eletromagnética (EMI) ou outros sinais de mascaramento impulsivos (WADE et al., 2016).

O método proposto é baseado na curtose espectral e Kurtogram rápido em que é determinada a região de ressonância de forma automática. Trabalhos recentes mostram que a SK é uma ferramenta atrativa de processamento de sinais para realizar diagnósticos de falhas mecânicas, mesmo na presença de sinais ruidosos. A ferramenta de curtose espectral foi apresentada pela primeira vez por (DWYER, 1984) como um complemento da densidade espectral de potência. A SK é representativa do comportamento dos componentes espectrais do sinal, enquanto a PSD é representativa da distribuição de energia do sinal. Por meio da Sk pode-se indicar a presença de transientes e suas localizações no domínio da frequência. Nas últimas décadas, muitos métodos foram propostos para extrair características de falhas de vibrações em máquinas rotativas utilizando análise no domínio do tempo, análise no domínio da frequência e análise no domínio tempo-frequência por meio da transformada em tempo curto de Fourier (STFT) e transformada de Wavelet. A Figura 22, ilustra a configuração experimental e algoritmo da curtose espectral.

Figura 22- Diagrama da configuração experimental e Algoritmo



Fonte: Adaptado (SAID et al., 2014)

#### Algoritmo da Curtose Espectral

- 1- Realiza a aquisição de dados do sinal de vibração do rolamento;
- 2- Calcula a curtose da decomposição da banda de frequência do sinal;
- 3- Gera o Kurtogram usando o valor da curtose do sinal;
- 4- Seleciona a largura da banda ótima e frequência central do sinal de curtose máxima;
- 5- Realiza a demodulação do sinal da banda de frequência;
- 6- Calcula o espectro do envelope do sinal da banda de frequência;
- 7- Identifica a falha e sua localização utilizando o espectro do envelope do sinal.

## 3.2 ESTUDO DE CASOS

O diagnóstico de rolamentos baseado em vibrações é um campo muito bem desenvolvido, mas os investigadores continuam a desenvolver novos algoritmos de diagnóstico com bastante frequência segundo Smith e Randall (2015). Na última década, os dados do Case Western Reserve University Data Center (CWRU), tornaram-se um padrão de referência para testar esses algoritmos e validar teorias. Para o mapeamento dos sinais foram utilizados dois bancos de dados em experimentos realizados na FEG/UNESP (OLIVEIRA, 2005) e o arquivo de dados da CASE WESTERN UNIVERSITY.

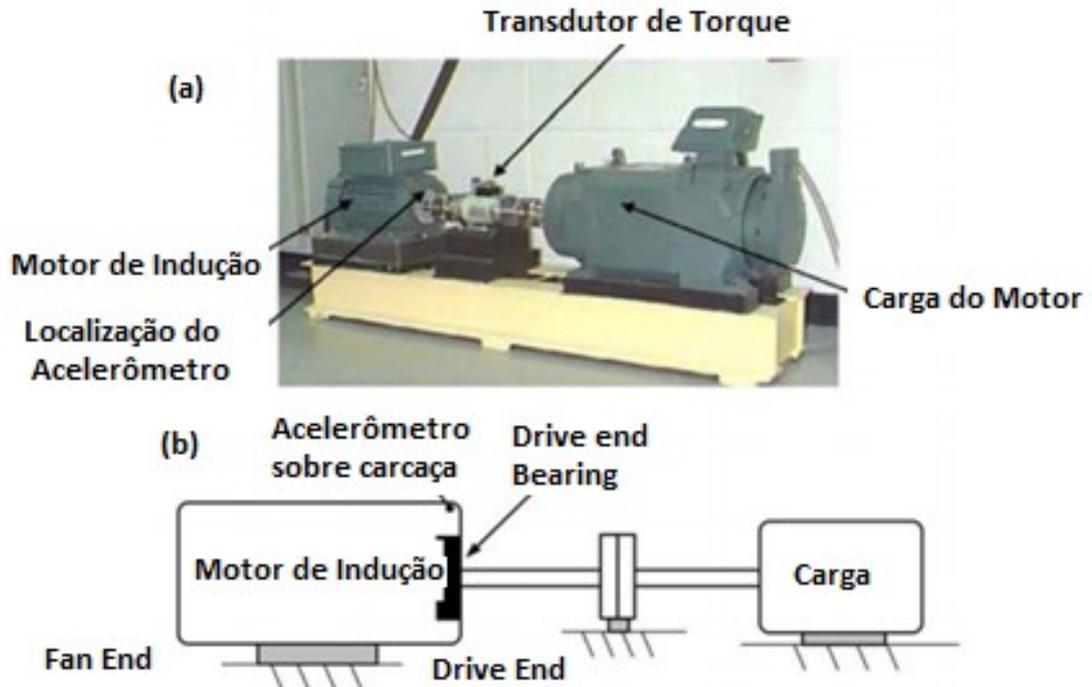
### 3.2.1 Case Western Reserve University Bearings Data Center

Inicialmente, realizou-se o acesso no site da “CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY”, obtendo-se os sinais de vibrações dos dados de teste de rolamento de esferas para rolamentos normais, isto é, sem defeitos e defeituosos. De acordo com a descrição dada pelo provedor de dados do teste, foi utilizado um motor de 2 HP *Reliance Electric* e os dados de aceleração foram medidos em pontos próximos e distante do rolamento do motor. As condições de ensaio reais do motor, bem como o estado de falha do rolamento foram cuidadosamente documentados para cada experimento realizado.

As falhas ocasionadas nos rolamentos do motor foram provocadas por meio de usinagem por eletro-erosão (EDM) *Electrical Discharge Machining*. As falhas geradas variam de 0,007 polegadas de diâmetro para 0,040 polegadas de diâmetro (1 polegada = 25,4 mm). Todas as falhas têm uma profundidade de 0,011 polegadas, e foram introduzidos, separadamente na pista interna (*inner raceway*), na esfera (*rolling element*) e na pista externa (*outer raceway*).

Os rolamentos sob falha foram reinstalados no motor de teste e dados de vibração foram registados para potência do motor de 0-3 HP (velocidades do motor de 1.797-1.730 rpm). Os dados são amostrados a uma frequência de 12 kHz e a duração de cada sinal de vibração é de 10 s. O tipo de rolamento utilizado neste estudo é o SKF 6205-2RSL JEM rolamento rígido de esferas. A Figura 23, mostra o experimento realizado para a obtenção do banco de dados.

Figura 23 - (a) Bancada de teste do rolamento (b) Sistema Experimental



Fonte: (CWRU, 2008)

Como mostrado na Figura 23, o motor é ligado a um dinamômetro e o sensor de torque por um acoplamento de auto alinhamento. Os sinais de vibração foram coletados utilizando acelerômetros que foram anexados a carcaça com bases magnéticas. Acelerômetros foram colocados na posição vertical, tanto no lado do acionamento e no final do ventilador do compartimento do motor. Os dados de vibração foram obtidos a partir do sistema experimental em quatro condições operacionais diferentes: (1) condição normal; (2) com falha pista interna; (3) falha na pista externa; e (4) com falha esfera.

Os dados digitais foram coletados em 12.000 amostras por segundo, e também coletados em 48.000 amostras por segundo para rolamentos com falhas no final da extremidade da unidade. Os dados de velocidade e potência foram coletados com um transdutor /encoder e foram registrados com a mão. Os rolamentos utilizados neste estudo são rígidos de esferas fabricados pela SKF. A velocidade do motor durante os testes experimentais são 1797-1730 rpm.

Cada rolamento foi testado sob as quatro diferentes: Potências 0, 1, 2, e 3 (hp). Foram utilizados os dados disponibilizados no banco de dados da CWRU, que correspondem à medidas nominais do rolamento rígidos de esferas SKF 6205, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Detalhes do rolamento

Detalhes	Dados de teste (SKF 6205)	Dados de teste (Koyo 1205)
Diâmetro da Esfera	7,94 mm	7,12 mm
Diâmetro Pitch	39,04 mm	38,5 mm
Número de Esferas	9	12
Ângulo de Contato ( $^{\circ}$ )	0	0

Fonte: (CWRU, 2008)

A Tabela 3, mostra as especificações do rolamento (SKF 6205) utilizando as dimensões em milímetros.

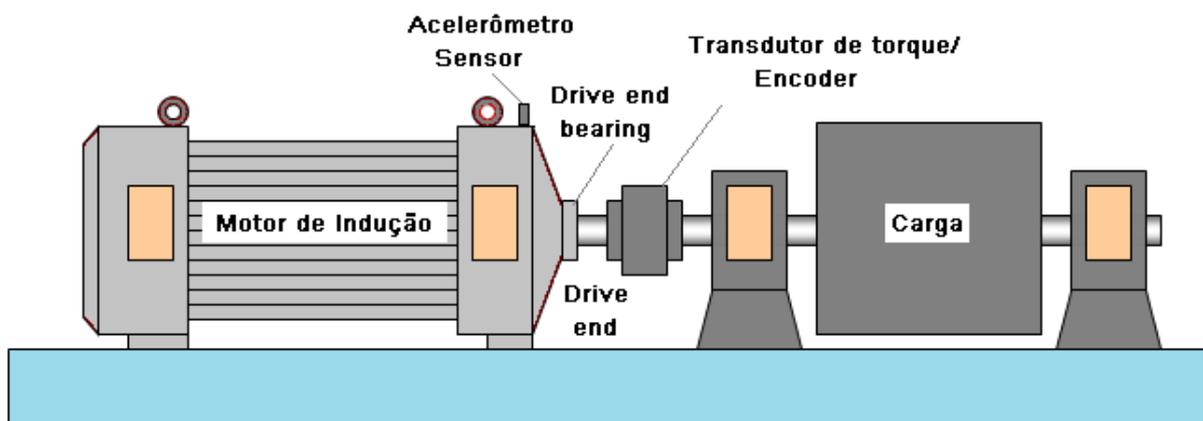
Tabela 3-Especificações do rolamento

Diâmetro Interno	Diâmetro Externo	Espessura	Diâmetro da esfera	Diâmetro primitivo
25,0012	51,9988	15,0012	7,94004	39,0398

Fonte: (CWRU, 2008)

Nos ensaios realizados na CWRU, os digitais foram amostrados a uma taxa de 12.000 amostras por segundo e também coletados em 48.000 amostras por segundo. Todos os dados do rolamento no final da unidade (*Drive end*) foram amostrados a uma taxa de 12.000 amostras/segundo. A Figura 24, mostra o diagrama esquemático do sistema experimental utilizado pela CWRU.

Figura 24 - Diagrama esquemático do sistema experimental



Fonte: Adaptado (CWRU, 2008)

A seguir são apresentadas as Tabelas 4 a 8, referentes às configurações para os arquivos gerados no processo de aquisição de dados considerando rolamento sem defeito, e com defeitos referentes ao rolamento localizado na extremidade do acionamento com uma taxa de aquisição igual a 12.000 rpm, defeitos referentes ao rolamento localizado rolamento na extremidade do acionamento com taxa de aquisição igual a 48.000 rpm, defeitos referentes ao rolamento localizado rolamento na extremidade do ventilador.

Tabela 4 - Rolamento sem defeito

Nome do arquivo	Velocidade do motor (rpm)	Carga do Motor (Hp)
Normal_0	1.797	0
Normal_1	1.772	1
Normal_2	1.750	2
Normal_3	1.730	3

Fonte: (CWRU, 2008)

Com relação ao estado desses rolamentos, além de sua condição normal, ou seja, sem defeito, foram considerados três tipos de falhas: pista interna, pista externa e elemento de rolamento. Para cada tipo, foram introduzidas até cinco variações de falha, por meio de seu diâmetro, representando a severidade desta falha. A Tabela 5, apresenta uma relação completa de todas as condições tratadas nos experimentos.

Tabela 5 - Especificação das falhas – em polegadas (CWRU, 2008)

Rolamento	Local da falha	Diâmetro	Profundidade	Fabricante do rolamento
Acionamento	Pista Interna	0,007	0,011	SKF
Acionamento	Pista Interna	0,014	0,011	SKF
Acionamento	Pista Interna	0,021	0,011	SKF
Acionamento	Pista Interna	0,028	0,050	NTN
Acionamento	Pista Externa	0,007	0,011	SKF
Acionamento	Pista Externa	0,014	0,011	SKF
Acionamento	Pista Externa	0,021	0,011	SKF
Acionamento	Pista Externa	0,028	0,050	NTN
Acionamento	Esfera	0,007	0,011	SKF

Acionamento	Esfera	0,014	0,011	SKF
Acionamento	Esfera	0,021	0,011	SKF
Acionamento	Esfera	0,028	0,150	NTN
Ventilador	Pista Interna	0,007	0,011	SKF
Ventilador	Pista Interna	0,014	0,011	SKF
Ventilador	Pista Interna	0,021	0,011	SKF
Ventilador	Pista Externa	0,007	0,011	SKF
Ventilador	Pista Externa	0,014	0,011	SKF
Ventilador	Pista Externa	0,021	0,011	SKF
Ventilador	Esfera	0,007	0,011	SKF
Ventilador	Esfera	0,014	0,011	SKF
Ventilador	Esfera	0,021	0,011	SKF

Fonte: (CWRU, 2008)

Tabela 6 - Rolamento localizado o Drive end (12.000 amostras/segundo)

Diâmetro da falha (Pol)	Carga do Motor (HP)	Velocidade do motor (rpm)	Pista interna	Esfera	Pista Externa		
					Posição relativa a zona de carregamento		
					(Centralizado) @6:00	(Ortogonal) @3:00	(Oposto) @12:00
0,007"	0	1797	IR007_0	B007_0	OR007@6_0	OR007@3_0	OR007@12_0
	1	1772	IR007_1	B007_1	OR007@6_1	OR007@3_1	OR007@12_1
	2	1750	IR007_2	B007_2	OR007@6_2	OR007@3_2	OR007@12_2
	3	1730	IR007_3	B007_3	OR007@6_3	OR007@3_3	OR007@12_3
0,014"	0	1797	IR014_0	B014_0	OR014@6_0	*	*
	1	1772	IR014_1	B014_1	OR014@6_1	*	*
	2	1750	IR014_2	B014_2	OR014@6_2	*	*
	3	1730	IR014_3	B014_3	OR014@6_3	*	*
0,021"	0	1797	IR021_0	B021_0	OR021@6_0	OR021@3_0	OR021@12_0
	1	1772	IR021_1	B021_1	OR021@6_1	OR021@3_1	OR021@12_1
	2	1750	IR021_2	B021_2	OR021@6_2	OR021@3_2	OR021@12_2
	3	1730	IR021_3	B021_3	OR021@6_3	OR021@3_3	OR021@12_3
0,028"	0	1797	IR028_0	B028_0	*	*	*
	1	1772	IR028_1	B028_1	*	*	*
	2	1750	IR028_2	B028_2	*	*	*
	3	1730	IR028_3	B028_3	*	*	*

Fonte: (CWRU,2008)

Tabela 7- Rolamento localizado no Drive end. (48.000 amostras/segundo)

Diâmetro da falha (Pol)	Carga do Motor (HP)	Velocidade do motor (rpm)	Pista interna	Esfera	Pista Externa		
					Posição relativa à zona de carregamento		
					(Centralizado) @6:00	(Ortogonal) @3:00	(Oposto) @12:00
0,007"	0	1797	IR007_0	B007_0	OR007@6_0	OR007@3_0	OR007@12_0
	1	1772	IR007_1	B007_1	OR007@6_1	OR007@3_1	OR007@12_1
	2	1750	IR007_2	B007_2	OR007@6_2	OR007@3_2	OR007@12_2
	3	1730	IR007_3	B007_3	OR007@6_3	OR007@3_3	OR007@12_3
0,014"	0	1797	IR014_0	B014_0	OR014@6_0	*	*
	1	1772	IR014_1	B014_1	OR014@6_1	*	*
	2	1750	IR014_2	B014_2	OR014@6_2	*	*
	3	1730	IR014_3	B014_3	OR014@6_3	*	*
0,021"	0	1797	IR021_0	B021_0	OR021@6_0	OR021@3_0	OR021@12_0
	1	1772	IR021_1	B021_1	OR021@6_1	OR021@3_1	OR021@12_1
	2	1750	IR021_2	B021_2	OR021@6_2	OR021@3_2	OR021@12_2
	3	1730	IR021_3	B021_3	OR021@6_3	OR021@3_3	OR021@12_3

Fonte:(CWRU, 2008)

Tabela 8- Rolamento localizado na extremidade do ventilador (12.000 amostras/segundo)

Diâmetro da falha (Pol)	Carga do Motor (HP)	Velocidade do motor (rpm)	Pista interna	Esfera	Pista Externa		
					Posição relativa à zona de carregamento		
					(Centralizado) @6:00	(Ortogonal) @3:00	(Oposto) @12:00
0,007"	0	1797	IR007_0	B007_0	OR007@6_0	OR007@3_0	OR007@12_0
	1	1772	IR007_1	B007_1	OR007@6_1	OR007@3_1	OR007@12_1
	2	1750	IR007_2	B007_2	OR007@6_2	OR007@3_2	OR007@12_2
	3	1730	IR007_3	B007_3	OR007@6_3	OR007@3_3	OR007@12_3
0,014"	0	1797	IR014_0	B014_0	*	OR014@3_0	*
	1	1772	IR014_1	B014_1	*	OR014@3_1	*
	2	1750	IR014_2	B014_2	*	OR014@3_2	*
	3	1730	IR014_3	B014_3	*	OR014@3_3	*
0,021"	0	1797	IR021_0	B021_0	OR021@6_0	*	*
	1	1772	IR021_1	B021_1	*	OR021@3_1	*
	2	1750	IR021_2	B021_2	*	OR021@3_2	*
	3	1730	IR021_3	B021_3	*	OR021@3_3	*

Fonte: (CWRU, 2008)

### 3.2.2 Banco de dados da UNESP

O banco de dados DATA/FEG corresponde aos ensaios realizados na pesquisa de Oliveira (2005). Nos experimentos realizados foram efetuados testes em rolamentos rígidos de esferas da NSK 6205. Os ensaios foram efetuados com uma rotação do eixo de 1500 rpm (25 Hz).

Para a realização do cálculo das frequências características de defeito, foi utilizado os dados geométricos apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Características geométricas do mancal de rolamento NSK 6205

<b>Detalhes</b>	<b>Dados de teste (NSK 6205)</b>
Diâmetro da Esfera	7,94 mm
Número de Esferas	9
Diâmetro da Pista Interna	31,04 mm
Diâmetro da Pista Externa	46,72 mm

Fonte: (OLIVEIRA, 2005)

#### 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir do banco de dados Case Western Reserve University, realizou-se a simulação via software Matlab, obtendo-se as assinaturas de defeitos das falhas nas pistas internas, pista externa e na esfera. Nesta tese, foi realizada uma análise apenas para os dados do rolamento do lado do acionamento (*Drive End*).

O algoritmo utilizado para simular os rolamentos com defeito e sem defeito foi a técnica HFRT. Em seguida foram utilizadas técnicas avançadas como a STFT - *Short-time Fourier Transform*, Transformada de Wavelet, com o intuito de verificar quais das técnicas apresentam melhor resultado na detecção de falhas nos rolamentos rígidos de esferas.

Antes de realizar as simulações, foram feitos os cálculos das frequências características de defeitos nos rolamentos em estudo, por meios das equações obtidas no tratamento matemático de rolamentos e dos parâmetros geométricos do rolamento NSK 6205 rígido de esferas. Os resultados obtidos nos cálculos são apresentados na Tabela 10.

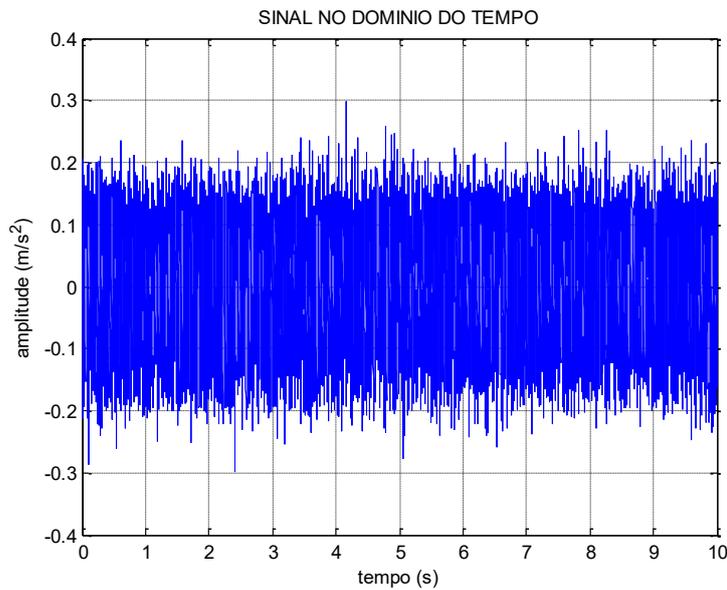
Tabela 10 - Frequência característica de defeito

FREQUÊNCIAS	VALOR EM (Hz)
Defeito na Pista Interna	162,57
Defeito na Pista Externa	106,97
Defeito na Esfera	69,51
Defeito na Gaiola	11,88

Fonte: Autoria própria

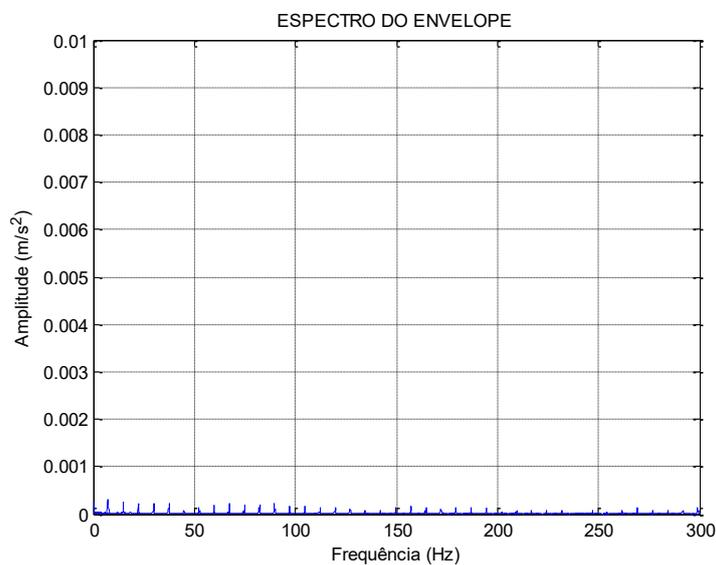
A Figura 25, ilustra o sinal simulado no domínio do tempo para o rolamento do banco de dados da Case Western Reserve University, onde se utilizou uma rotação de 1.797 rpm, uma frequência de amostragem de 12.000 amostras/segundo e sem carga. Nota-se que o rolamento em questão não apresenta defeito, pois é fácil verificar este fato quando se implementa a técnica HFRT e verifica-se na resposta no domínio da frequência evidenciada na Figura 26, que o rolamento apresenta apenas uma rugosidade superficial.

Figura 25- Sinal de um rolamento sem defeito



Fonte: Dados da pesquisa

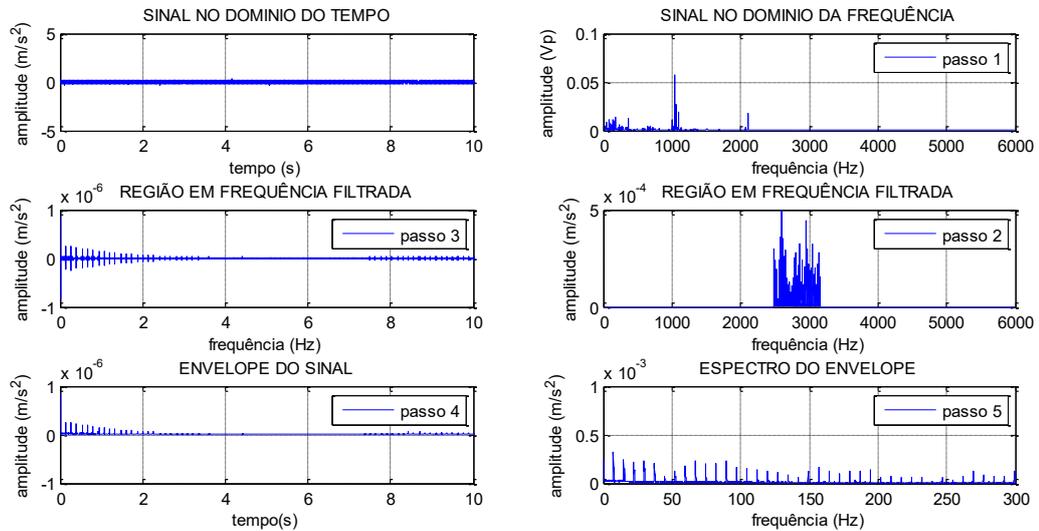
Figura 26 - Espectro do Envelope de um rolamento sem defeito



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 27, mostra as etapas para a implementação da técnica HFRT. No gráfico existe uma região de ressonância na faixa de frequência de 2.500 Hz a 3.200 Hz. Esta região é escolhida para realizar a implementação da técnica do envelope.

Figura 27- Etapas para implementação da técnica do Envelope



Fonte: Dados da pesquisa

O Quadro 1, apresenta os valores estatísticos calculados no domínio do tempo para um rolamento sem defeito. De acordo com a literatura quando se tem um valor de curtose menor que  $K < 3$  o rolamento ainda não apresenta defeito e acima deste valor  $K > 3$ , o rolamento já começa a apresentar defeito (MESQUITA; SANTIAGO; BEZERRA, 2002).

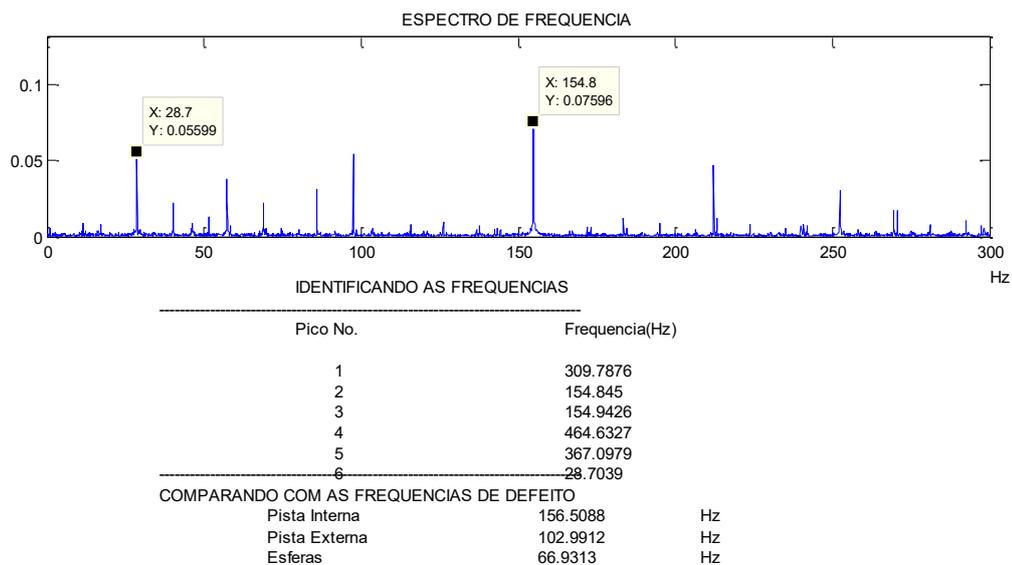
Quadro 1 - Características extraídas no domínio do tempo de um rolamento sem defeito

CARACTERÍSTICAS EXTRAIDAS DO DOMÍNIO DO TEMPO		
1 - Valor RMS =	0.072687	2 - Valor de Pico = 0.2987
3 - Fator de Crista =	4.1093	4 - Fator de Impulso = 5.0913
5 - Curtose =	2.7642	
CARACTERÍSTICAS DO SINAL DO MANCAL DE ROLAMENTO		
Item	Nome	Valor
1-	Ressonância (Hz)	2850
2-	Rotação do Eixo (Hz)	29.95
3-	Frequência de Passagem - Defeito na Pista Interna (Hz)	162.5702
4-	Frequência de Passagem - Defeito na Pista Externa (Hz)	0
5-	Frequência de Passagem - Defeito na Esfera(Hz)	0
6-	Frequência de Amostragem (Hz)	12000
7-	Comprimento do Sinal (pontos)	243938

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 28, ilustra o sinal de um rolamento com defeito na pista interna. Note que a frequência característica de defeito tem o valor de 157,4 Hz para a rotação de 1730 rpm, que é diferente da frequência obtida no gráfico 154,8 Hz, isto justifica-se devido o deslizamento. Segundo Randall (2011), os deslizamentos que ocorrem no cálculo das frequências características é de 1 a 2%. Na prática essas frequências variam ligeiramente do valor calculado em função do deslizamento do elemento rolante provocado por efeitos como a variação de carga imposta ao mancal. Essa variação, mesmo pequena, provoca uma alteração significativa nas características do sinal. Por esse motivo, a análise de envelope extrai informações de diagnósticos frequentemente não disponíveis no sinal bruto. Na Figura 28, identifica-se também a frequência de rotação do eixo de 28,7 Hz.

Figura 28 - Sinal de um rolamento com defeito na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

Após a análise no domínio da frequência, fez-se uma análise estatística para efeito de comparação de um rolamento sem defeito e com defeito. O Quadro 2, mostra esta análise.

Quadro 2 - Características extraídas no domínio do tempo de um rolamento com defeito na pista interna.

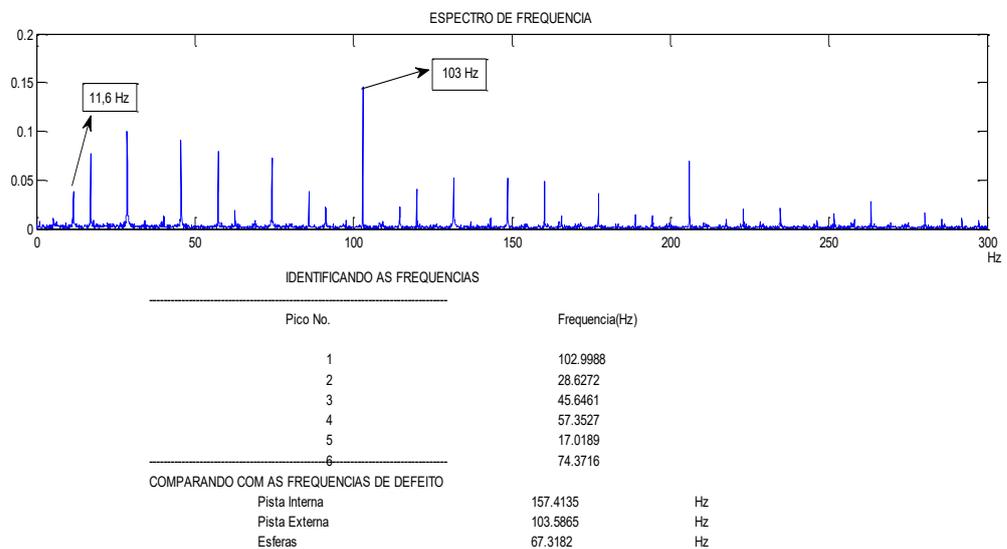
CARACTERÍSTICAS EXTRAIDAS DO DOMINIO DO TEMPO			
1 - Valor RMS =	0.31357	2 - Valor de Pico =	1.6667
3 - Fator de Crista =	5.3153	4 - Fator de Impulso =	7.4364
5 - Curtose =	5.2911		
CARACTERÍSTICAS DO SINAL DO MANCAL DE ROLAMENTO			
Item	Nome	Valor	
1-	Ressonância (Hz)	2850	
2-	Rotação do Eixo (Hz)	28.8333	
3-	Frequência de Passagem - Defeito na Pista Interna (Hz)	156.5088	
4-	Frequência de Passagem - Defeito na Pista Externa (Hz)	0	
5-	Frequência de Passagem - Defeito na Esfera(Hz)	0	
6-	Frequência de Amostragem (Hz)	12000	
7-	Comprimento do Sinal (pontos)	122917	

Fonte: Dados da pesquisa

Fazendo uma comparação de um rolamento sem defeito e um com defeito, verificou-se que ocorreu um aumento da energia do sinal (valor RMS) e da Curtose para um valor acima de 3, como era de se esperar no rolamento que apresenta defeito.

A Figura 29, mostra um sinal de rolamento com defeito na pista externa cujo valor foi de 103 Hz. Observe que neste tipo de assinatura aparece a presença da frequência da gaiola de 11,6 Hz.

Figura 29 - Sinal de um rolamento com defeito na pista externa



Fonte: Dados da pesquisa

O Quadro 3, apresenta os valores estatísticos do rolamento com defeito na pista externa.

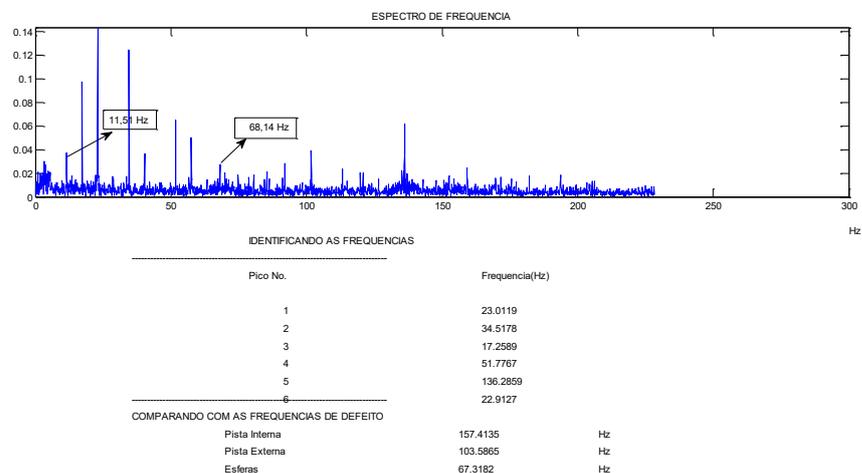
Quadro 3 - Características extraídas no domínio do tempo de um rolamento com defeito na pista externa.

CARACTERÍSTICAS EXTRAIDAS DO DOMINIO DO TEMPO			
1 - Valor RMS =	0.559	2 - Valor de Pico =	6.6494
3 - Fator de Crista =	11.8951	4 - Fator de Impulso =	24.4285
5 - Curtose =	23.542		
CARACTERÍSTICAS DO SINAL DO MANCAL DE ROLAMENTO			
Item	Nome	Valor	
1-	Ressonancia (Hz)	2850	
2-	Rotacao do Eixo (Hz)	29	
3-	Frequencia de Passagem - Defeito na Pista Interna (Hz)	0	
4-	Frequencia de Passagem - Defeito na Pista Externa (Hz)	103.5865	
5-	Frequencia de Passagem - Defeito na Esfera(Hz)	0	
6-	Frequencia de Amostragem (Hz)	12000	
7-	Comprimento do Sinal (pontos)	121991	

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 30, mostra a assinatura espectral de um rolamento que apresenta defeito na esfera. Quando o defeito está presente em um dos elementos rolantes, a identificação torna-se complexa. Verifica-se que os impulsos gerados sofrem influência da gaiola ( $F_g = 11,5$  Hz). Note que o sinal é bastante ruidoso, isto devido ao movimento da esfera e das pistas do rolamento que não estão estacionárias.

Figura 30 - Sinal de um rolamento com defeito na esfera



Fonte: Dados da pesquisa

Analisando o Quadro 4, verifica-se que embora a esfera apresente defeito em estágios avançados, os parâmetros estatísticos de curtose diminuíram consideravelmente, fato este que evidencia que a curtose não é um bom parâmetro para indicar a falha.

Quadro 4 - Características extraídas no domínio do tempo de um rolamento com defeito na esfera.

CARACTERISTICAS EXTRAIDAS DO DOMINIO DO TEMPO			
1 - Valor RMS =	2.1449	2 - Valor de Pico =	11.3449
3 - Fator de Crista =	5.2893	4 - Fator de Impulso =	7.0003
5 - Curtose =	3.8991		
CARACTERISTICAS DO SINAL DO MANCAL DE ROLAMENTO			
Item	Nome	Valor	
1-	Ressonancia (Hz)	2850	
2-	Rotacao do Eixo (Hz)	29	
3-	Frequencia de Passagem - Defeito na Pista Interna (Hz)	0	
4-	Frequencia de Passagem - Defeito na Pista Externa (Hz)	0	
5-	Frequencia de Passagem - Defeito na Esfera(Hz)	67.3182	
6-	Frequencia de Amostragem (Hz)	12000	
7-	Comprimento do Sinal (pontos)	120984	

Fonte: Dados da pesquisa

#### 4.1 RESULTADOS SIMULADOS NO BANCO DE DADOS DA (CWRU)

Inicialmente, realizou-se a implementação da técnica HFRT no banco de dados da (CWRU) com o objetivo de verificar se a técnica conseguiu identificar a falha no rolamento na pista interna, pista externa e esfera. Nesta análise o rolamento utilizado foi um rolamento rígido de esferas localizado no acionamento (*drive-end-bearing*). Os resultados foram simulados via Matlab utilizando os seguintes dados:

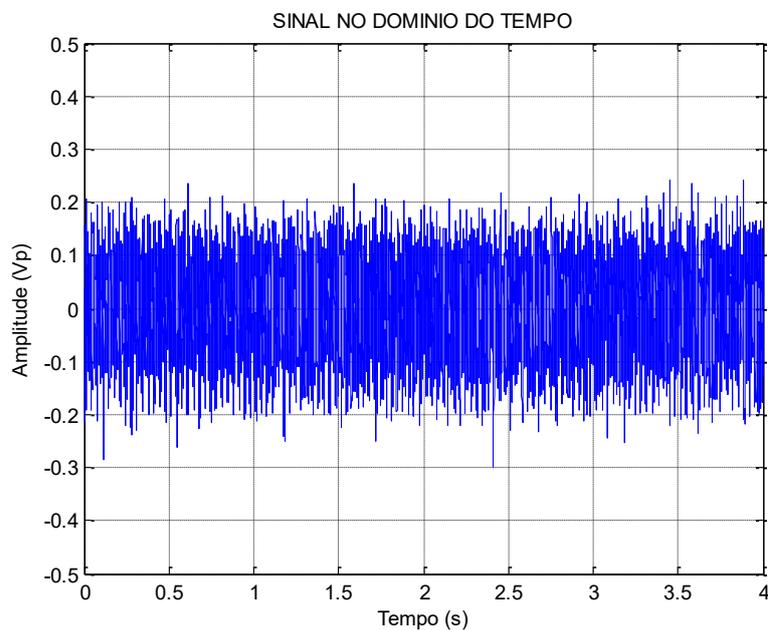
Diâmetro da falha da pista interna: 0,1778 mm

Carga do motor: 0 HP

Rotação do motor: 1797 rpm = 30 Hz

Inicialmente, foi simulado um sinal de um rolamento sem defeito, conforme mostra a Figura 31.

Figura 31- Sinal no domínio do tempo de um rolamento sem defeito



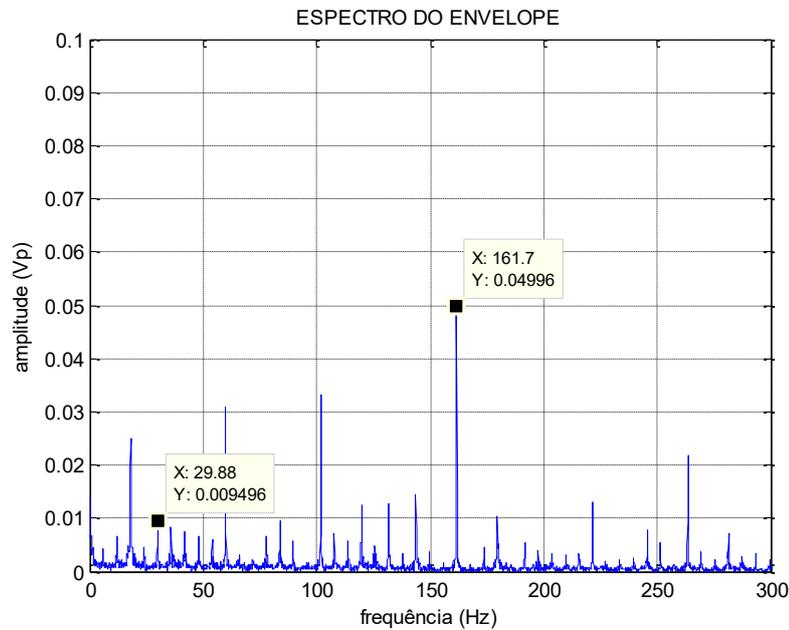
Fonte: Dados da pesquisa

Em seguida, realizou-se a simulação de um rolamento com defeito, e fez a caracterização da falha e o local onde a mesma ocorreu.

A Figura 32, mostra o resultado da simulação do rolamento caracterizando defeito na pista interna com uma frequência de 161,7 Hz, calculada analiticamente por meio das equações

das frequências características de falhas. Por meio da técnica do envelope identificou-se a frequência de defeito. O valor da curtose para este rolamento foi de 5,4.

Figura 32 - Característica do rolamento com defeito na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

Foi realizada uma nova simulação no banco de dados considerando agora os seguintes valores:

Diâmetro da falha da pista interna: 0,7112 mm

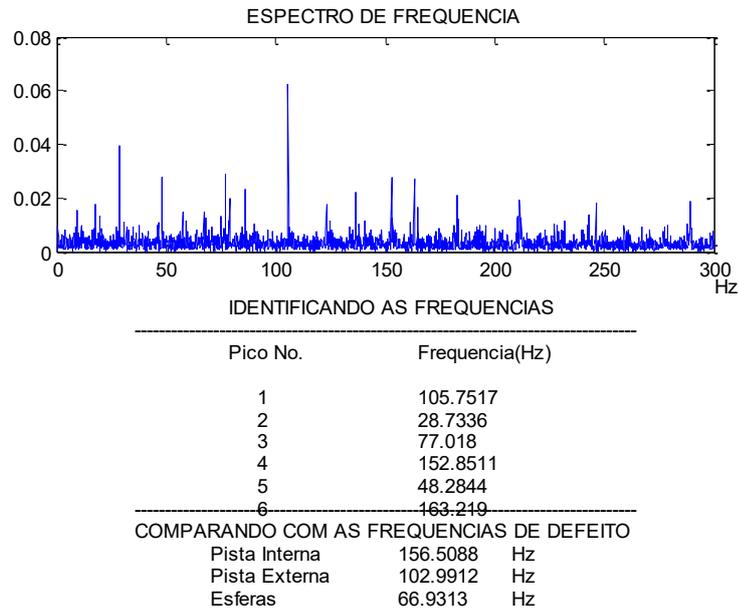
Carga do motor: 3 HP

Rotação do motor: 1730 rpm = 28,83 Hz

Frequência de defeito da Pista interna: FPI= 156,5 Hz

A Figura 33, mostra a simulação de um rolamento com defeito na pista interna, porém, a técnica HFRT não identificou a frequência de defeito para este rolamento, portanto se faz necessário a implementação de técnicas que venham evidenciar a frequência característica de falha do banco de dados da (CWRU).

Figura 33 - Espectro de frequência de um rolamento com defeito na pista interna

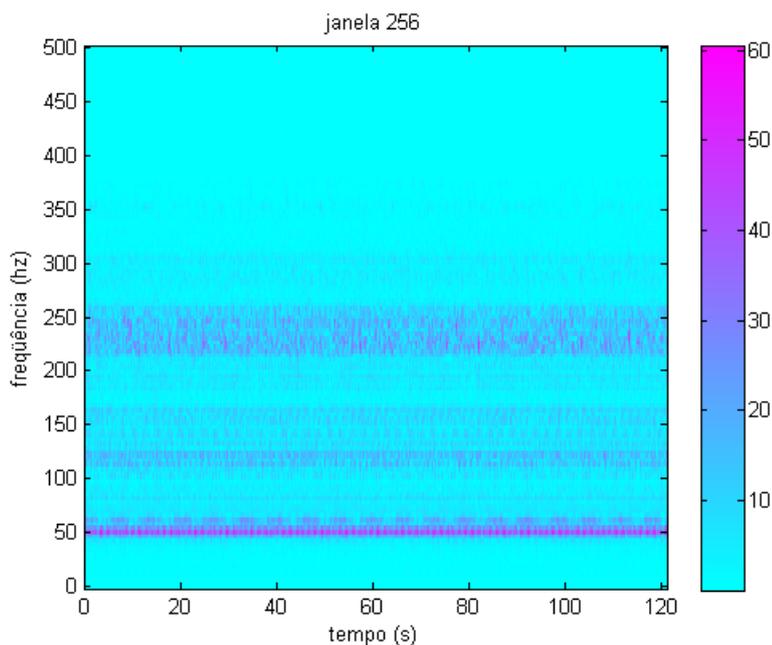


Fonte: Dados da pesquisa

Para encontrar a frequência característica de defeito não identificada, fez-se a implementação de uma técnica que fosse mais sensível ao sinal de vibração. Com isto utilizou-se a técnica STFT, obtendo os gráficos mostrados nas Figuras 34 e 35.

A Figura 34, apresenta o espectrograma de um rolamento com defeito na pista interna.

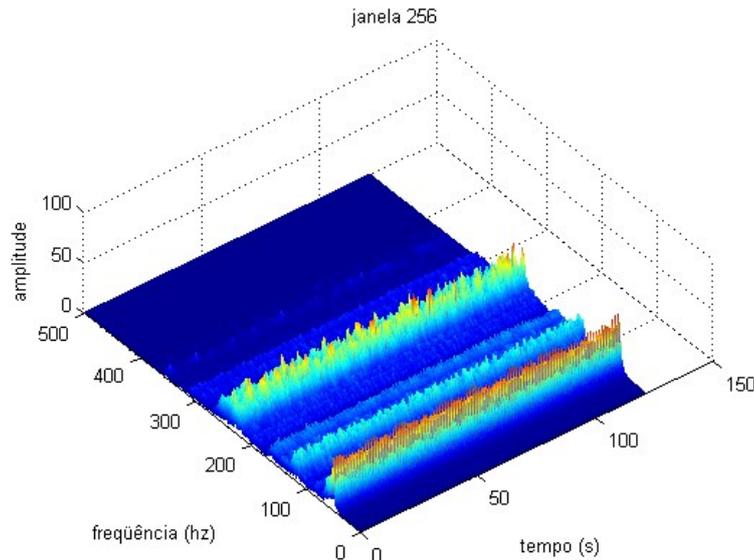
Figura 34 - Espectrograma de um rolamento com defeito na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

Na Figura 35, é mostrado a STFT-*Short-time Fourier Transform* de um rolamento com defeito na pista interna.

Figura 35 - STFT de um rolamento com defeito na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

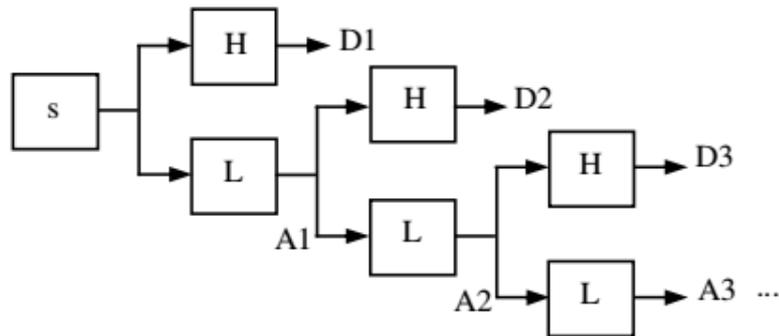
Note que, por meio da implementação da transformada STFT, é possível identificar a frequência característica de defeito  $FPI=156,5$  Hz. Existem algumas limitações associadas a STFT. Uma delas diz respeito à largura da janela, cujo valor é constante para todas as frequências, como mostra a Figura 35. Uma janela larga (maior número de amostras) permite uma boa resolução no domínio da frequência, mas resolução pobre no domínio do tempo, então, com a STFT não é possível obter uma boa resolução no domínio do tempo e da frequência, simultaneamente. Por este motivo se faz necessário o uso de uma outra técnica para solucionar este tipo de problema da STFT. Para resolver este problema optou-se em utilizar a Transformada de Wavelet, pois neste tipo de transformação não se usa janela fixa na análise.

Nesta seção, o método de diagnóstico utilizado para diagnosticar os defeitos nos rolamentos foi o da Transformada Discreta de Wavelet (DWT). Essa análise pode ser considerada como uma técnica de MRA (Análise de Multiresolução).

A Análise DWT realiza uma análise em diferentes escalas e resolução. Ela utiliza dois conjuntos de funções chamadas de funções de Escala e funções de Wavelet que estão associados com os filtros passa-baixa (L) e filtro passa-alta (H). O sinal discreto é convoluído com os filtros (L) e (H), resultando em dois vetores A1 e D1 num primeiro nível. O vetor gerado A1 é

chamado de aproximação e o vetor D1 é denominado de detalhe. A aplicação da transformada relativa à aproximação A1 faz com que esta seja decomposta em aproximação A2 e detalhe (D2) no segundo nível, e finalmente o sinal é decomposto no nível esperado. Todo o processo é mostrado na Figura 36.

Figura 36 - Decomposição principal da DWT

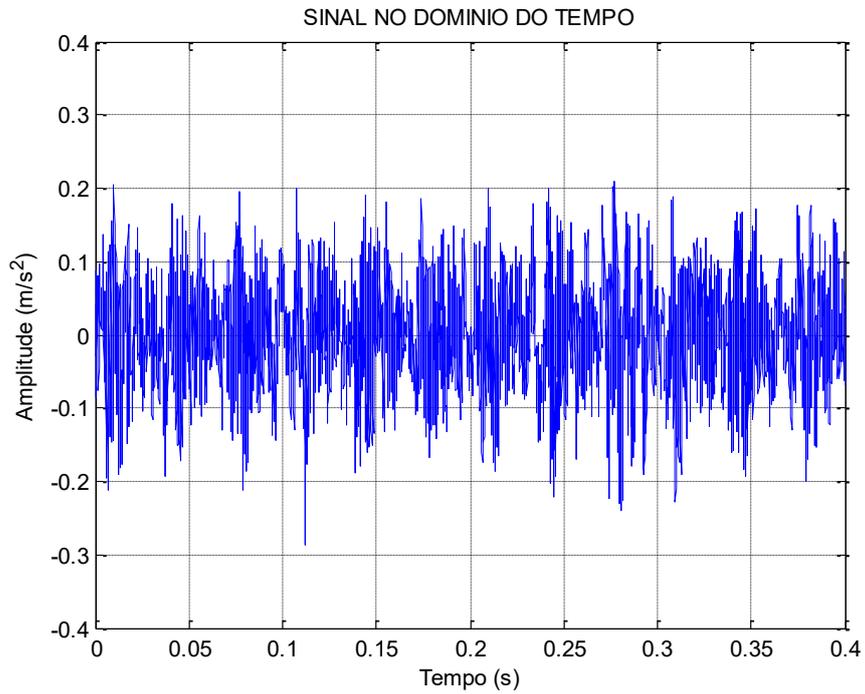


Fonte: (BENDJAMA et al., 2015)

A seleção da Wavelet apropriada é importante para a realização na análise do sinal. Existem muitas funções disponíveis que podem ser utilizadas na análise, tais como Haar, Daubechies, Meyer e Funções de Morlet.

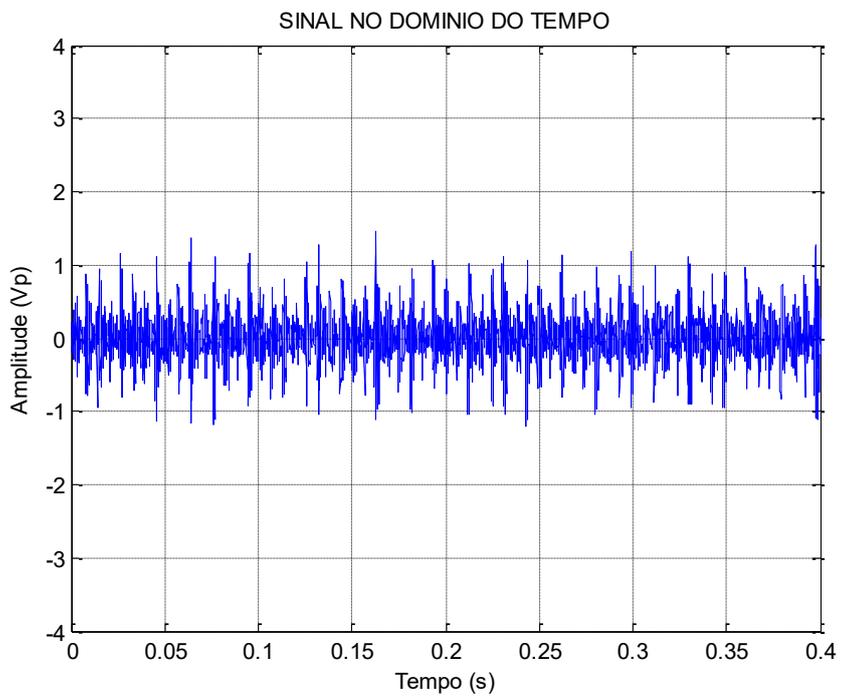
A análise de multiresolução foi aplicada para o diagnóstico do rolamento SKF rígido de esferas com defeito nas pistas interna e externa. Nesta análise, utilizou-se a Wavelet Daubeches de ordem 4(db4). O nível 4 de decomposição é utilizado para extrair os coeficientes de aproximação e detalhe a partir dos sinais de vibrações do banco de dados da Case Western Reserv University. O motor funciona com uma velocidade de 1.797 rpm (30 Hz). Às falhas foram introduzidos nos rolamentos de teste utilizando o método de usinagem por eletro erosão. Os diâmetros de defeitos das três falhas foram os seguintes: 0,018, 0,036, e 0,053 mm. A velocidade do motor durante os testes experimentais é 1.797-1.730 rpm. Cada rolamento foi testado sob as quatro potências diferentes: 0, 1,2,3 Hp. Para fazer uma avaliação do método proposto, inicialmente, utilizou-se uma potência de (0 Hp) com uma velocidade de rotação de 1797 rpm tanto para pista interna como externa. As Figuras 37, 38 e 39, representam respectivamente o sinal de vibração coletado no domínio do tempo do rolamento sem defeito, com defeito na pista interna e com defeito na pista externa.

Figura 37- Sinal no domínio do tempo de um rolamento sem defeito



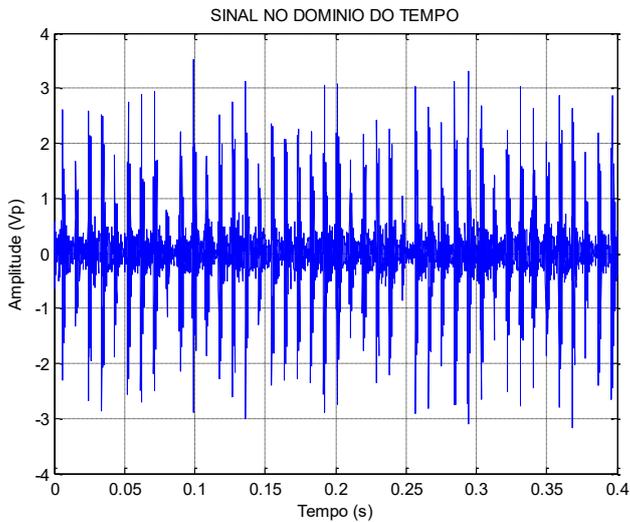
Fonte: Dados da pesquisa

Figura 38 - Sinal no domínio do tempo de um rolamento com defeito na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 39 - Sinal no domínio do tempo de um rolamento com defeito na pista externa

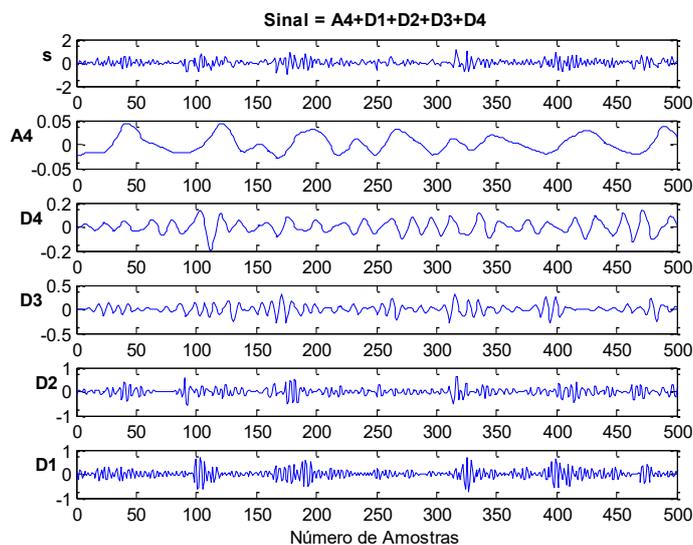


Fonte: Dados da pesquisa

Calculou-se, analiticamente, as frequências características de falhas dos rolamentos que foram determinadas na modelagem matemática. A frequência de defeito da pista interna foi de 162 Hz e a frequência de defeito da pista externa foi de 107 Hz. Para implementar a técnica inicialmente, realizou-se a decomposição do sinal no domínio do tempo para a pista interna e pista externa. As simulações destes sinais foram obtidas via Matlab.

A Figura 40, mostra a decomposição de Wavelet do sinal com defeito na pista interna utilizando Wavelet Daubechies de ordem 4 (db4).

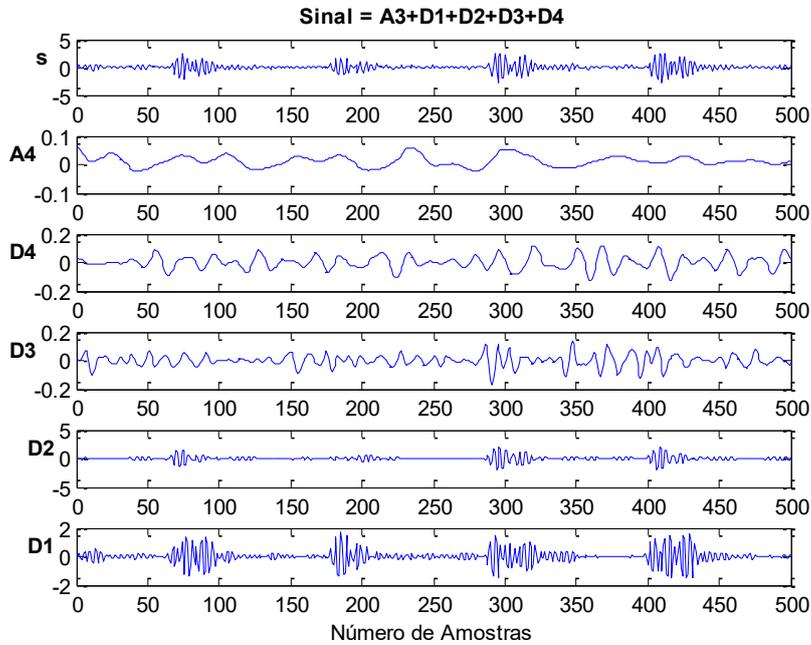
Figura 40 - Decomposição de Wavelet do rolamento com falha na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 41, mostra a decomposição de Wavelet do sinal com defeito na pista externa utilizando Wavelet Daubechies de ordem 4(db4).

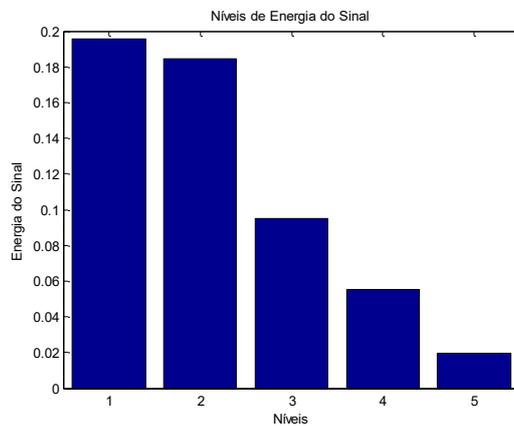
Figura 41- Decomposição de Wavelet do rolamento com falha na pista externa



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 42, apresenta os níveis de energia (valor RMS) de um rolamento com falha na pista interna, onde os níveis 1 a 4 representam o detalhe e o nível 5 é o nível da versão aproximada do sinal.

Figura 42 - Energia de distribuição (defeito na pista interna)

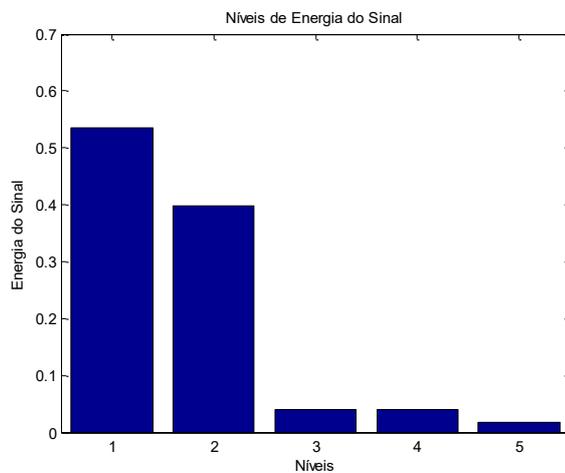


Fonte: Dados da pesquisa

Na Figura 42, verificou-se que a distribuição de energia usando db4, ocorre no primeiro nível de energia para a falha na pista interna. Portanto, escolhe-se o sinal de detalhe D1, pois o mesmo tem maior nível de energia.

Utilizou-se o mesmo procedimento para encontrar o nível de energia do rolamento com defeito na pista externa. A Figura 43, mostra que para a falha na pista externa o maior nível de energia foi no primeiro nível de energia.

Figura 43 - Energia de distribuição (defeito na pista externa)

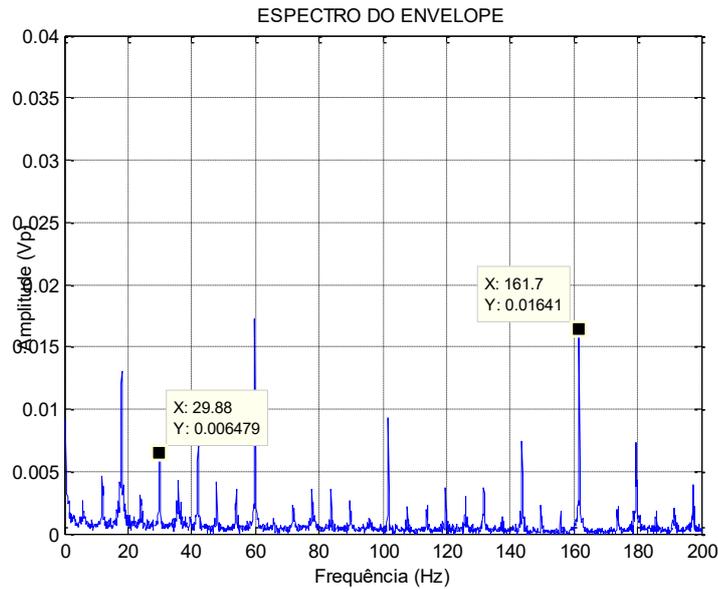


Fonte: Dados da pesquisa

Realizadas as simulações das decomposições, encontrou-se o nível de decomposição ótimo por meio do nível de energia dos sinais de cada sinal obtido na decomposição dos rolamentos com falha na pista interna e pista externa que foi o nível D1.

A Figura 44, ilustra o espectro do envelope do rolamento com falha na pista interna. O espectro mostra claramente os componentes de frequência, evidenciando a frequência de rotação (29,8 Hz), e a frequência característica de defeito da pista interna (161,7 Hz).

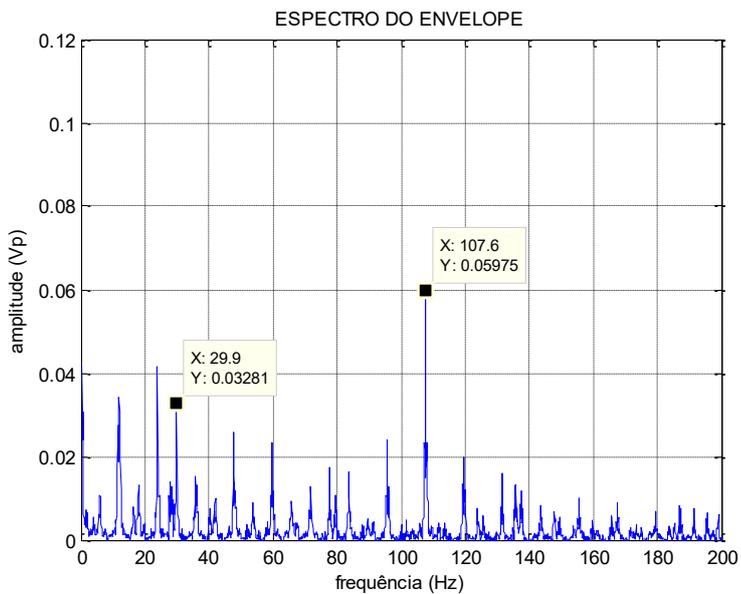
Figura 44 - Espectro de um rolamento com defeito na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 45, ilustra o espectro do envelope do rolamento com falha na pista externa, evidenciando uma frequência característica de defeito da pista interna (107,6 Hz).

Figura 45- Espectro de um rolamento com defeito na pista externa



Fonte: Dados da pesquisa

O método apresentado tem o objetivo de melhorar o diagnóstico de falhas rolamento baseado na Wavelet. Isso é adaptado para obter várias séries de dados em diferentes resoluções

pela decomposição Wavelet e calcular a energia de um sinal, a fim de selecionar o nível de decomposição ideal, para um possível diagnóstico. Esse método pode ser de grande melhoria e precisão no diagnóstico. Assim, o proposto método é uma abordagem aplicada com sucesso para monitoramento de vibração.

#### 4.2 SIMULAÇÃO REALIZADA NO BANCO DE DADOS DATA/FEG

Os resultados foram obtidos por meio da simulação via Matlab aplicados ao banco de dados da bancada da UNESP. Inicialmente utilizou-se a técnica HFRT, e em seguida implementou-se a técnica STFT para efeito de comparação, e finalmente, utilizou-se a técnica de Wavelet.

As características geométricas e frequências de defeito do rolamento rígido de esferas NSK 6205 utilizado na simulação, estão mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados geométricos e frequências de defeitos

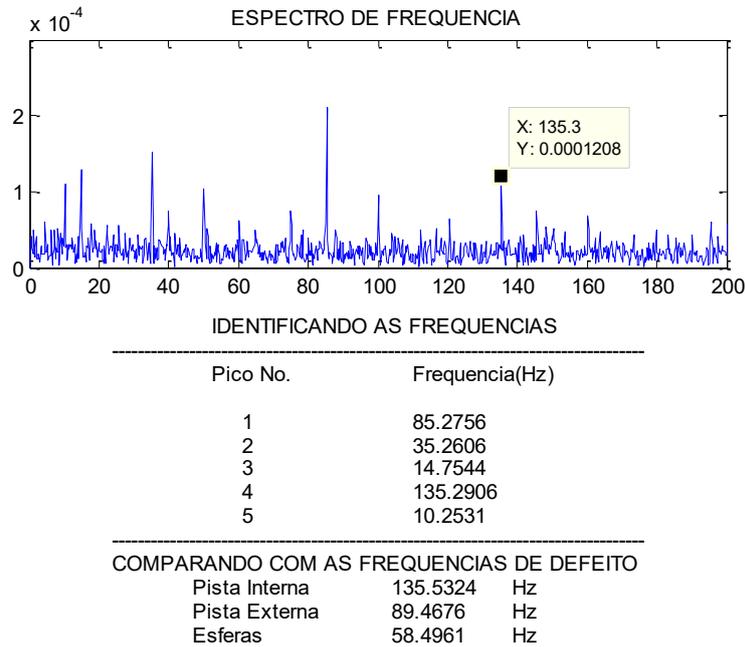
<b>Rolamento NSK 6205</b>	<b>Dados geométricos</b>	<b>Frequências de defeito</b>
Diâmetro da pista interna	31,04 mm	$f_{pi}= 89,47$ Hz
Diâmetro da pista externa	46,72 mm	$f_{pe}=135,5$ Hz
Diâmetro da Esfera	7,96 mm	$f_{es}= 58,5$ Hz
Número de Esferas	9 esferas	$f_g=9,94$ Hz

Fonte: Dados da pesquisa

Para o cálculo das frequências características do rolamento utilizou-se a frequência de rotação do eixo a 1500 rpm ( $f_r=25$  Hz) e o ângulo de contato ( $\alpha=0^0$ ). A frequência de amostragem foi de 10 kHz e o número de amostra foi de 40.000 pontos.

A Figura 46, ilustra a simulação de um rolamento com defeito na pista interna, onde utilizou-se a técnica do envelope para a caracterização da frequência de defeito.

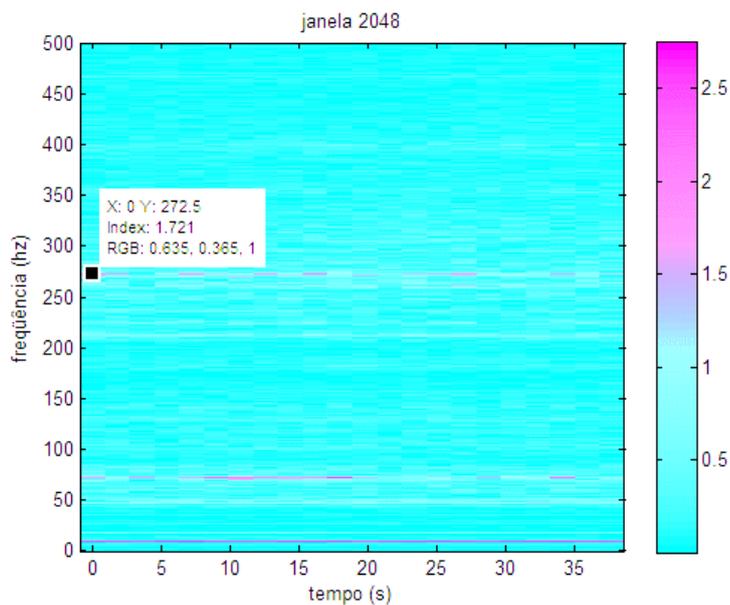
Figura 46 - Espectro do rolamento com defeito na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

Na Figura 47, foi aplicada a técnica STFT e foi observado por meio do espectrograma de frequência o espectro de um rolamento com defeito na pista interna. Note que o defeito é identificado na frequência  $2xFPI$ . No espectrograma não se identificou a frequência característica  $FPI=135$  Hz que foi calculada analiticamente.

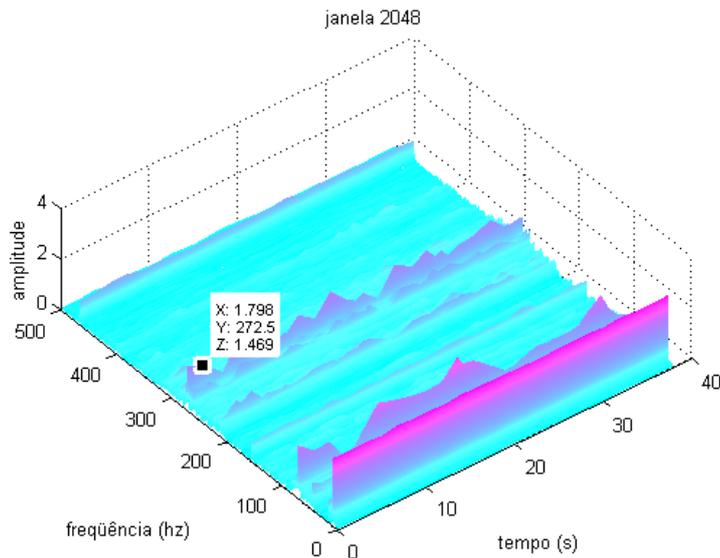
Figura 47 - Espectrograma do rolamento com defeito na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 48, ilustra o espectro de frequência, sendo detectadas as variações de frequências do rolamento com defeito na pista interna por meio da aplicação da STFT.

Figura 48 - STFT de um rolamento com defeito na pista interna

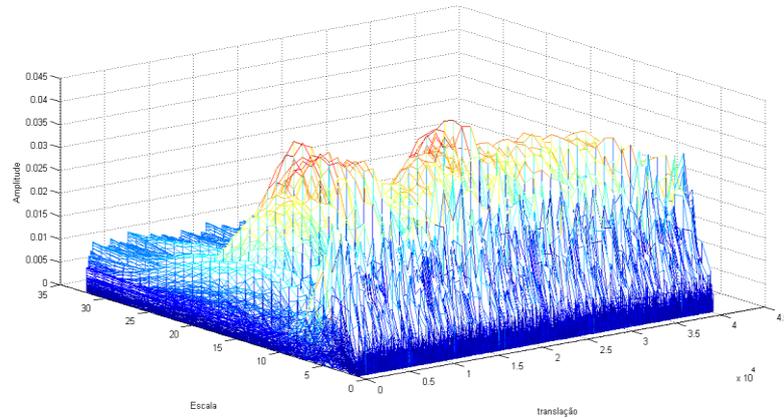


Fonte: Dados da pesquisa

Realizou-se a simulação utilizando a técnica da transformada de Wavelet utilizando, onde a Wavelet escolhida foi a transformada de Wavelet contínua (CWT). A Figura 49, ilustra o gráfico tridimensional do valor dos coeficientes calculados aplicados a CWT.

Nesse gráfico, observa-se que as escalas menores correspondem às frequências maiores, isto é a frequência diminui à medida que a escala aumenta. Note que é possível interpretar a propriedade de resolução, pois neste tipo de transformada não se tem uma resolução constante para o tempo e a frequência, na transformada de Wavelet para altas frequências tem-se uma boa resolução no tempo e uma baixa resolução em frequência, entretanto, para baixas frequências tem-se o contrário, isto é para baixas frequências tem-se pobre resolução no tempo e boa resolução em frequência.

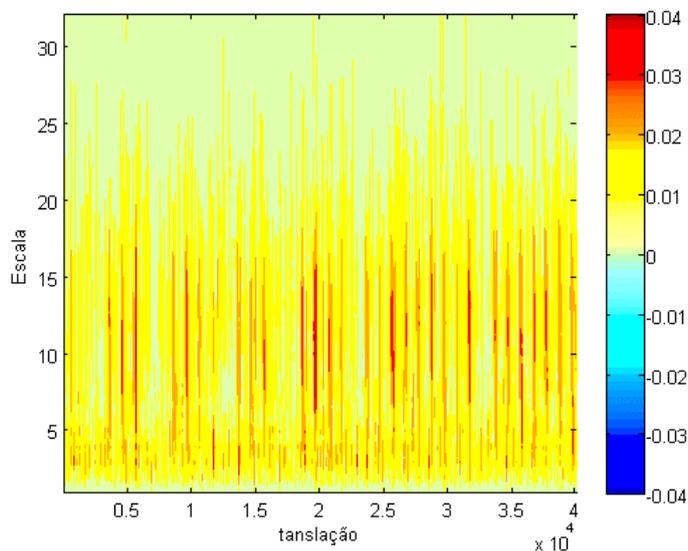
Figura 49 - Gráfico tridimensional do valor dos coeficientes calculados aplicando a CWT



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 50, mostra o espectrograma relativo a implementação da transformada de Wavelet contínua relativo aos cálculos dos coeficientes da CWT. No espectrograma verifica-se de forma mais clara a questão da resolução explicada anteriormente.

Figura 50 - Espectrograma dos coeficientes calculados da CWT

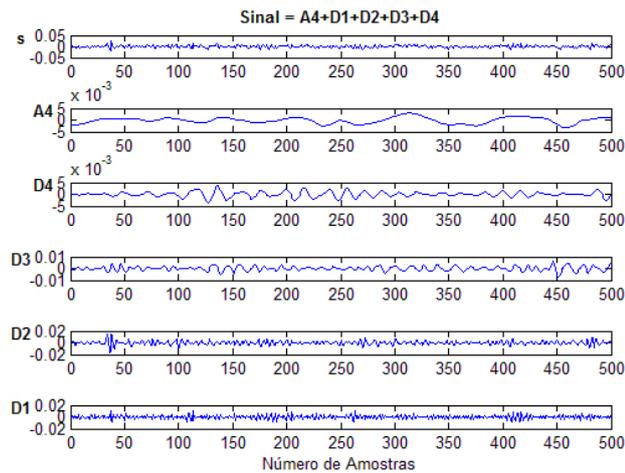


Fonte: Dados da pesquisa

Em seguida, fez-se uma análise utilizando a decomposição do sinal para encontrar o melhor nível de decomposição do sinal de forma similar ao que foi aplicado no banco de dados ao da CWRU.

O sinal do rolamento com defeito na pista interna foi decomposto em níveis de decomposição conforme mostra a Figura 51. Para tal análise utilizou-se a transformada de Wavelet discreta Wavelet Daubechies de ordem 4 (db4). Os níveis foram decompostos em aproximações e detalhes.

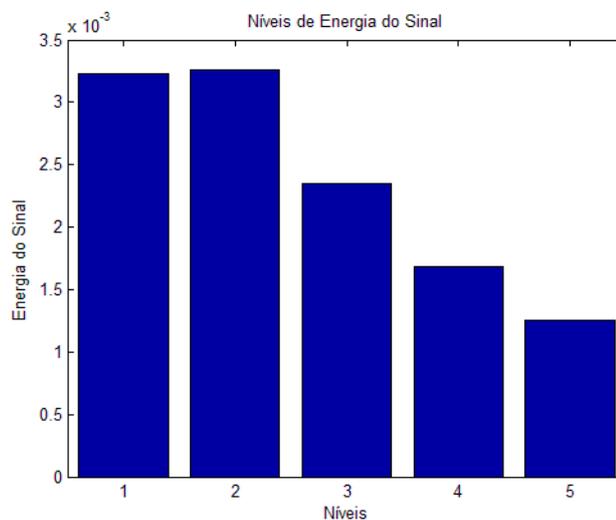
Figura 51- Decomposição de Wavelet do rolamento com falha na pista interna (FEG)



Fonte: Dados da pesquisa

A partir do sinal decomposto em detalhes e aproximação, calcula-se o valor RMS de cada sinal obtido para encontrar o maior nível de energia. A Figura 52, mostra que o maior nível de energia é o nível (D2).

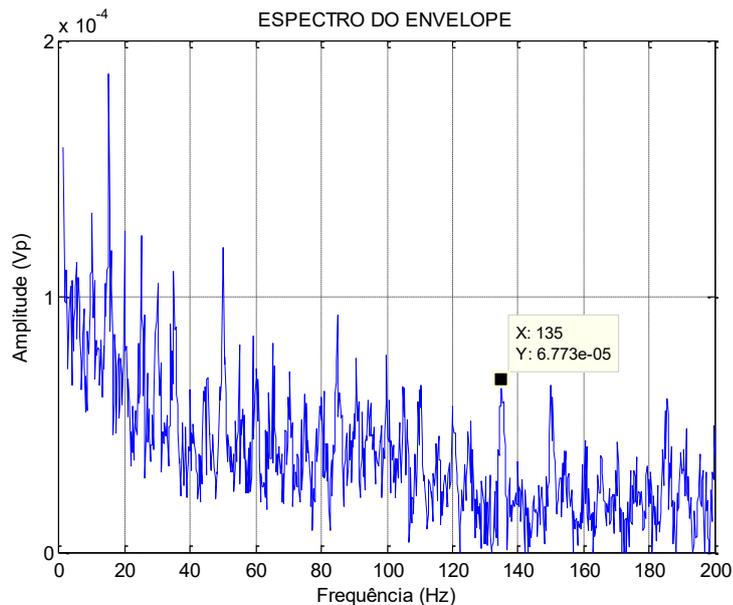
Figura 52 - Nível de energia do sinal do rolamento com defeito na pista interna (FEG)



Fonte: Dados da pesquisa

Após esta análise, com o nível ótimo de decomposição escolhido, faz-se a implementação da técnica HFRT no sinal do nível de decomposição (D2). A Figura 53, mostra o sinal de um rolamento com defeito na pista interna simulado no banco de dados da DATA/FEG.

Figura 53 - Sinal do rolamento com defeito na pista interna (FEG)



Fonte: Dados da pesquisa

A técnica HFRT associada com a Wavelet proporcionou um bom resultado, além de reduzir o tempo do processamento do sinal, foi possível identificar a frequência característica de defeito da pista interna do rolamento com maior precisão.

#### 4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CURTOSE ESPECTRAL NO BANCO DE DADOS DA CWRU

Inicialmente, foram realizadas simulações no banco de dados da CWRU, no qual foi implementado a técnica da curtose espectral e o uso de um Kurtogram rápido para determinar a região de impulsividade, frequência central e banda de frequência do rolamento rígido de esferas com defeito localizado no acionamento (*Drive end*) do sistema experimental.

Para a comprovação da eficácia do método da curtose espectral, foram realizadas simulações em rolamentos com defeitos na pista interna, pista externa e nas esferas. Por meio das simulações observou-se que o local de maior dificuldade para identificar as falhas induzidas ocorreu nas esferas do rolamento, em que se utilizou o método clássico, porém por meio da

técnica da curtose espectral associada a técnica do envelope foi possível identificar claramente as falhas nos elementos constituintes do rolamento. A principal ferramenta para a maioria das técnicas de diagnóstico de rolamentos é o espectro de envelope, o que revela a frequência de repetição da série resposta ao impulso de um rolamento "frequências de falhas", bem como a natureza de qualquer modulação, que decorre tanto da passagem da falha dentro e fora da zona de carga, e a partir da variação no caminho de transmissão de falha para o ponto de medição (geralmente fixo). As frequências características de defeito para a pista externa, pista interna, esfera e gaiola são determinadas por meio das equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4).

$$\text{Frequência de Defeito na Pista Externa: } f_{dpe} = \frac{nf_r}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos\emptyset \right) \quad (4.1)$$

$$\text{Frequência de Defeito na Pista Interna: } f_{dpi} = \frac{nf_r}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos\emptyset \right) \quad (4.2)$$

$$\text{Frequência de Defeito na Esfera: } f_{de} = \frac{Df_r}{2d} \left( 1 + \left[ \frac{d}{D} \cos\emptyset \right]^2 \right) \quad (4.3)$$

$$\text{Frequência da Gaiola: } f_g = \frac{f_r}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos\emptyset \right) \quad (4.4)$$

Onde,

$f_r$  = frequência de rotação do eixo (rpm)

$n$  = número de esferas

$D$  = Diâmetro Pitch do rolamento

$d$  = diâmetro da esfera

$\emptyset$  = ângulo de contato

Essas frequências de falha são com base em relações cinemáticas assumindo que não há deslizamento, mas sempre ocorre algum deslizamento, de modo que uma variação da frequência calculada de até 1-2% segundo (RANDALL, 2011). A Tabela 12, mostra os valores geométricos e as frequências características do rolamento com defeitos calculadas por meio das equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4), respectivamente.

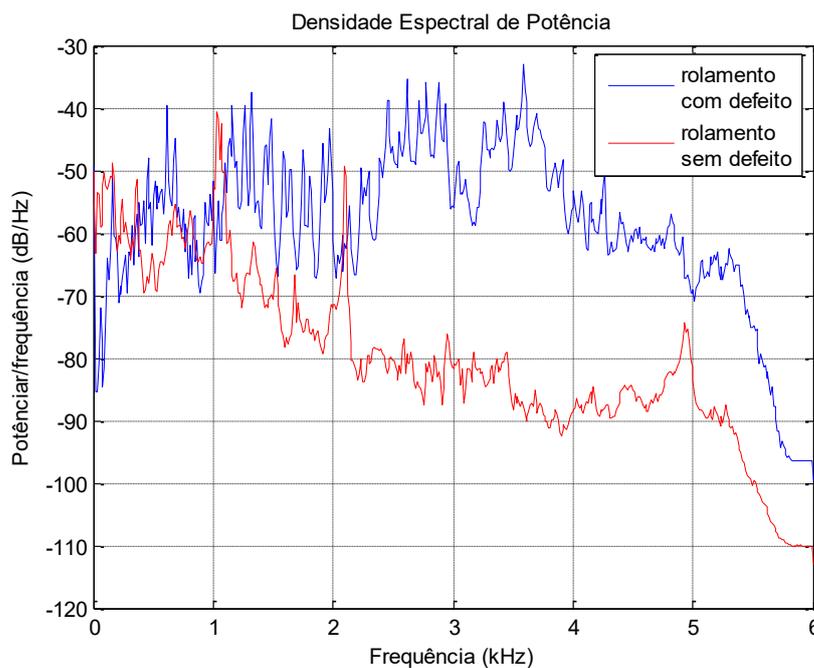
Tabela 12 - Informação do rolamento do acionamento (*Drive End*)

Rolamento	SKF 6205-2RS JEM			
Geometria (mm)	Diâmetro externo	51,99		
	Diâmetro interno	25,012		
	Diâmetro <i>Pitch</i>	38,5		
	Diâmetro da esfera	7,94		
	Número de esferas	9		
	Ângulo de contato	0°		
Frequências de defeito [Hz]	$f_{dpe}$	$f_{dpi}$	$f_{de}$	$f_g$
	107,37	162,57	69,52	11,89

Fonte: Autoria própria

Realizou-se uma análise da densidade espectral de potência (PSD) para verificar a região que apresenta a melhor relação sinal ruído no rolamento com defeito na pista interna. A Figura 54, mostra a (PSD) de um rolamento sem defeito e com defeito na pista interna. Por meio desta análise, verifica-se que a região de maior ressonância é na faixa de 3 a 4 kHz. Nessa faixa encontra-se a banda de frequência ótima para a realização da demodulação.

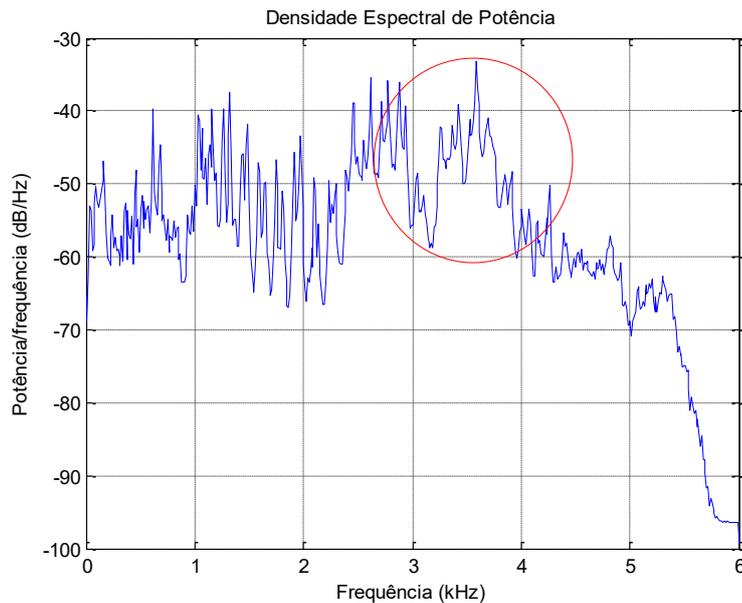
Figura 54 - Espectro dos rolamentos sem falha e com falha na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 55, mostra a diferença em dB em condição normal (não defeituosa) e o espectro de dB do sinal defeituoso na pista interna. Isto é realizado para indicar a banda de frequência onde a falha ocorre, e é amplamente utilizado na monitoração de vibração desde que se tenham alguns dados históricos disponíveis. A Figura 55, mostra claramente a região de melhor relação sinal ruído indicada com um círculo vermelho.

Figura 55 - Diferença em dB dos espectros entre o rolamento bom e com defeito

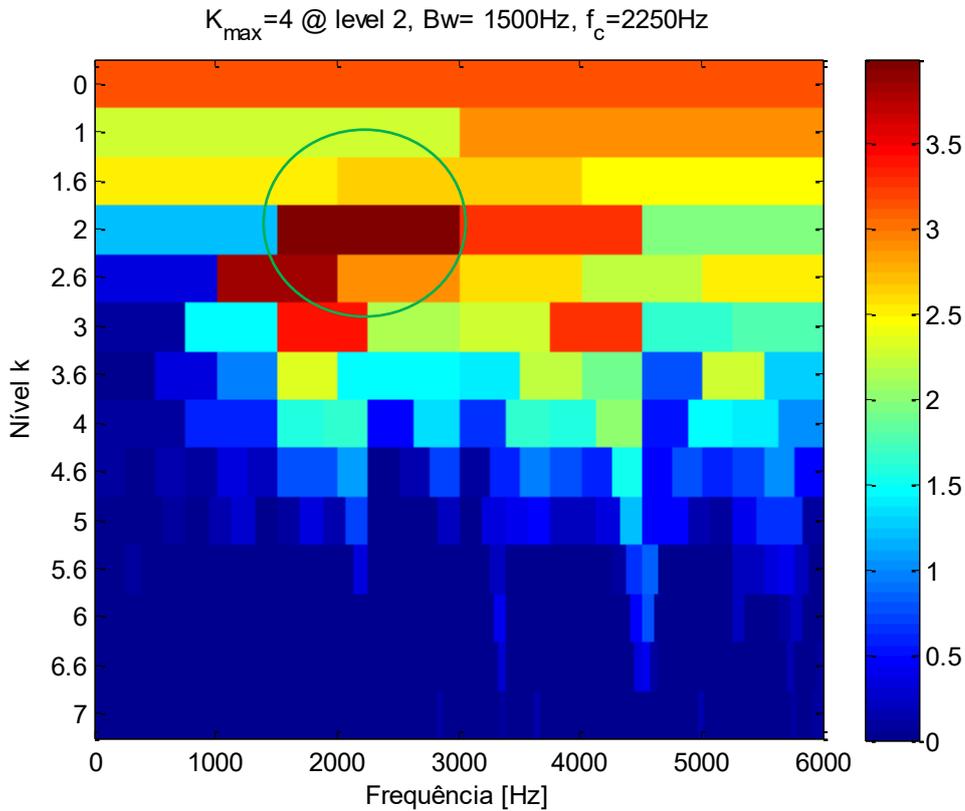


Fonte: Dados da pesquisa

A partir da escolha da região de ressonância, encontra-se a frequência central por meio do Kurtogram rápido e o método da spectral curtose, utilizando a curtose máxima, isto é região de maior impulsividade do sinal do rolamento com defeito. A simulação para o rolamento com defeito na pista interna foi realizada utilizando a rotação do eixo de 1.797 rpm e a falha com o menor diâmetro de 0,18 mm.

A Figura 56, mostra o Kurtogram rápido do rolamento com defeito na pista interna. Analisando o Kurtogram rápido, verifica-se que a frequência central é  $f_c=2.250$  Hz e a banda lateral  $B_w= 1.500$  Hz. A curtose máxima calculada por meio do algoritmo utilizado foi  $k_{max}= 4$  e nível 2. Esses parâmetros foram calculados para a implementação da técnica do envelope. A região para a realização da demodulação é destacada pelo círculo verde.

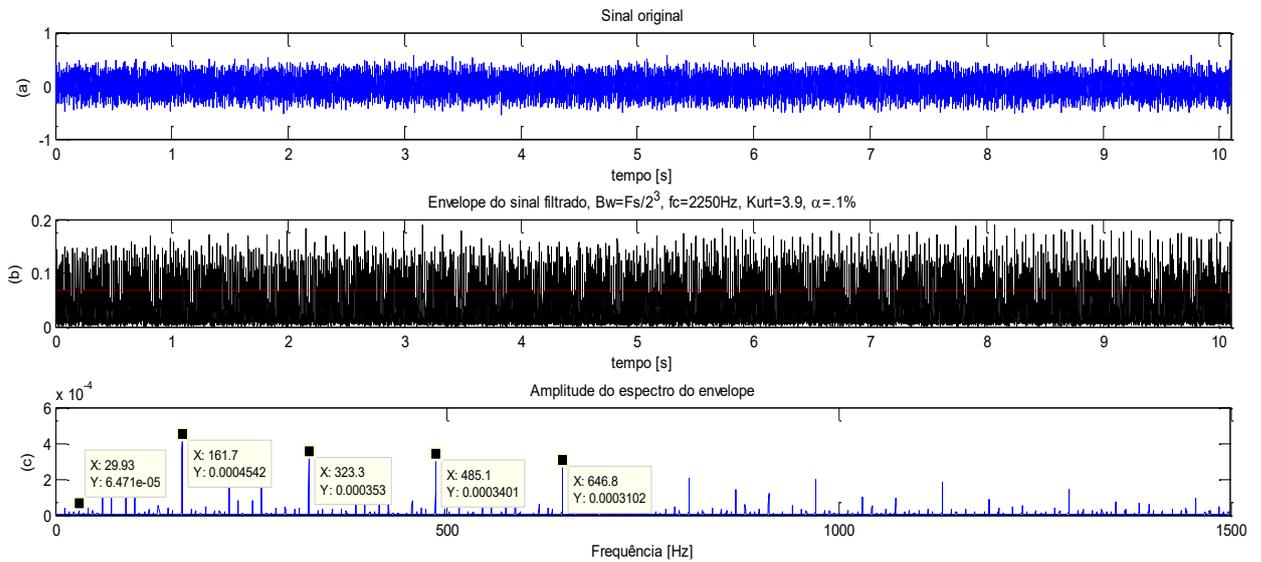
Figura 56 - Kurtogram da amostra de dados



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 57, mostra o espectro do sinal filtrado utilizando um filtro passa-banda. A Figura 567(a), mostra o sinal original no domínio do tempo do rolamento com defeito na pista interna. A Figura 57 (b), mostra o envelope do sinal filtrado e a Figura 57 (c), mostra o sinal no domínio da frequência, evidenciando de forma clara a frequência característica de defeito da pista interna calculada pela equação (5.2). Nesse gráfico, note que aparece a frequência de falha  $f_{dpi}= 161,7$  Hz e seus harmônicos ( $2Xf_{dpi}$ ), ( $3Xf_{dpi}$ ), ( $4Xf_{dpi}$ ) e a frequência de rotação do eixo.

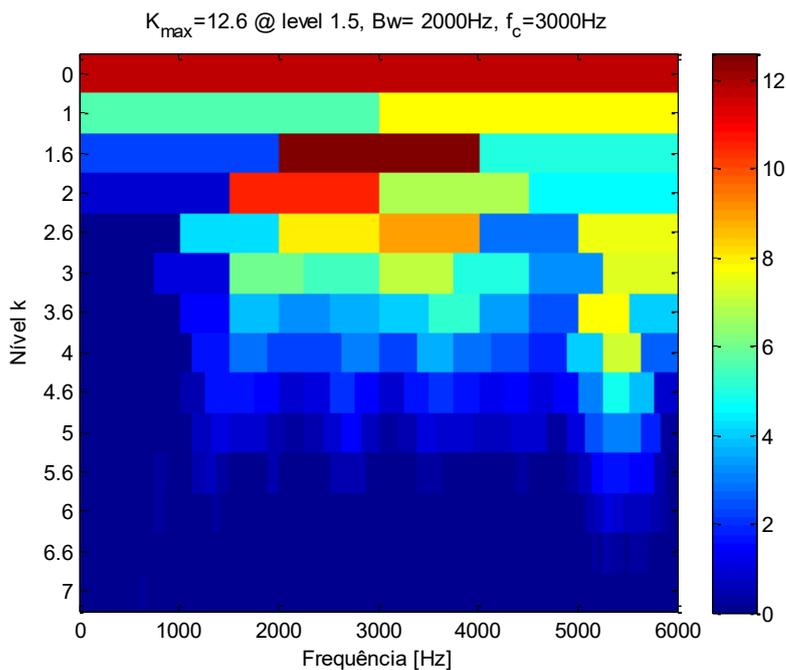
Figura 57 - (a) Sinal original, (b) Envelope do sinal filtrado, (c) Amplitude do espectro do envelope



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 58, mostra o Kurtogram rápido para um rolamento com defeito na pista externa. A simulação foi realizada para a condição de menor diâmetro da falha e a maior rotação do eixo. A taxa de aquisição utilizada neste experimento foi de 12 kHz. Por meio da simulação obteve-se uma banda de frequência  $Bw = 2.000$  Hz e a frequência central  $f_c = 3.000$  Hz.

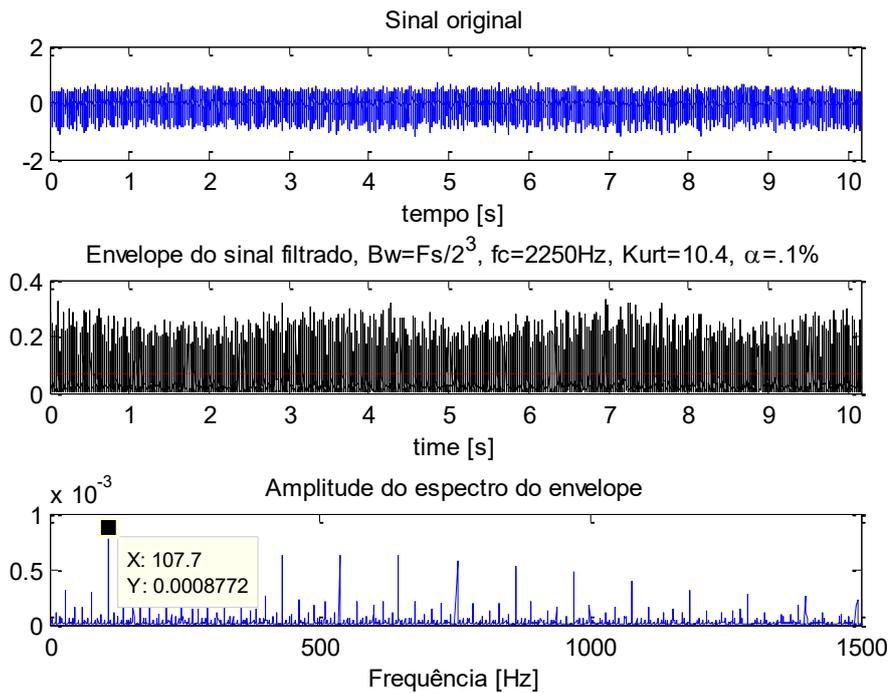
Figura 58 - Kurtogram rápido do rolamento com defeito na pista externa



Fonte: Dados da pesquisa

Por meio da simulação obteve-se uma frequência característica de defeito da pista externa foi de 107,7 Hz. A Figura 59, mostra o sinal original, o envelope do sinal filtrado e o espectro do envelope otimizado.

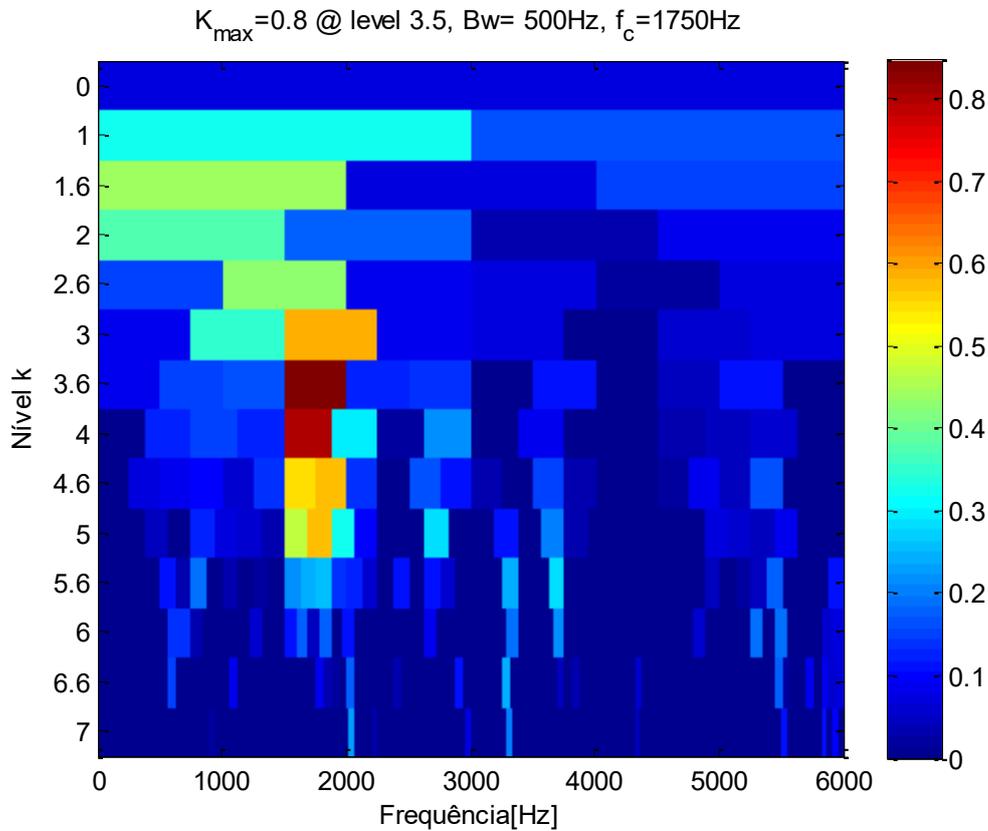
Figura 59 - Simulação de um rolamento com defeito na pista externa



Fonte: Dados da pesquisa

Após a simulação da análise de assinatura para a pista interna e pista externa, extraiu-se as características de falha para o rolamento com defeito na esfera. Esta análise se torna difícil quando se utiliza métodos clássicos, pois os sinais são muito ruidosos, fato este que torna a análise complicada, e além do mais, tem-se movimentos relativos entre as esferas e as pistas do rolamento. Por meio da técnica da curtose espectral foi possível realizar a análise de assinatura de forma eficaz. A Figura 60, mostra o Kurtogram rápido para o rolamento com defeito na esfera.

Figura 60 - Kurtogram rápido do rolamento com defeito na esfera

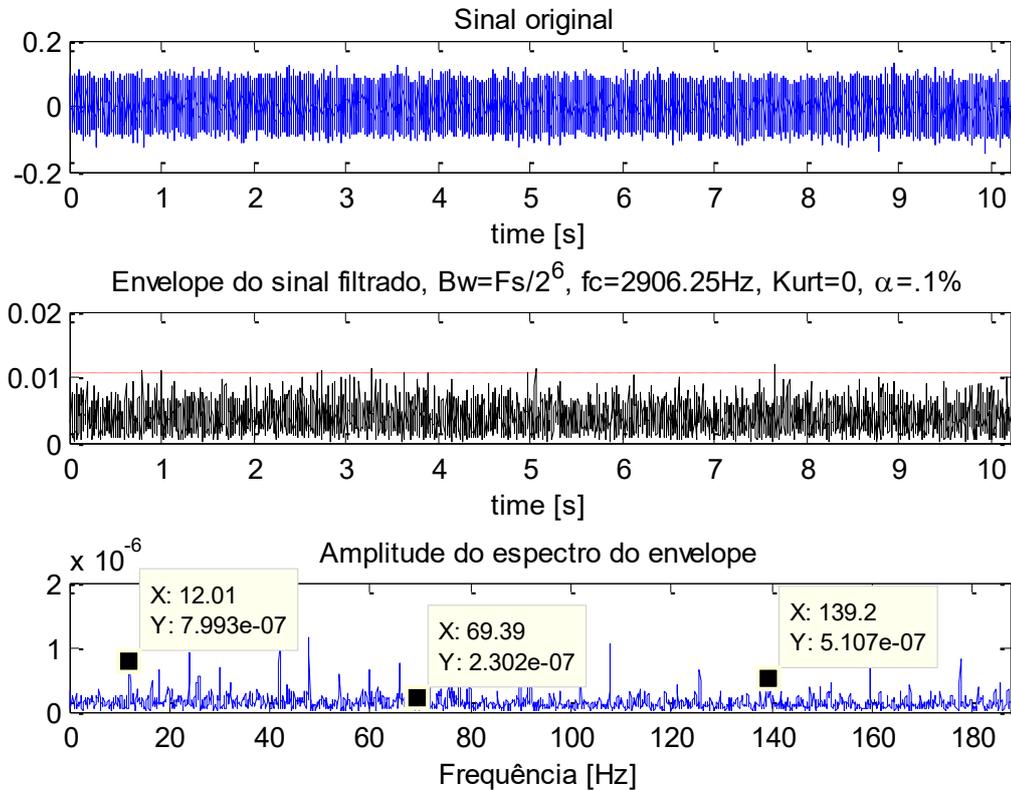


Fonte: Dados da pesquisa

Na simulação realizada os parâmetros utilizados para se determinar com uma maior precisão as frequências características do rolamento com defeito na esfera foram os seguintes: Frequência central  $f_c=2.906$  Hz e uma banda lateral Bw= 500 Hz.

A Figura 61, apresenta o sinal de vibração com defeito na esfera, onde encontrou-se a frequência característica de falha da esfera  $f_{de}=69,39$  Hz e seu harmônico  $2*f_{de}$ . Note que no sinal obtido tem-se a influência da frequência da gaiola de aproximadamente 12Hz, conforme mostra o pico evidenciado na Figura 61.

Figura 61- Simulação de um rolamento com defeito na esfera



Fonte: Dados da pesquisa

Verificou-se que os registros foram facilmente diagnosticados por meio da técnica da curtose espectral associada a técnica do envelope. Utilizando a curtose espectral foi possível determinarmos de forma automática a região de maior impulsividade no domínio da frequência, a frequência central e banda ótima para projetar o filtro passa-baixa. A determinação precisa da frequência central é de extrema importância para o sucesso da técnica do envelope. A técnica curtose espectral combinada com a técnica HFRT proporcionou um resultado satisfatório para caracterizar as frequências de defeitos nos rolamentos dos experimentos realizados em máquinas rotativas. A curtose espectral definida no domínio da frequência para monitoramento e detecção de falha em rolamentos é uma ferramenta promissora para análise de sinais não estacionários.

#### 4.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO CURTOSE ESPECTRAL NO BANCO DE DADOS DA FEG/UNESP

Inicialmente, realizou-se a análise no banco de dados da FEG/UNESP calculando as frequências características de defeito para o rolamento com defeito na pista externa, interna, esferas e gaiola determinadas por meio das equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4).

A Tabela 13, mostra as informações do rolamento do experimento realizado na UNESP (DATA/FEG).

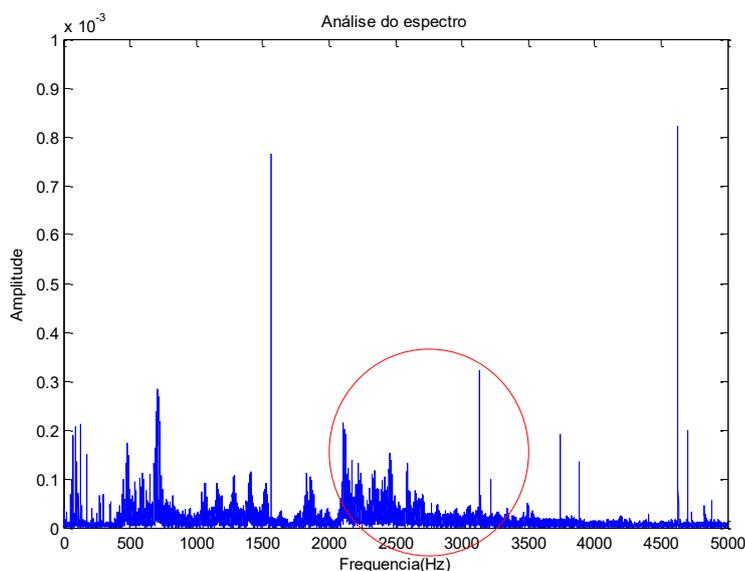
Tabela 13 - Informação do rolamento do experimento DATA/FEG

<b>Rolamento</b>				
<b>Geometria (mm)</b>	Diâmetro externo		46,72	
	Diâmetro interno		31,04	
	Diâmetro <i>Pitch</i>		38,90	
	Diâmetro da esfera		7,96	
	Número de esferas		9	
	Ângulo de contato		0 <sup>0</sup>	
<b>Frequências de defeito [Hz]</b>	$f_{dpe}$	$f_{dpi}$	$f_{de}$	$f_g$
	89,48	135,5	58,53	9,94

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 62, mostra o espectro do sinal do rolamento com defeito na pista externa. O círculo em vermelho indica a região de ressonância a ser utilizada na técnica do envelope do sinal. Note que frequência da região de ressonância está entre 2,5 a 3,5 kHz com uma frequência central em torno de 3,1 kHz.

Figura 62 - Espectro do sinal do rolamento com defeito na pista externa

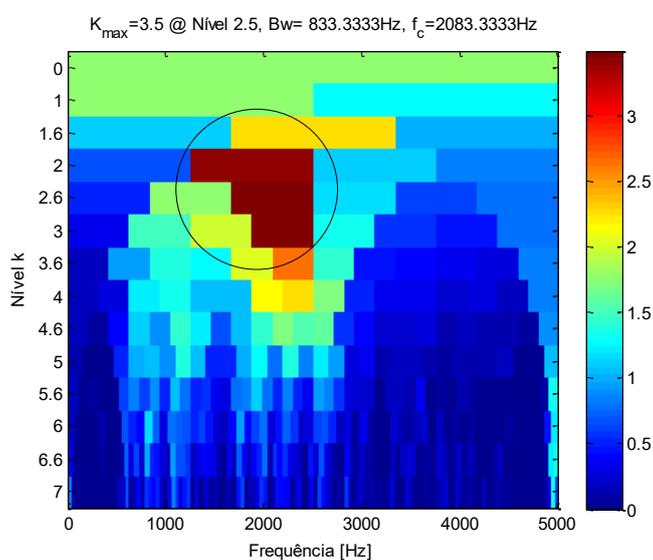


Fonte: Dados da pesquisa

A existência de picos e a ressonância induziram à suposição de que o sinal contém vários impulsos, o que pode ser melhor detectado com a aplicação da curtose espectral.

O algoritmo foi implementado utilizando Matlab para o cálculo do Kurtogram rápido. A Figura 63, apresenta o Kurtogram que contém um valor máximo de curtose de 3,5 com uma frequência central em torno de 2 kHz. A Figura 63, apresenta o Kurtogram do rolamento com defeito na pista externa.

Figura 63 - Kurtogram do rolamento com defeito na pista externa DATA/FEG

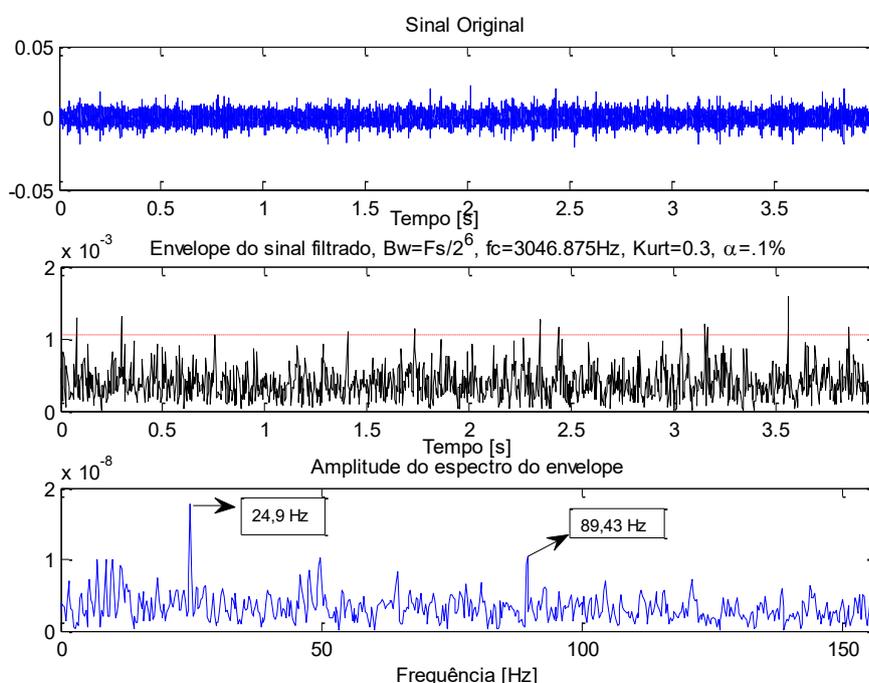


Fonte: Dados da pesquisa

Na implementação da técnica do envelope combinado com a espectral curtose utilizou-se para obtenção do sinal a frequência central de 3kHz e o nível 5 de decomposição. A partir da frequência selecionada, obteve-se um melhor resultado na técnica, tornando-a mais sensível aos impulsos gerados pelos impactos ocasionados na pista externa do rolamento.

A Figura 64, apresenta o espectro do sinal em que é possível identificar a frequência de rotação do eixo  $f_r=24,9$  Hz e a frequência de defeito da pista externa 89,43 Hz. Por meio da combinação da curtose espectral e envelope encontrou-se graficamente a frequência característica de defeito muito próxima da frequência calculada.

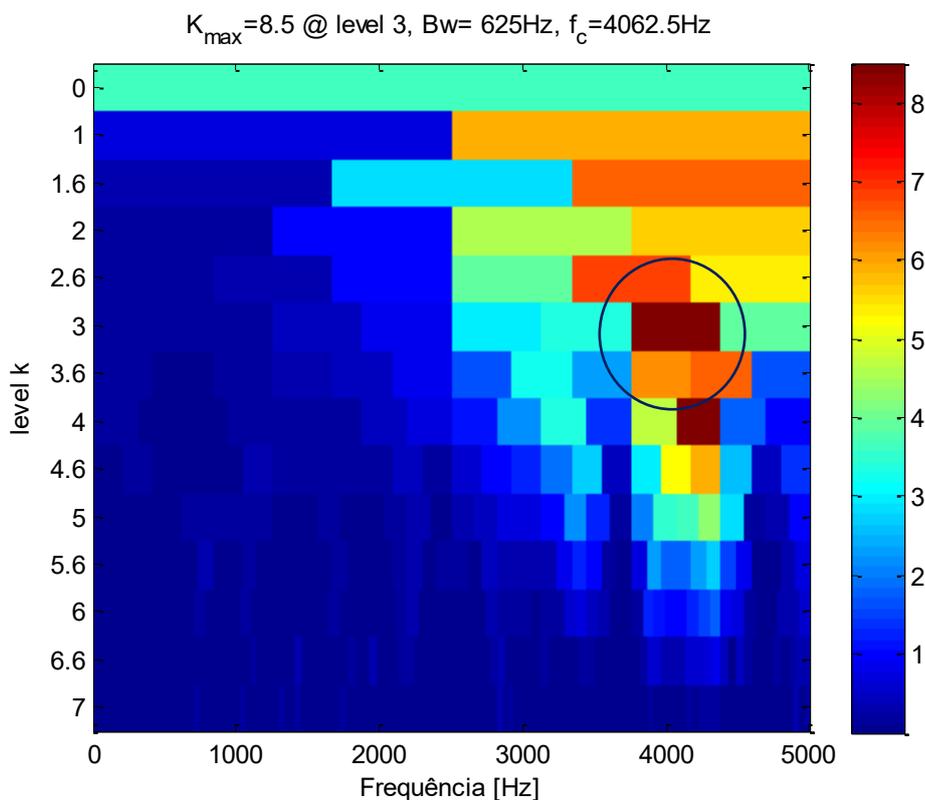
Figura 64 - Espectro do envelope do rolamento com defeito na externa



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 65, apresenta o Kurtogram do rolamento com defeito na pista interna, no qual a região de ressonância está em torno de 4 kHz. No Kurtogram foi obtido um valor de curtose máximo de 8,5 com um nível de decomposição 3.

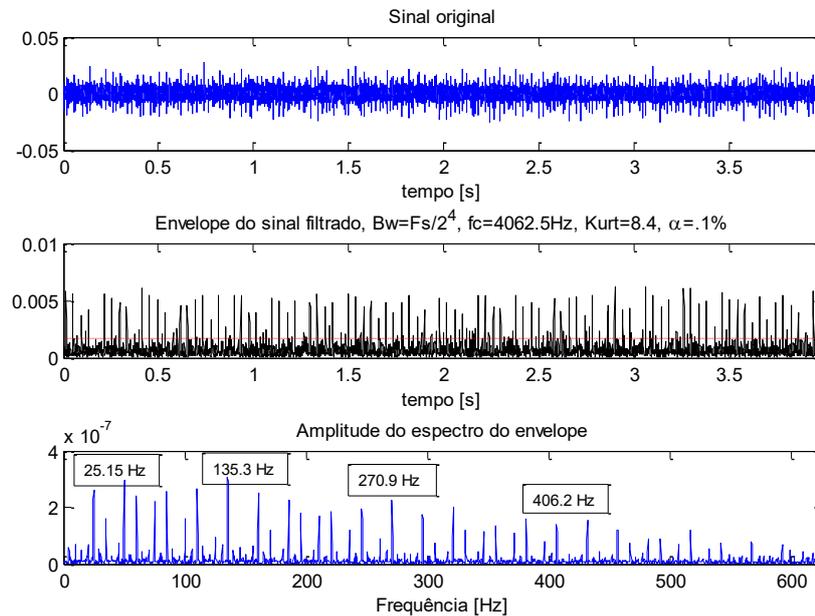
Figura 65 - Kurtogram do rolamento com defeito na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 66, mostra o espectro do sinal filtrado utilizando um filtro passa-banda. Nesse gráfico tem-se o sinal original no domínio do tempo do rolamento com defeito na pista interna, o envelope do sinal filtrado e o sinal no domínio da frequência, evidenciando de forma clara a frequência característica de defeito da pista interna calculada pela equação (5.2). Neste gráfico, note que aparece a frequência de falha  $f_{dpi}= 135,3 \text{ Hz}$ , seus harmônicos ( $2Xf_{dpi}$ ), ( $3Xf_{dpi}$ ), ( $4Xf_{dpi}$ ) e a frequência de rotação do eixo.

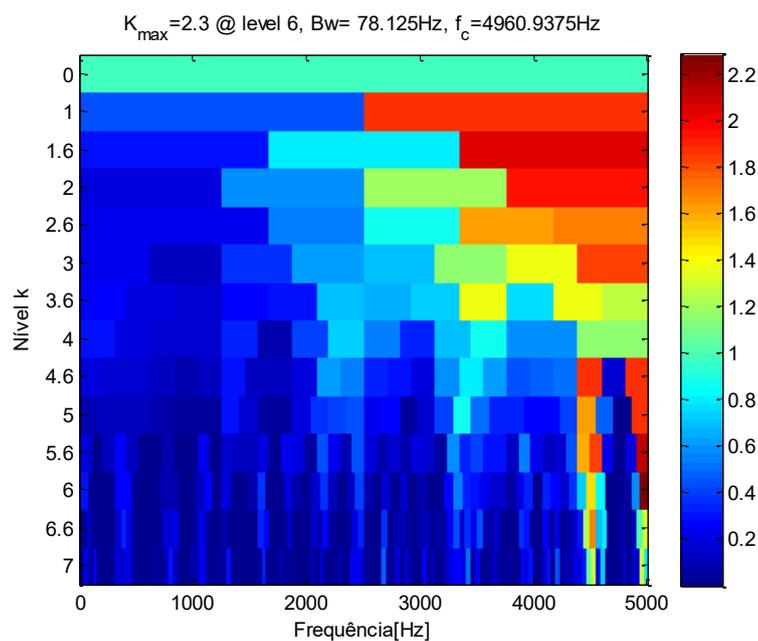
Figura 66 - Espectro do sinal do rolamento com defeito na pista interna DATA/FEG



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 67, apresenta o Kurtogram do rolamento com defeito nas esferas. Nessa análise utilizou-se a frequência central de 3 kHz e um nível de decomposição  $k=5$ , de forma a se obter uma melhor precisão na técnica do envelope combinado com a curtose espectral.

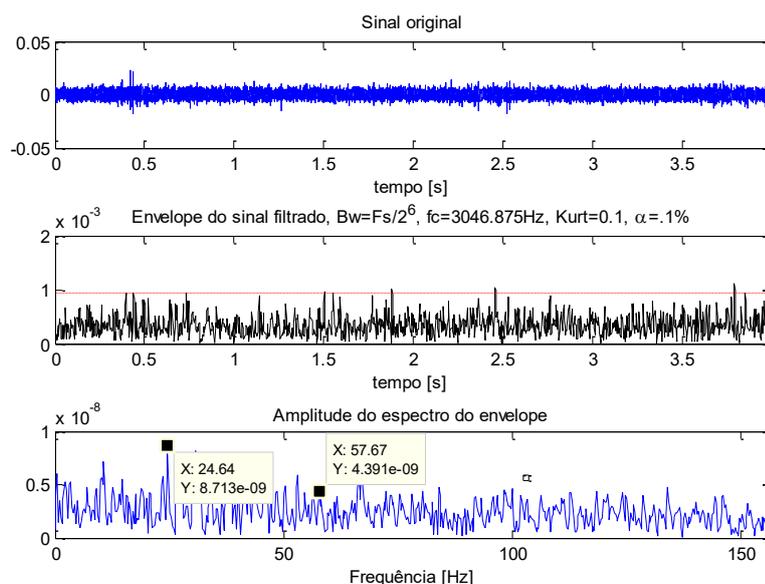
Figura 67- Kurtogram do rolamento com defeito nas esferas DATA/FEG



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 68, mostra o espectro de um sinal do rolamento com defeito na esfera. Por meio da técnica híbrida da curtose espectral com a análise do envelope foi possível a determinação de forma precisa das frequências características de defeito das esferas, pois utilizando o método convencional se torna difícil a identificação destas frequências no banco de dados em estudo.

Figura 68 - Espectro do envelope do sinal nas esferas DATA/FEG



Fonte: Dados da pesquisa

A aplicação do método de curtose espectral combinado com a técnica do envelope nos bancos de dados da Case Western Reserve University e DATA/FEG da UNESP comprova que o método aplicado consegue determinar de forma eficaz as frequências características de defeito nos dados coletados nesses dois bancos de dados. Esse método apresentou melhores resultados que as técnicas de Wavelet e STFT, pois ele consegue determinar com maior precisão as frequências de defeitos mesmos na presença de sinais ruidosos.

#### 4.5 ANÁLISE DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO BANCO DE DADOS DA CWRU

Existe um grande número de estudos para investigar o uso de parâmetros estatísticos para a detecção de avarias em rolamentos e cálculo de tendência, com o objetivo de determinar o comportamento com o aumento dos defeitos do rolamento (KIRAL; KARAGULLE, 2006).

Nesse tópicos realiza-se uma abordagem dos parâmetros estatísticos indicadores de vibração como: valor RMS, valor de pico, fator de crista e curtose.

Na análise dos parâmetros estatísticos do banco de dados da CWRU, foram utilizados os dados apresentados na Tabela 14.

A Tabela 14, fornece valores de falhas referentes aos dados de rolamentos localizados no lado do acionamento (*Drive end*), no qual foi utilizado uma taxa de amostragem de 12 kHz. As falhas foram produzidas usando uma máquina de eletro descarga sobre as esferas e nas pistas interna e externa do rolamento.

Tabela 14 - Dados de falha do rolamento localizado no (Drive end) - Taxa de amostragem de 12 kHz

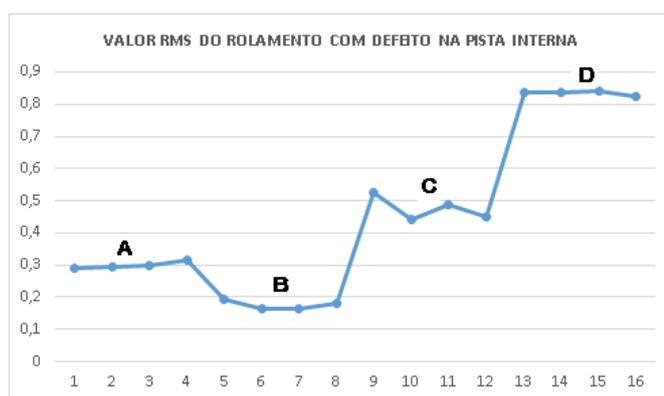
Tamanho da Falha (mm)		Velocidade do Eixo (rpm)	Conjunto de dados para cada tipo de falha				
			Pista Interna	Esfera	Pista externa		
					Centrada	Ortogonal	Oposta
0,18	0	1797	105	118	130	144	156
	1	1772	106	119	131	145	158
	2	1750	107	120	132	146	159
	3	1730	108	121	133	147	160
0,36	0	1797	169	185	197	-	-
	1	1772	170	186	198	-	-
	2	1750	171	187	199	-	-
	2	1730	172	188	200	-	-
0,53	0	1797	209	222	234	246	258
	1	1772	210	223	235	247	259
	2	1750	211	224	236	248	260
	3	1730	212	225	237	249	261
0,71	0	1797	3001	3005	-	-	-
	1	1772	3002	3006	-	-	-
	2	1750	3003	3007	-	-	-
	3	1730	3004	3008	-	-	-

Fonte: Dados da pesquisa

A escolha do indicador depende do tipo de máquina e da avaria que se deseja detectar. Para máquinas rotativas, um indicador de tipo vibratório permite detectar a maioria dos defeitos e estabelece uma evolução da curva no indicador tempo. Nesta curva, que definem diferentes limites correspondentes a um nível de aviso, pelo um alarme, a um nível de fracasso. Estes níveis são estabelecidos quer por experiência ou por aplicação de um padrão para rolamentos, gráficos de gravidade vibração são que usados para definir os limiares diferentes.

A partir dos dados da CWRU, foram realizadas simulações para os rolamentos com falhas na pista interna com intuito verificar os valores de severidade e curtose dos mesmos. A Figura 69, mostra o gráfico de valores RMS para o rolamento com defeito na pista interna.

Figura 69 - Valor RMS do rolamento com falha na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

No gráfico da Figura 69, tem-se quatro regiões de valores que são A, B C e D, a região A é do ponto (1 a 4), a região B é do ponto (5 a 8), e a região C é de (9 a 12) e finalmente a região D que é do ponto (13 a 16). Por meio de simulações, foi obtido o valor RMS do sinal de vibração variando a velocidade do eixo de (1797 a 1930 rpm) e variando os tamanhos de falhas de (0,18 a 0,71 mm). Observe que na região A o valor RMS é praticamente constante, onde o tamanho da falha é menor (0,18mm), e nas regiões B, C, e D, ocorreu uma diminuição da rotação e do valor RMS. Na região D, o valor RMS atingiu o valor máximo e a partir deste ponto permaneceu praticamente constante. Se for realizado um acompanhamento periódico das falhas nos rolamentos pode-se dizer que este ponto não seria o ponto de troca para o rolamento, pois apesar dos níveis de energia elevados, o valor RMS de 0,8384 mm/s está classificado como (limite bom) de acordo com a norma ISO 10816 indicado na Tabela 15.

O grande problema na abordagem do nível de energia global é que os aumentos das vibrações só irão aparecer nos estágios finais. Essa avaliação se torna limitada, pois, ela apenas informa indícios de aumento da vibração não fornecendo uma informação do local onde a falha ocorre. No geral, o valor RMS não detecta todas as falhas e fornece um alarme de atraso, este indicador representa uma grande desvantagem na manutenção preditiva.

A norma ISO 10816 define critérios de avaliação de níveis de vibração para estimar a gravidade dos defeitos e, por conseguinte o estado de funcionamento da máquina. A severidade de vibração representa o valor efetivo da velocidade de vibração medido na banda de frequências [10-1000 Hz] sabendo que os critérios de avaliação dependem da classe em que a máquina está localizada. Esses métodos chamados de "medidas de níveis globais" são imprecisos e não permitem a determinação da causa do aumento do nível de vibração.

A Tabela 15, apresenta os valores de severidade de vibrações recomendados pela norma ISO 10816.

Tabela 15 - Valores de severidade de vibração sugeridos na norma ISO 10816

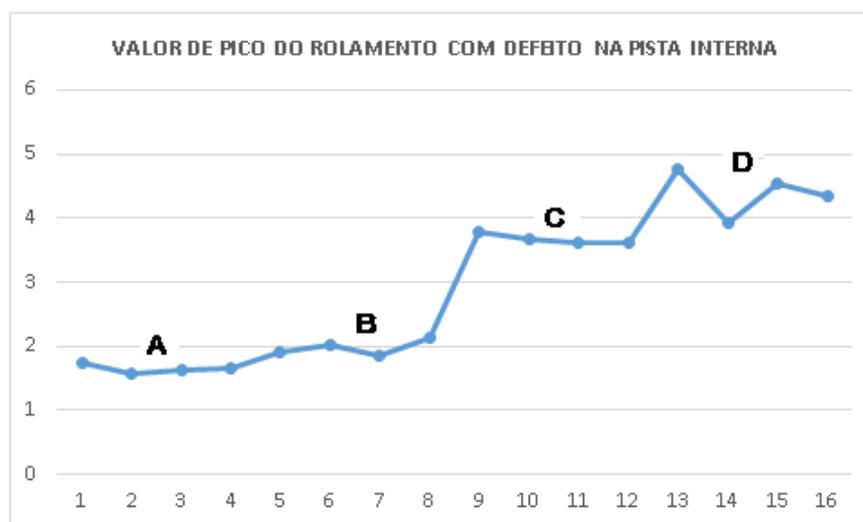
SEVERIDADE DA VIBRAÇÃO		LIMITES DE VIBRAÇÃO E CLASSES DAS MÁQUINAS ISO 10816				
Máquina		Classe I Máquina Pequenas	Classe II Máquinas Médias	Máquinas grandes		Severidade
V. Pico in/s	Vrms mm/s			Suporte rígido Classe III	Suporte Flexível Classe IV	
0,01	0,28					A
0,02	0,45					
0,03	0,71		BOM			
0,04	1,12					
0,07	1,80					
0,11	2,80		SATISFATÓRIO			
0,18	4,50					B
0,28	7,10		INSATISFATÓRIO			
0,44	11,20					C
0,70	18,00					
0,71	28,00		INASCEITÁVEL			D
1,10	45,00					

Fonte: (NORMA ISO 10816-1).

Ao contrário o valor eficaz de um sinal, os indicadores específicos como o valor de pico e curtose são mais adequados para representar um sinal induzido por forças de impulso de rolamentos com falhas. O valor de pico tem a vantagem da detecção de falhas antes do valor eficaz. Isto é porque para um rolamento sem falha, a proporção permanece substancialmente constante e aumenta quando a degradação ocorre enquanto o valor de pico aumenta à medida que o valor eficaz permanece, praticamente, constante.

A Figura 70, mostra o valor de pico de um rolamento com defeito na pista interna no qual se verifica que a medida que aumenta o tamanho da falha ocorre um aumento do valor de pico que nos estágios iniciais, note que o valor máximo do pico ocorre no ponto (13), nesse ponto tem-se uma maior rotação e maior tamanho da falha, e em seguida este valor começa a decrescer até o ponto (14) e aumenta novamente. Comparando a Figura 68 com a Figura 69, é possível verificar que no ponto de maior valor de pico (ponto 13) tem-se um valor RMS constante.

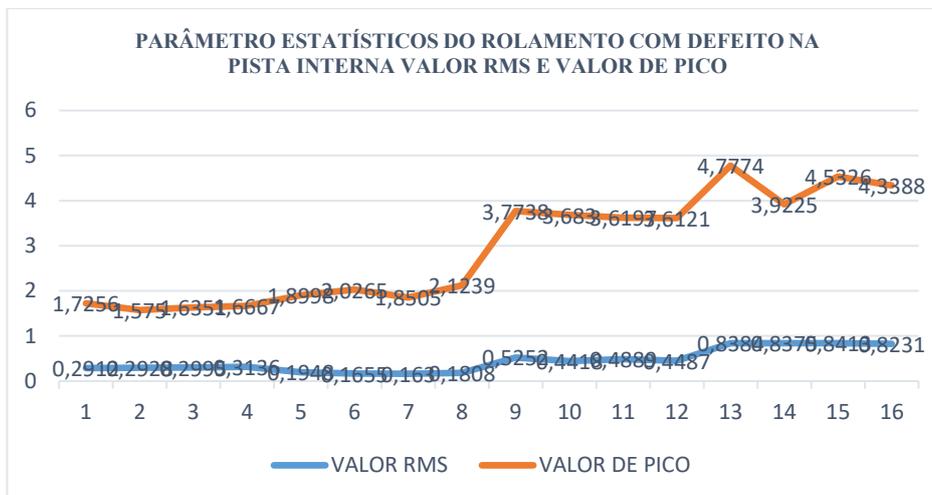
Figura 70 - Valor de pico do rolamento com falha na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 71, apresenta os indicadores estatísticos valor de pico e valor rms do rolamento com defeito na pista interna.

Figura 71 - Valor de pico e valor RMS do rolamento com defeito na pista interna.



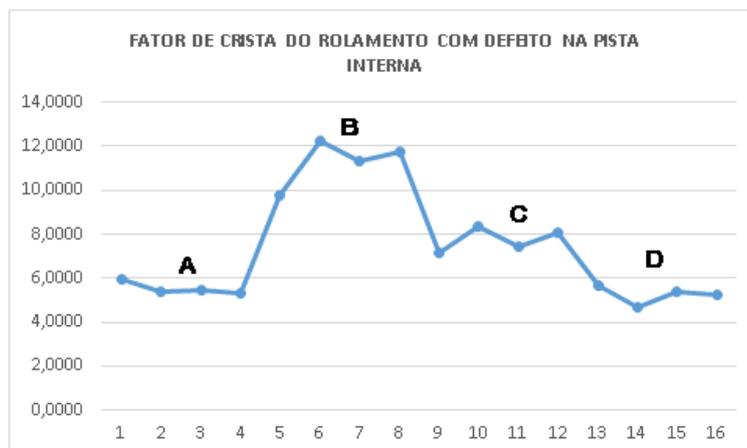
Fonte: Dados da pesquisa

A razão entre o nível de pico da vibração e o nível do valor RMS representa o Fator de Crista. No momento em que o rolamento sofre um defeito, ocorre uma elevação mais acentuada no nível de aceleração em comparação ao nível RMS. Dessa forma, calculando-se a razão dessa diferença de níveis e comparando-a com valores previamente estabelecidos para patamares de ocorrência de defeitos, é possível realizar uma avaliação das condições do rolamento.

Em condições de vibração normal, livre de defeitos, o fator de crista permanece em baixos patamares, com valores variando de 5 a 6 da região (A) da Figura 71. No entanto, o surgimento e evolução de falhas promove um aumento nos mesmos, atingindo valores superiores 6, atingindo o valor máximo 12 na região (B), conforme mostra a Figura 71. No entanto, à medida que as falhas se propagam pela superfície do rolamento, os picos discretos desaparecem e o nível RMS se eleva, reduzindo o valor do fator de crista. Essa redução pode ser utilizada como um indício sintomático da ocorrência de falhas distribuídas, o que pode revelar a necessidade de reparos no rolamento.

A Figura 72, mostra o fator de crista de um rolamento com defeito na pista interna. Note que o valor máximo desse fator é evidenciado no ponto (6), e em seguida ocorre um decaimento. Por meio da análise gráfica, observa-se que o valor do fator de crista maior que cinco ( $F_c > 5$ ), o rolamento já começa a apresentar indícios de falhas.

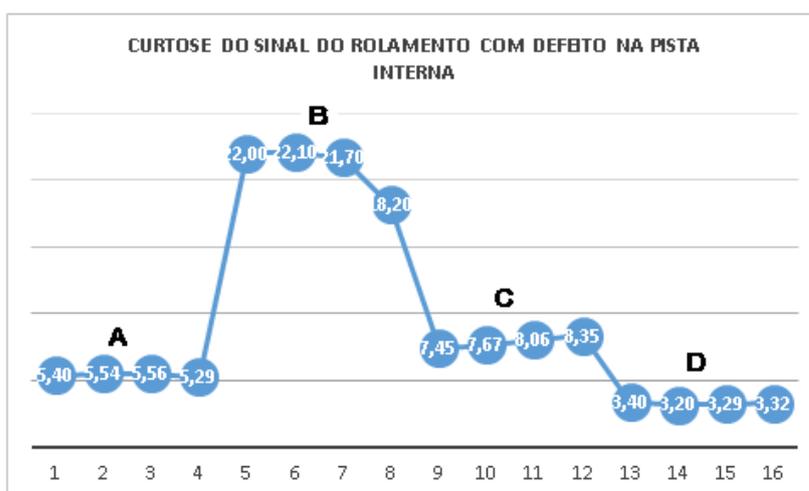
Figura 72 - Fator de crista do rolamento com defeito na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 73, apresenta valores de curtose do rolamento com defeito na pista interna. Observe que o valor de curtose de um rolamento com defeito tem o valor maior que três ( $K > 3$ ), conforme ilustrado no gráfico. O valor de curtose máximo é 22, conforme evidenciado na região (B). Note que a partir deste valor a curtose começa a decrescer e quando o rolamento já está deteriorado o valor é muito baixo, o que indica que a curtose não é um bom parâmetro para a avaliação das condições de falhas em rolamentos.

Figura 73 - Curtose do rolamento com falha na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

De acordo com Mcinerny e Dai (2003), a curtose é substancialmente afetada pelos impulsos de um rolamento defeituoso e, portanto, pode ser um indicador efetivo para o rolamento. No entanto, Lorenzo e Calabro (2007) mencionam que o nível de danos pode afetar

a forma de onda do sinal de vibração em termos de se tornar contínuo em vez de impulsiva e, assim, fazendo com que os valores de curtose sejam reduzidos quando a falha já está avançada.

A Tabela 16, apresenta os valores dos parâmetros estatísticos calculados para o rolamento com defeito na pista interna.

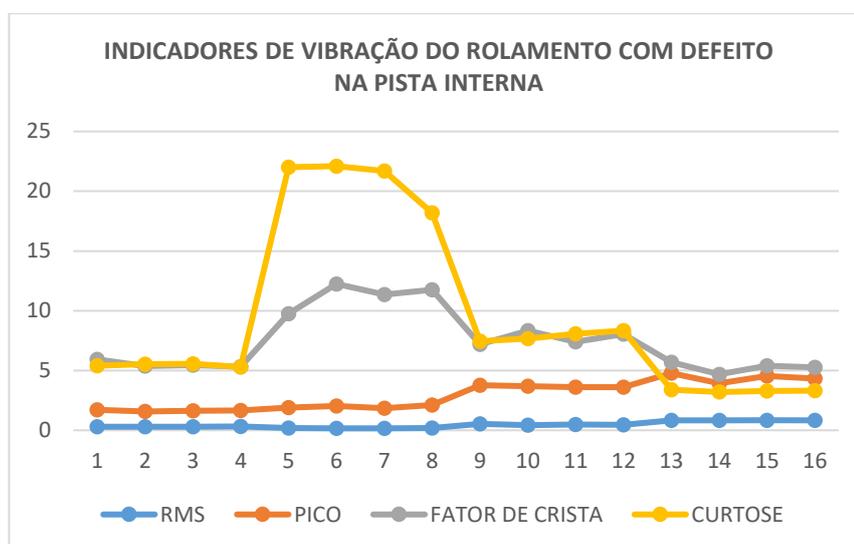
Tabela 16 - Parâmetros estatísticos de falha na pista interna do rolamento

<b>Pista Interna</b>	<b>Valor RMS</b>	<b>Valor de pico</b>	<b>Fator de Crista</b>	<b>Curtose</b>
<b>105</b>	0,2912	1,7256	5,9258	5,40
<b>106</b>	0,2928	1,5750	5,3791	5,54
<b>107</b>	0,2995	1,6351	5,4594	5,56
<b>108</b>	0,3136	1,6667	5,3147	5,29
<b>169</b>	0,1948	1,8998	9,7526	22,00
<b>170</b>	0,1655	2,0265	12,2447	22,1
<b>171</b>	0,1630	1,8505	11,3528	21,70
<b>172</b>	0,1808	2,1239	11,7472	18,20
<b>209</b>	0,5252	3,7738	7,1855	7,45
<b>210</b>	0,4418	3,6830	8,3364	7,67
<b>211</b>	0,4889	3,6197	7,4038	8,06
<b>212</b>	0,4487	3,6121	8,0501	8,35
<b>3001</b>	0,8384	4,7774	5,6982	3,40
<b>3002</b>	0,8375	3,9225	4,6836	3,20
<b>3003</b>	0,8413	4,5326	5,3876	3,29
<b>3004</b>	0,8231	4,3388	5,2713	3,32

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 74, mostra o gráfico dos indicadores de vibração do rolamento com defeito na pista interna.

Figura 74 - Indicadores de vibração do rolamento com defeito na pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

A Tabela 17, apresenta os valores dos parâmetros estatísticos calculados para o rolamento com defeito na esfera.

Tabela 17 - Parâmetros estatísticos de falha na esfera do rolamento

<b>Esfera</b>	<b>Valor RMS</b>	<b>Valor de pico</b>	<b>Fator de Crista</b>	<b>Curtose</b>
<b>118</b>	0,3187	0,5913	4,2632	2,98
<b>119</b>	0,1390	0,6358	4,5741	2,96
<b>120</b>	0,1472	0,6000	4,0761	2,83
<b>121</b>	0,1536	0,6673	4,3444	2,89
<b>185</b>	0,1526	2,2735	14,8984	17,80
<b>186</b>	0,148	1,3352	9,0216	8,84
<b>187</b>	0,1434	1,8345	12,7929	9,75
<b>188</b>	0,1336	1,9846	14,8548	14,90
<b>222</b>	0,1339	1,6382	12,2345	8,55
<b>223</b>	0,129	1,4704	11,3984	9,41
<b>224</b>	0,1072	0,641	5,9795	3,30
<b>225</b>	0,1179	0,5719	4,8507	3,11
<b>3005</b>	2,0771	10,926	5,2602	3,87

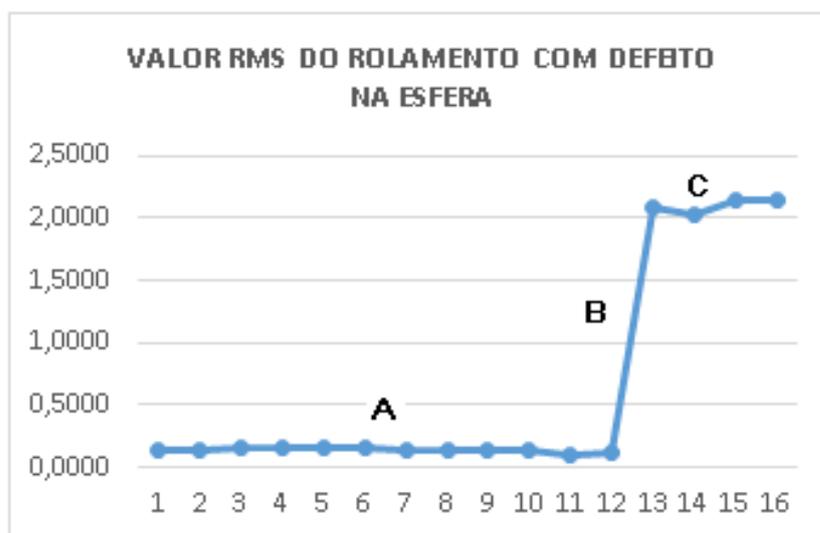
<b>3006</b>	2,0298	11,6648	5,7468	3,91
<b>3007</b>	2,1457	10,4416	4,8663	3,77
<b>3008</b>	2,1449	11,3449	5,2892	3,90

Fonte: Dados da pesquisa

As Figuras 75, 76, 77 e 78, representam os indicadores de vibração de valor RMS, valor de pico, fator de crista e curtose de um rolamento com defeito na esfera.

A Figura 75, apresenta o valor RMS para o rolamento com defeito na esfera. Observe que na região (A) o valor RMS permanece praticamente constante e a partir ponto 12 na região (B) o valor RMS começa a aumentar até o ponto 13. Na região (C) verifica-se que o valor RMS é máximo.

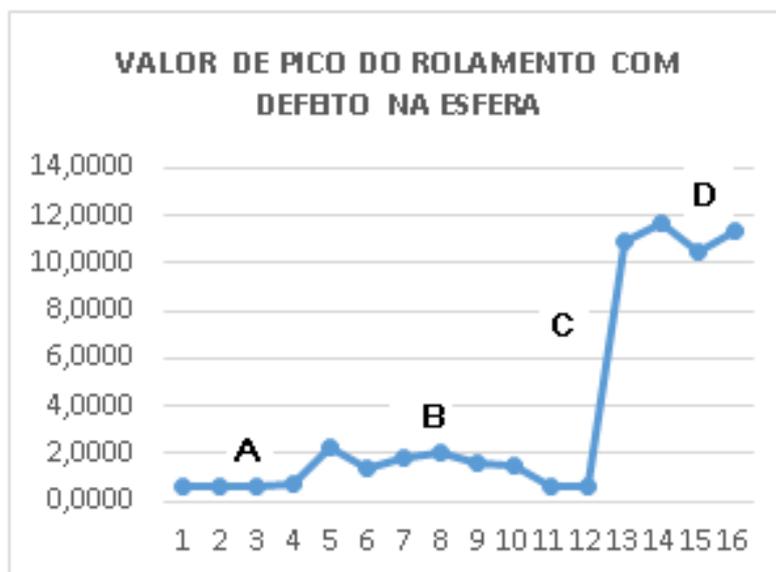
Figura 75 - Valor RMS do rolamento com falha na esfera



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 76, apresenta o valor de pico do rolamento com falha na esfera. Esse gráfico é similar ao gráfico do valor RMS. Note que o valor de pico tem um aumento no ponto 5, onde o valor RMS é constante. O valor de pico é máximo é evidenciado graficamente na região D (ponto 14).

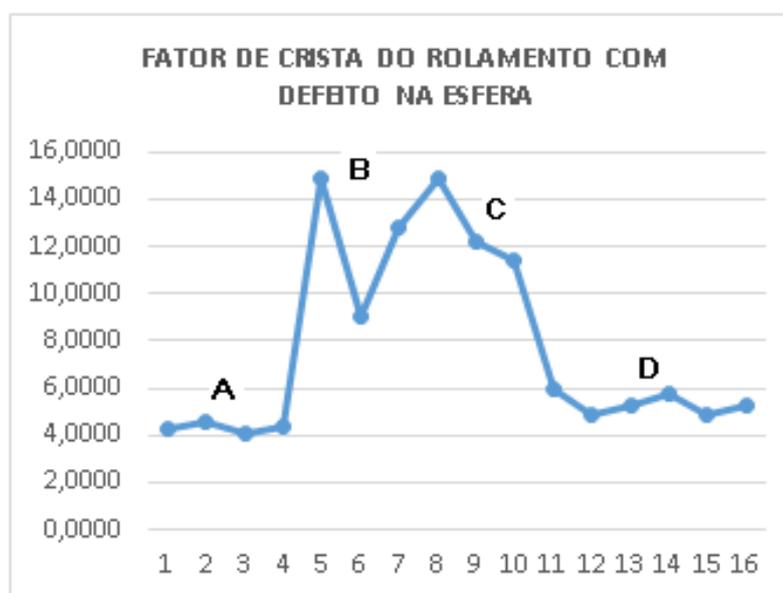
Figura 76 - Valor de pico do rolamento com falha na esfera



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 77, mostra o fator de crista do rolamento com defeito na esfera. Na região (A) o fator de crista praticamente não tem aumento. No ponto 5 da região (B) o fator de crista é máximo. Observe que o fator de crista começa a diminuir a partir da região (C) e na região (D) onde o rolamento já está bem deteriorado o seu valor tem uma diminuição significativa, o que contribui para um aumento do valor RMS.

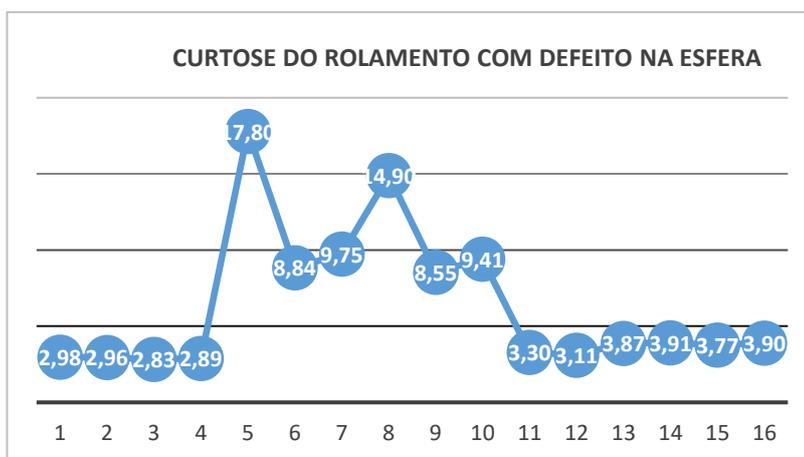
Figura 77- Fator de crista do rolamento com falha na esfera



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 78, mostra o valor de curtose do rolamento com falha na esfera. Note que neste caso o comportamento da curtose é similar ao fator de crista. No início do ponto 1 ao ponto 4, o rolamento não apresenta defeito e no ponto 5, verifica-se que ela atinge o valor máximo. Quando indicadores de níveis de energia estão elevados o valor de curtose é pequeno, fato este que indica que este fator não é um bom parâmetro para avaliação de falhas que não estão na fase inicial.

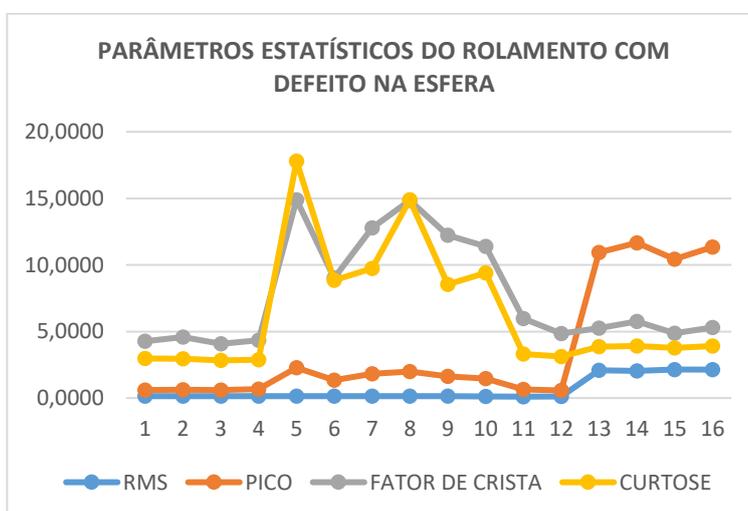
Figura 78 - Valor de curtose do rolamento com falha na esfera



Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 79, mostra os indicadores de vibração de valor RMS, valor de pico, fator de crista e curtose para o rolamento rígido de esferas com defeito na esfera.

Figura 79 - Indicadores de vibração do rolamento com defeito na esfera



Fonte: Dados da pesquisa

#### 4.6 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA PRECISÃO DAS INFORMAÇÕES DO MODELO

Para avaliar a eficácia da simulação foram aplicados os seguintes coeficientes estatísticos: coeficiente de (NASH; SUTCLIFFE, 1970) (NSE) e coeficiente de determinação (R).

O coeficiente Nash-Sutcliffe de eficiência pode ser usado quantitativamente para descrever com precisão as informações do modelo. Este método pode ser usado para descrever a precisão predicativa de modelos desde que se tenham dados suficientes disponíveis para comparação. O coeficiente de Nash-Sutcliffe é determinado pela equação (5.5).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_{obsi} - y_{modi})^2}{\sum_{i=1}^N (y_{obsi} - \bar{y}_{obsi})^2} \quad (5.5)$$

Onde:

$y_{obs}$  = medida de frequência observada

$y_{mod}$  = medida de frequência calculada

$\bar{y}_{obsi}$  = média das frequências observadas

N = Número de frequências observadas

De acordo com Zhang et al. (2007), o valor do coeficiente Nash-Sutcliffe indica o ajustamento dos dados simulados aos observados na reta 1:1, podendo variar de  $-\infty$  a 1. A eficiência igual a um (NSE=1) corresponde ao casamento perfeito entre o sistema modelado e o sistema simulado. Quanto mais próximo de 1, mais preciso é o modelo. Moriasi et al. (2007) apresentaram a seguinte classificação para este coeficiente:  $NSE > 0,65$  o modelo é considerado muito bom;  $0,54 < NSE < 0,65$  o modelo é considerado bom e entre 0,5 e 0,54, satisfatório.

Segundo Zhang et al., (2007), valores de NSE acima de 0,5 qualificam o modelo para simulação. O coeficiente de correlação **R** é uma informação estatística sobre o ajuste entre grupos de dados observados. Em regressão **R** é a medida estatística de quanto a linha de regressão se aproxima dos pontos dos dados reais. **R** = 1 indica perfeito ajuste entre os dados experimentais e os dados modelados. A determinação do coeficiente de correlação é dada pela equação 5.6.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.6)$$

A interpretação do coeficiente de correlação é apresentada no Quadro 5.

Quadro 5 - Interpretação do coeficiente de correlação

Coeficiente de Correlação	Faixa	Classificação
<b>R</b>	0,00 a 0,19	Correlação muito fraca
	0,20 a 0,39	Correlação fraca
	0,40 a 0,69	Correlação moderada
	0,70 a 0,89	Correlação forte
	0,90 a 1,00	Correlação muito forte

A Tabela 18, mostra os valores calculados e valores observados nos gráficos das simulações realizadas no banco de dados da CWRU do rolamento rígido de esferas com defeito na pista interna.

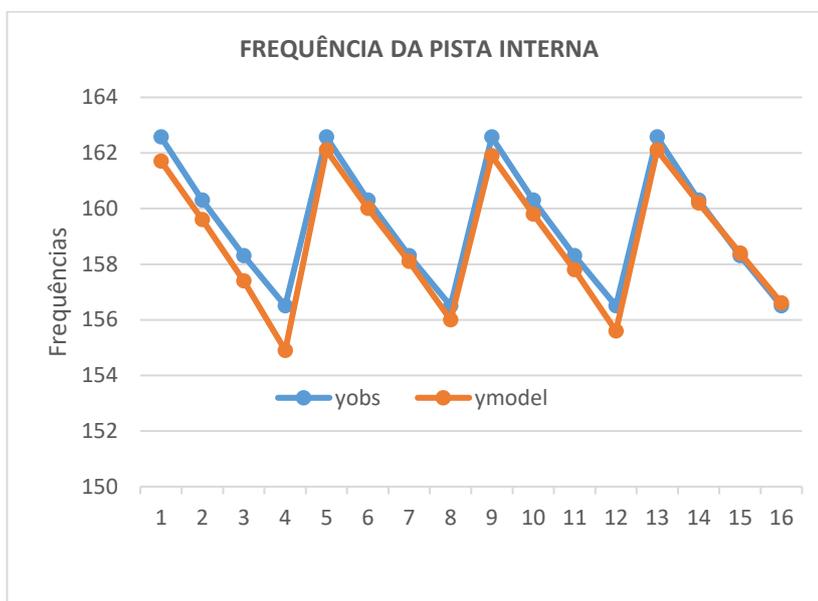
Tabela 18 -Valores de frequências características de defeito da pista interna calculados e observados na simulação.

$y_{mod}$	$y_{obs}$	$(y_{obs}-y_m)^2$	$(y_{obs}-\bar{y}_m)^2$
162,57	161,7	0,7569	9,21
160,3	159,6	0,4900	0,87
158,31	157,4	0,8281	1,60
156,5	154,9	2,5600	14,18
162,57	162,1	0,2209	11,79
160,3	160,0	0,0196	3,15
158,31	159,8	0,5476	0,15
156,5	156,0	0,6400	8,79
162,57	161,9	0,4489	10,46
160,3	159,8	0,2916	1,20
158,31	158,1	0,1681	0,59
156,5	155,6	0,6400	8,79
162,57	162,1	4,7089	3,01
160,3	160,4	0,0100	2,25
158,31	158,4	0,0081	0,07
156,5	156,6	2,5600	14,18
<b>Soma</b>		7,2580	87,02

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 80, apresenta o gráfico de frequência dos valores simulados e calculados para o rolamento com defeito na pista interna.

Figura 80 - Gráfico de frequência simulada e calculada para a pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

Observe no gráfico da Figura 80, que os valores simulados se aproximam dos valores que foram calculados por meio das frequências características de defeitos para as rotações de (1797 a 1730 rpm) e para os diferentes tamanhos de falhas que variam de (0,18mm a 0,71mm).

Por meio da equação (5.5), foi possível verificar a eficiência do modelo.

$$NSE = 1 - \frac{7,258}{86,46} = 0,916$$

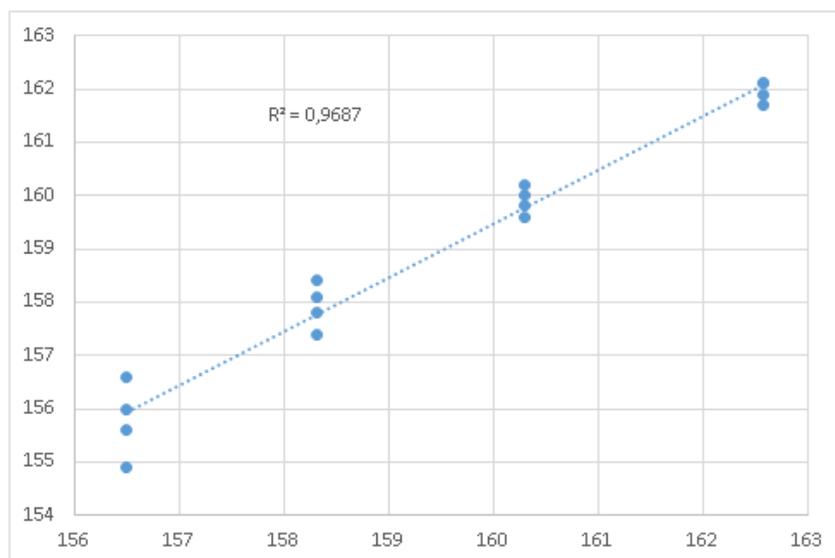
O coeficiente de correlação é obtido por meio da equação (5.6).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2}} = 0,981$$

R=0,969 significa que existe uma correlação muito forte

A Figura 81, mostra o coeficiente de correlação calculado para os dados da frequência de defeito da pista interna do rolamento.

Figura 81- Gráfico de coeficiente de correlação para a pista interna



Fonte: Dados da pesquisa

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe,  $NSE = 0,916$  e o coeficiente de correlação  $R = 0,981$ , mostra que modelo simulado tem uma eficiência muito boa conforme a literatura. Os resultados obtidos pelos métodos de Nash e coeficiente de correlação validam as simulações que foram realizadas no banco de dados da CWRU.

Realizou-se uma análise dos coeficientes de eficiência e coeficiente de correlação para rolamento com defeito nas esferas.

A Tabela 19, mostra os valores calculados e valores observados nos gráficos das simulações realizadas no banco de dados da CWRU do rolamento rígido de esferas com defeito na esfera.

Tabela 19 - Valores de frequências características de defeito da esfera calculados e observados na simulação.

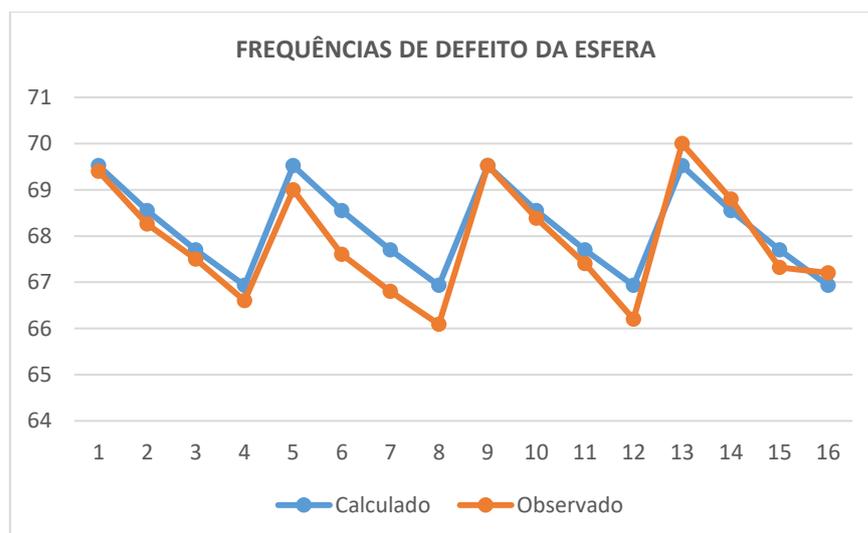
$y_{mod}$	$y_{obs}$	$(y_{obs} - y_m)^2$	$(y_{obs} - \bar{y_m})^2$
69,52	69,4	0,0144	2,31
68,55	68,26	0,0841	0,14
67,7	67,5	0,0400	0,14
66,93	66,6	0,1089	1,64
69,52	69	0,2704	1,26
68,55	67,6	0,9025	0,08
67,7	66,8	0,8100	1,17
66,93	66,09	0,7056	3,20
69,52	69,52	0,0000	2,69

68,55	68,38	0,0289	0,25
67,7	67,4	0,0900	0,23
66,93	66,2	0,5329	2,82
69,52	70	0,2304	4,50
68,55	68,8	0,0625	0,85
67,7	67,32	0,1444	0,31
66,93	67,2	0,0729	0,46
<b>Soma</b>		<b>4,0979</b>	<b>22,05</b>

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 82, apresenta o gráfico de frequência dos valores simulados e calculados para o rolamento com defeito na esfera.

Figura 82 - Gráfico de frequência simulada e calculada para a esfera



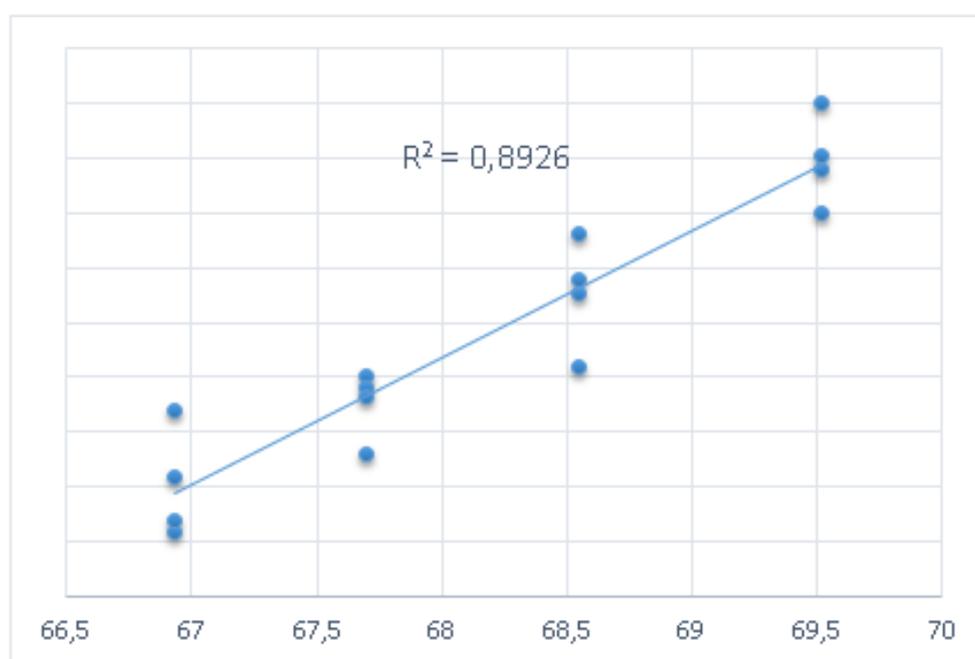
Fonte: Dados da pesquisa

A partir dos dados obtidos na Tabela 17, realizou-se o cálculo do coeficiente NSE, e obteve-se o valor de  $NSE=0,814$ , o que indica que o modelo obtido para esfera tem uma eficiência muito boa. Note que o valor do coeficiente NSE para esfera é menor que o valor do obtido para a pista interna, comprovando uma precisão menor na obtenção das frequências observadas em relação às calculadas. Em seguida obteve-se o coeficiente de correlação para o modelo, e encontrou-se o valor de  $R=0,9447$  indicando uma correlação forte conforme indica o quadro 5.

A Figura 83, mostra o gráfico de correlação para o rolamento com defeito na esfera. Verifica-se que as frequências observadas estão próximas as frequências calculadas, pois o

valor de R está próximo de 1. Além disso o valor indica uma linha de tendência que aponta para uma reta com uma inclinação crescente.

Figura 83 - Gráfico de correlação para o rolamento com defeito na esfera



Fonte: Dados da pesquisa

Por meio da análise realizada, verifica-se que os resultados obtidos com a implementação do método da curtose espectral combinada com a técnica HFRT aplicada aos bancos de dados da CWRU e DATA/FEG tem uma eficiência muito boa, pois foi possível a determinação e localização das frequências características de defeitos dos rolamentos rígidos de esferas mesmo na presença de sinais ruidosos.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou as estratégias de manutenção e realizou a implementação de algoritmos para identificar as falhas em rolamentos que são utilizados em máquinas rotativas, tendo como finalidade apresentar uma metodologia para detecção e análise de falhas em rolamentos, vislumbrando o aprimoramento da manutenção preditiva para setor industrial.

Existem várias técnicas de análise de vibrações utilizadas para avaliação das condições de monitoramento de máquinas. Nesse contexto, foi verificado os sinais de vibrações no domínio do tempo, no domínio da frequência e no domínio tempo-frequência para a extração das frequências características de defeitos nos elementos constituintes dos rolamentos na pista interna, pista externa e esferas, obtendo-se alguns resultados satisfatórios. Para a aquisição dos sinais de vibrações dos rolamentos rígidos de esferas foi utilizado o banco de dados da CASE WESTERN RESERV e o banco de dados da (FEG/UNESP).

Na detecção da falha por meio da técnica do Envelope, houve problemas na identificação de algumas frequências, pois a metodologia utilizada não se mostrou sensível as mudanças causadas nos impulsos gerados pelos impactos dos rolamentos. Um dos inconvenientes na implementação dessa técnica é considerar que o regime é estacionário, pois os sinais gerados pelos rolamentos são aleatórios e as suas frequências mudam com o tempo, isto é, o sinal não é estacionário.

Devido ao resultado insatisfatório, aplicou-se a implementação da técnica *Short-time Fourier Transform* – STFT. Observou-se que utilização dessa metodologia é mais indicada quando se conhece a faixa de frequência, e sua limitação encontra-se ao considerar uma janela fixa em um sinal de tamanho constante. No entanto, por meio da implementação dessa técnica, foi possível fazer a identificação da frequência de defeito do sinal em que a técnica HFRT não conseguiu identificar.

Em virtude da limitação da STFT, buscou-se a utilização da técnica Wavelet combinada com a técnica do envelope. Na implementação da Wavelet escolheu-se a Daubechies de ordem 4, e em seguida, realizou-se a decomposição do sinal, em que foi escolhido dentre os sinais de detalhes e aproximações, o que apresentou maior nível de energia. Utilizou-se nessa metodologia uma análise multiresolução que possibilitou extrair informações de sinais não estacionários, onde a combinação da técnica de Wavelet com a técnica HFRT demonstrou melhor capacidade de identificação do sinal.

Diante dos resultados encontrados observou-se que a determinação da região de ressonância de forma automática possibilitaria uma melhor identificação das frequências de

defeitos. Sendo assim, elaborou-se uma metodologia para caracterização de falha em rolamentos rígidos de esferas em máquinas rotativas utilizando a técnica de curtose espectral associada a técnica do envelope. Essa técnica proporciona os resultados mais precisos e satisfatórios, pois com a implementação desse algoritmo foi possível a determinação de forma automática da região de ressonância, e conseqüentemente uma melhora na caracterização das frequências de defeitos observadas nos rolamentos dos experimentos realizados em máquinas rotativas.

Portanto, a curtose espectral definida no domínio da frequência para monitoramento e detecção de falhas em rolamentos é uma ferramenta promissora para análise de sinais não estacionários. O método da curtose espectral fornece uma maior precisão na caracterização dos defeitos do que as técnicas Wavelet e STFT. Constituindo assim, uma técnica mais robusta para a identificação de impulsos dos rolamentos e pode ser usada com segurança no plano de manutenção preditiva de máquinas rotativas das indústrias.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver novos algoritmos para o diagnóstico de falhas em máquinas rotativas;
- Desenvolver métodos para diagnósticos de falhas em regimes transientes por meio das técnicas avançadas como: distribuição de Wigner-Ville e Ciclo estacionário;
- Implementar abordagem estatísticas via prognósticos com intuito detectar o defeito no rolamento em seu estágio inicial;
- Implementar técnicas de processamentos de sinais em outros elementos de máquinas como: engrenagens, bombas, motores;
- Utilizar no banco de dados da CWRU outros tipos de famílias de Wavelet como Haar, Meyer, Symlet e Morlet para comparação dos resultados;
- Realizar um estudo comparativo dos diferentes métodos de análise de vibrações aplicado ao banco de dados da CWRU.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. F. **Redes neurais artificiais aplicadas à manutenção baseada na condição**. 2011. 162 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.
- AMIRAT, YASSINE et al. **Hilbert transform-based bearing failure detection in DFIG-based wind turbines**. *International Review of Electrical Engineering*, v. 6, n. 3, p. 1249-1256, 2011.
- ANTONI, J. **Cyclostationarity by examples**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 23, n. 4, p. 987–1036, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5462: **Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- BEZERRA, R. A. “**Deteção de falhas em rolamentos por análise de vibração**”. D.Sc. Thesis, FEM, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2004.
- BRANCO FILHO, GIL, **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**, 1<sup>a</sup> ed., Ed. Ciência Moderna, 2008.
- BENDJAMA, HOCINE et al. **Selection of Wavelet Decomposition Levels for Vibration Monitoring of Rotating Machinery**. In: 9th Int. Conf. Advanced Eng. Comp. Applications in Sci. ADVCOMP 2015.
- BOUDIAF, A. et al. **A Comparative Study of Various Methods of Bearing Faults Diagnosis Using the Case Western Reserve University Data**. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, v. 16, n. 2, p. 271–284, 2016.
- BOUZID, M.; MRABET, N.; MOREAU, S.; SIGNAC, L., **Accurate detection of stator and rotor fault by neural network in induction motor**, in Proc. IEESD, Hammamet, Tunisia, vol. III, 2007.
- BRITO, L. C\*, PEREIRA, J. G.°, BRITO, J. N. °. **Associação das técnicas preditivas: análise de vibração e análise de graxa, para deteção de falhas em rolamento**. Vii congresso bolivariano de ingenieria mecanica, 2012.
- CAPDEVIELLE, V., SERVIÈRE, C., LACOUME, J., 1996, “**Blind separation of wide-band sources: Application to rotating machine signals**”. Proc. of the 8th European Signal Processing Conf., vol.3, pp. 2085-2088.
- 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.
- CHOW M. Y.; SHARPE R. N.; HUMG, J. C. **On the application and design of artificial neural networks for motor fault detection**, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*., vol. 40, no. 2, pp. 181–196, 1993.

CHUN LI et. al., **"Bearing Fault Detection by resonant frequency band pursuit using a synthesized criterion,"**proc 3rd Int. conf. on Mechanical engineering and Mechatronics, Prague, pp.37.1 -37.8, 14-15 August 2014.

CUSIDÓ, J. ROMERAL, L., ORTEGA, J. A., GARCIA, A., RIBA, J. R. **Wavelet and PDD as fault detection techniques.** Electric Power Systems Research, v. 80, p. 915-924. 2010.

CWRU, **Bearing Data Center - Seeded Fault Test Data.** Disponível em: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/download-data-file> Acesso em: 17/03/2013.

DE LORENZO, F.; CALABRO, M. **Kurtosis: a statistical approach to identify defect in rolling bearings.** In: Proceedings of 2nd International Conference on Marine Research and Transportation, Naples. p. 17-24, 2007.

DUBE, A. V; DHAMANDE, L. S.; KULKARNI, P. G. **Vibration Based Condition Assessment Of Rollingelement Bearings With Localized Defects.** International Journal of Scientific & Technology Research, v. 2, n. 4, p. 149–155, 2013.

DWYER, R. F. **Detection of Randomly Occuring Signals Using Spectra and Frequency Domain Kurtosis Estimates.** NAVAL UNDERWATER SYSTEMS CENTER NEW LONDON CT NEW LONDON LAB, 1984.

DYER, D.; STEWART, R.M. **Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis.** Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Design, Vol. 100, pp 229-235, April 1978.

GEORGOULAS, G. et al. **Rolling element bearings diagnostics using the Symbolic Aggregate approXimation.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 1–14, 2015.

GHATE, V. and DUDUL, S. **Fault diagnosis of three phase induction motor using neural network techniques,** 2nd International Conference on, Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), pp. 922-928, 2009.

GUIMARÃES, L.M; NOGUEIRA, C.F; DA SILVA, Brás; M. D. **Manutenção Industrial: implementação da manutenção produtiva total (TPM).** e-xacta, vol. 5, no 1, 2012.

HARRIS, T.A., **Rolling Bearing Analysis.** New York: John Wiley & Sons, 2001.

H.; ZHANG, X. C., **Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China.** *Transactions of the ASABE*, 50, 911-918, 2007.

J. ANTONI and R. RANDALL, **"The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines"**, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 20, no. 2, pp. 308-331, 2006.

KARDEC, A.; NASSIF, J. **Manutenção preditiva: fator de sucesso na gestão empresarial.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014.

KIRAL, Z.; KARAGULLE, H. **Vibration Analysis of Rolling Element Bearings With Various Defects Under The Action of an Unbalanced Force**. Mechanical Systems and Signal Processing, November 2006.

LEI, Y. et al. **Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 21, n. 5, p. 2280–2294, 2007.

LI, J; YUAN, Y. **Research on the fault diagnosis of bearing based on wavelet and demodulation**. In: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing,. p. 020113, 2017.

MCINERNY, S.A.; DAI, Y. **Basic vibration signal processing for bearing fault detection**. IEEE Transactions on education, v. 46, n. 1, p. 149-156, 2003.

MCFADDEN, P. D.; SMITH, J. D. **Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique** — a review. Tribology International, v. 17, n. 1, p. 3–10, fev. 1984.

MALLAT, S. G. **A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Illinois, v. 11, n. 7, p. 674-693, Jul/1989.

MALLAT, S., **A Wavelet Tour of Signal Processing** (Third Edition): p. 267-279, 377-380, 2009.

MESQUITA, A.; SANTIAGO, D.; BEZERRA, R. **Detecção de Falhas em Rolamentos Usando Transformada Tempo-Frequência-Comparação com Análise de Envelope**. Mecânica Computacional, v. 21, n. Outubro, p. 1938–1954, 2002.

MISITI, Michel et al. **Wavelet toolbox**. The MathWorks Inc., Natick, MA, 2013.

MOBLEY, K.R. **Maintenance Fundamentals** (2<sup>nd</sup> edition). Elsevier Inc, 2004.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. American Society of Agricultural and Biological Engineers Vol. 50(3): 885-900, 2007.

MOUMENE, I; OUELAA, N. **Application of the wavelets multiresolution analysis and the high-frequency resonance technique for gears and bearings faults diagnosis**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 83, n. 5-8, p. 1315-1339, 2016.

NASH, J. E; SUTCLIFFE, J. V. **River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles**. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290, 1970.

NAPOLITANO, A. **Cyclostationary Signal Processing and its Generalizations**, 2014.

NOGUEIRA, C. F.; GUIMARÃES, L. M.; DINIZ, M. **Manutenção Industrial: Implementação da Manutenção Produtiva Total (TPM)**. Revista E-XACTA, v. 5, n. 1, p. 175–197, 2012 - ISSN: 1984-3151.

OLIVEIRA, H. M. **Análise de fourier e wavelets: sinais estacionários e não estacionários**. Editora Universitária da UFPE, 2007.

OLIVEIRA, R. J. G., **Implementação de técnicas de processamento de sinais para o monitoramento da condição de mancais de rolamento**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

OPPENHEIM, A.V.; SCHAFER, R.W. **Discrete-time signal processing**: Pearson new International Edition. Pearson Higher Ed, 2013.

OSMAN, S; WANG, W. **A normalized Hilbert-Huang transform technique for bearing fault detection**. Journal of Vibration and Control, v. 22, n. 11, p. 2771-2787, 2016.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. **A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial**. Revista Gestão Industrial. Vol.4, n.2, 2008.

OTTONELLO, C.; PAGNAN, S. **Modified frequency domain kurtosis for signal processing**. Electronics Letters, v. 30, n. 14, p. 1117-1118, 1994.

POLIKAR, Ri. Multi Resolution Analysis: **The Discrete Wavelet Transform**. *The Wavelet Tutorial Part IV*, Rowan University, College of Engineering Web Servers, vol. 10, 1998.

PRAKASH, **A review on machine condition monitoring and fault diagnostics using wavelet transform**, 2014.

RANDALL, R. B.. *Vibration-based Condition Monitoring*, 2011.

RAI, AKHAND; UPADHYAY, S. H. **A review on signal processing techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings**. *Tribology International*, 2016.

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*, 22(8), 1924–1951, 2008.

SAIDI, L; ALI, JAOUHER, B; FNAIECH, F. **The use of spectral kurtosis as a trend parameter for bearing faults diagnosis**. In: Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 2014 15th International Conference on. IEEE p. 394-399, 2014.

SEERA, M.; LIM, C. P.; ISHAK, D. e SINGH, H. **Fault detection and diagnosis of induction** Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 23(1): pp. 97-108, 2012.

SHIRADO, W. H et al. **Estudo comparativo entre algoritmos das transformadas discretas de Fourier e Wavelet**. Revista Brasileira de Computação Aplicada, v. 7, n. 3, p. 97-107, out. 2015. ISSN 2176-6649.

SMITH, W.A.; RANDALL, R.B. **Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: A benchmark study**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 64, p. 100-131, 2015.

SMITH, W. A. et al. **Electromagnetic interference in vibration signals and its effect on bearing diagnostics**, 2016.

SINGH, S., KUMAR, A., & KUMAR, N. **Detection of bearing faults in mechanical systems using motor current signature and acoustic signatures**. 21st International Congress on Sound and Vibration, *ICSV 2014*, 5, 4269–4276, 2014.

TANDON, N., & CHOUDHURY, A. **A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings**, v.32,n.1999, p.469–480, 2000.

TANDON, N.; PAREY, A. **Condition monitoring of rotary machines**. En *Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing*. Springer London, p. 109-136, 2006.

HARRIS, T.A; KOTZALAS, M.N, **Essential concepts of bearing technology**. Taylor & Francis, USA, 2007.

VORA, S., GAIKWAD, P. J. A., & KULKARNI, J. V. **Fault Diagnosis of Bearing of Electric Motor Using Wavelet Transform and Fault Classification Based on Support Vector Machine**, 2(5), 41–46, 2015.

VRABIE, V.D., GRANJON, P., 2004, “**Harmonic component characterization using spectral kurtosis**”. 12th European Signal Processing Conference, Sept. 7-10, Vienna, Austria, 2004.

XU, H.; CHEN, G. **An intelligent fault identification method of rolling bearings based on LSSVM optimized by improved PSO**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 35, n. 1-2, p. 167–175, 2013.

XU, PENG. **Automatic Fault Diagnosis for Rolling Element Bearings**. Tese de Doutorado. University of Calgary, 2014.

YANG, H., MATHEW, J., & MA, L. **Vibration Feature Extraction Techniques for Fault Diagnosis of Rotating Machinery -A Literature Survey**. *IN: Asia Pacific Vibration Conference*, (November), 12–14, 2003.

YIAKOPOULOS, C. T.; GRYLLIAS, K. C.; ANTONIADIS, I. A. **Rolling element bearing fault detection in industrial environments based on a K-means clustering approach**. *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 3, p. 2888–2911, 2011.

WANG, Y; LIANG, M. **An adaptive SK technique and its application for fault detection of rolling element bearings**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, no 5, p. 1750-1764, 2011.

## APÊNDICE - Programas Gerados Através do Matlab Programa

### 1 – Código do Matlab para implementação da técnica do envelope (Dados CWRU)

```

%Rolamento Rígido de esferas 6205-2RS JEM SKF (Rolamento com falha na
%pista interna potência igual a (0 Hp)
clear all;%remove todas as variáveis globais
close all;
clc;%limpa a tela
NSK_6205 = [9.0 7.94 25 52];%Dados do rolamento rígido de esferas

%Z= número de esferas; %d= diâmetro da esfera; %D= diâmetro Primitivo
Z = 9; d = 7.94; D = (52+25)/2; %D= diâmetro Pitch
Interna = Z*(1+d/D)/2; % 5.4281
Externa = Z*(1-d/D)/2; % 3.5719
Esfera = (1-d*d/D/D)*D/2/d; % 2.3398
Gaiola = (1-d/D)/2; %0.3969
freq_eixo =1797/60; % 29.95 hz
fr=1797/60;% Frequência do eixo
phi=0; %Ângulo de Contato
amostras =121265;

%Cálculo das Frequências de defeitos do rolamento
%['Frequência de defeito da pista externa']
FPE=(Z*fr/2)*(1-(d/D)*cos(phi));%Frequência de defeito da pista externa
%['Frequência de defeito na pista interna']
FPI=(Z*fr/2)*(1+(d/D)*cos(phi));%Frequência de defeito na pista interna
%['Frequência de defeito na esfera']
FES= (D*fr/(2*d))*(1-((d/D)*cos(phi))^2);%Frequência de defeito na esfera
%['Frequência de defeito da gaiola']
FG=(fr/2)*(1-(d/D));%Frequência de defeito da gaiola

%Carregando arquivo
load 105.mat%Carregando o sinal do banco de dados
sinal=X105_DE_time; % Define a amostra de Fs=12.000 pontos)
sinal = sinal - mean(sinal); % Retira o nível DC do sinal
N=length(X105_DE_time); % Captura o tamanho do vetor de dados

%Cálculos dos parâmetros de tempo e frequência
fs=12000; %Frequência de amostragem (sample_freq)
Ts=1/fs; % Delta de t
df=1/(N*Ts); % Delta de f
t = [0:Ts:N*Ts]; % Definindo um vetor temporal com o número de pontos do
sinal + 1
t = t(1:N); % Deixa o vetor do tamanho do sinal
f = [0:df:fs]; % Definindo um vetor de frequência com o número de pontos do
sinal + 1
f = f(1:N); % Deixa o vetor do tamanho do sinal

%ETAPAS PARA IMPLEMENTAR A TÉCNICA DO ENVELOPE
% 1 - Aplica a FFT no sinal para analisar qual região foi excitada pela
Falha;
% 2 - Filtra a região de excitação escolhida;
% 3 - Aplica a transformada de Fourier inversa no sinal filtrado;
% 4 - Com o sinal no domínio do tempo aplica o envelope;
% 5 - Novamente aplica a FFT no sinal de envelope.

```

```

% 1 - APLICANDO A FFT NO SINAL

fftsinal = 2*((abs (fft(sinal)))/N);

% Esse cálculo faz a FFT, considera o valor absoluto da FFT, divide por N
% porque a operação multiplicou por N,
% multiplica por 2 porque a FFT tem a banda lateral superior e inferior e
% só é plotada uma. O valor de amplitude está em tensão de pico (VP) ou
% valor de pico.
% 2 - FILTRAGEM DO ESPECTRO
% Faz-se a escolha da região que foi mais excitada pelo defeito. Essa
% escolha depende a experiência do operador (técnica convencional)
for i = 1:N
    if f(i)<2480 || f(i)>3160
        filtrofft(i)=0;
    else
        filtrofft(i) = fftsinal(i);
    end
end
% 3 - APLICANDO A TRANSFORMADA INVERSA NO ESPECTRO FILTRADO
ifftfiltro = ifft(filtrofft);
ifftfiltro = ifftfiltro - mean(ifftfiltro);
% 4 - RETIRANDO O ENVELOPE DO SINAL NO TEMPO
sinal_hb = abs(hilbert(ifftfiltro));
% 5 - APLICANDO A TRANSFORMADA DE FOURIER NO ENVELOPE
fftsinal_hb = fft(sinal_hb);
fftsinal_hb = fftsinal_hb - mean(fftsinal_hb);

% PLOTAGEM
% sinal completo no domínio do tempo
subplot(3,2,1)
plot(t,sinal)
axis([0 10 -5 5])
grid
xlabel('tempo (s)')
ylabel('amplitude (Vp)')
title('SINAL NO DOMINIO DO TEMPO')
% fft do sinal completo
subplot(3,2,2)
plot(f(1:N/2),fftsinal(1:N/2)) % Plota metade do espectro que é o que
interessa
grid
xlabel('frequência (Hz)')
ylabel('amplitude (Vp)')
legend('passo 1')
title('SINAL NO DOMINIO DA FREQUÊNCIA')
% fft da região filtrada do sinal
subplot(3,2,4)
plot(f(1:N/2),filtrofft(1:N/2)) % Plota metade do espectro que é o que
interessa
grid
xlabel('frequência (Hz)')
ylabel('amplitude (Vp)')
legend('passo 2')
title('REGIÃO EM FREQUÊNCIA FILTRADA')
% fft inversa do sinal filtrado (sinal no domínio do tempo)
subplot(3,2,3)
plot(t,ifftfiltro)
axis([0 10 -1e-4 1e-4])
grid
xlabel('frequência (Hz)')

```

```

ylabel('amplitude (Vp)')
legend('passo 3')
title('REGIÃO EM FREQUÊNCIA FILTRADA')
% transforma de Hilbert no sinal no tempo
subplot(3,2,5)
plot(t,sinal_hb)
axis([0 10 -1e-4 1e-4])
grid
xlabel('tempo(s)')
ylabel('amplitude (m/s^2)')
legend('passo 4')
title('ENVELOPE DO SINAL')
% espectro do sinal de Hilbert
subplot(3,2,6)
plot(f(5:N/2),fftsinal_hb(5:N/2))
axis([0 300 0 0.1])
grid
xlabel('frequência (Hz)')
ylabel('amplitude (m/s^2)')
title('ESPECTRO DO ENVELOPE')
ctr = sinal;
% CALCULANDO INDICADORES ESTATÍSTICOS DO SINAL
disp('ANALISE NO DOMINIO DO TEMPO')
ctr3=abs(ctr);
rms=sqrt(mean(ctr3.^2)) % -- Valor RMS do sinal
peak = (max(ctr3)-min(ctr3))/2.0
pico = max(ctr) % 2 -- Valor de Pico (peak)
crista = pico/rms% 3 -- Fator de Crista (crestfactor)
impulso = pico/mean(abs(ctr))%4 -- Fator de Impulso (impulsefactor)
tcur = ctr-mean(ctr);
curt = (amostras*sum(tcur.^4))/(sum(tcur.^2)^2) % Curtose do Sinal.

```

## Programa 2 – Código do Matlab para implementação do Filtro passa baixa

```

%Filtro passa Baixa FIR
fa=5000;
%Teorema de Nyquist- A frequência de amostragem deve ser pelo menos o dobro
da frequência máxima do sinal se não teremos perda no sinal
fsamp=fa;
s1=fftsinal_hb(5:N/2);
fp=500;%frequência de passagem
fs=2000;%frequência de corte
%normalização das frequências
wp=(fp/(fsamp/2*pi));
ws=(fs/(fsamp/2*pi));
wt=ws-wp;%frequência de transição
M=ceil((6.6*pi/wt))+1; %Comprimento do filtro
wc=(ws+wp)/2;%frequência de corte intermediária
hd = ideal_lp(wc, M);%função sinc para passa baixa ideal
w_hamm=hamming(M)';%Calcula a janela de Hamming
h=hd.*w_hamm;%faz a multiplicação entre os vetores (função impulso)
s1_filtrado=conv(h,fftsinal_hb(5:N/2));%convolução entre os sinais
my_fft(s1_filtrado,fsamp); %plota a FFT do sinal filtrado

```

### Programa 3 – Código do Matlab para análise MRA e CWT (Dados DATA/FEG)

```

clear all;%remove todas as variáveis globais
close all;
clc;%limpa a tela
NSK_6205 = [9.0 7.96 31.04 46.72];
%Z= número de esferas
%d= diâmetro da esfera
%D= diâmetro Primitivo
Z = 9; d = 7.96; D = (46.72+31.04)/2;
interna = Z*(1+d/D)/2;
externa = Z*(1-d/D)/2;
esfera = (1-d*d/D/D)*D/2/d;
gaiola = (1-d/D)/2;
freq_eixo =25; % 25.0166 hz
fr=25;% Frequência do eixo
phi=0; %Ângulo de Contato
amostras=40000;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Cálculo das Frequências de defeitos do rolamento
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%['Frequência de defeito da pista externa']
FPE=(Z*fr/2)*(1-(d/D)*cos(phi));%Frequência de defeito da pista externa
%['Frequência de defeito na pista interna']
FPI=(Z*fr/2)*(1+(d/D)*cos(phi));%Frequência de defeito na pista interna
%['Frequência de defeito na esfera']
FES= (D*fr/(2*d))*(1-((d/D)*cos(phi))^2);%Frequência de defeito na esfera
%['Frequência de defeito da gaiola']
FG=(fr/2)*(1-(d/D));%Frequência de defeito da gaiola

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Carregando arquivo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

load IN5
sinal=IN5; % Define a amostra de Fs=12000 pontos)
sinal = sinal - mean(sinal); % Retira o nível DC do sinal
N=length(sinal); % Captura o tamanho do vetor de dados

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Cálculos dos parâmetros de tempo e frequência
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fs=10000; %Frequência de amostragem (sample_freq)
Ts=1/fs; % Delta de t
df=1/(N*Ts); % Delta de f
t = [0:Ts:N*Ts]; % Definindo um vetor temporal com o número de pontos do
sinal + 1
t = t(1:N); % Deixa o vetor do tamanho do sinal
f = [0:df:fs]; % Definindo um vetor de frequência com o número de pontos do
sinal + 1
f = f(1:N); % Deixa o vetor do tamanho do sinal
X=sinal;
figure
plot(t,X)
X =sinal;
y = X;
y(100)=0;
w='db4'

```

```

n = 4; %níveis de decomposição
s=y;
[LO_D,HI_D] = wfilters('db4');
[C,L] = wavedec(X,4,LO_D,HI_D);
A4= wrcoef('a',C,L,w,4);
D4 = wrcoef('d',C,L,w,4);
D3 = wrcoef('d',C,L,w,3);
D2 = wrcoef('d',C,L,w,2);
D1=wrcoef('d',C,L,w,1);
figure
subplot(6,1,1)
plot(s(1:500));ylabel('s','rotation',0,'FontWeight','bold');
title('Sinal = A4+D1+D2+D3+D4','FontWeight','bold')
subplot(6,1,2)
plot(A4(1:500)); ylabel('A4','rotation',0,'FontWeight','bold');
subplot(6,1,3);
plot(D4(1:500));ylabel('D4','rotation',0,'FontWeight','bold');
subplot(6,1,4);
% ylabel('Aceleração em m/s^2','Rotation',0,)
plot(D3(1:500));ylabel('D3','rotation',0,'FontWeight','bold');
subplot(6,1,5);
plot(D2(1:500)); ylabel('D2','Rotation',0,'FontWeight','bold');
subplot(6,1,6);
plot(D1(1:500));ylabel('D1','Rotation',0,'FontWeight','bold');
xlabel('Número de Amostras')
%*****

```

**%CWT transformada contínua de Wavelet**

```
c=cwt(y,1:32,'db4');
```

```
figure;contour(c);
```

```
title('CWT');
```

```
xlabel('tempo (s)'),
```

```
ylabel('escala')
```

```

%*****
%*****

```

#### **Programa 4 – Código do Matlab para plotagem da FFT de um sinal**

```

%s é o sinal e fs =frequência de amostragem do sinal
function [s,frequency]=my_fft(s,fs)
normal=length(s);%normaliza o sinal do vetor s base de tempo
aux=0:normal-1;% vetor auxiliar
T=normal/fs;
frequency=aux/T;
S=fft(s)/normal;
fc=ceil(normal/2);%frequência de corte
S=S(1:fc);
figure();
plot(frequency(1:fc),abs(S));
title('Análise do espectro')
xlabel('frequência(Hz)')
ylabel('Amplitude')
end

```

### Programa 5– Código do Matlab Cálculo de espectrograma - STFT (Dados do Loparo)

```

%Carregando arquivo
load 105.mat
sinal=X105_DE_time; % Define a amostra de Fs=12000 pontos)
sinal = sinal - mean(sinal); % Retira o nível DC do sinal
N=length(X105_DE_time); % Captura o tamanho do vetor de dados
%Cálculos dos parâmetros de tempo e frequência
fs=12000; %Frequencia de amostragem (sample_freq)
Ts=1/fs; % Delta de t
df=1/(N*Ts); % Delta de f
t = [0:Ts:N*Ts]; % Definindo um vetor temporal com o número de pontos do
sinal + 1
t = t(1:N); % Deixa o vetor do tamanho do sinal
f = [0:df:fs]; % Definindo um vetor de frequência com o número de pontos do
sinal + 1
f = f(1:N); % Deixa o vetor do tamanho do sinal
X =sinal;
y = X;
y(100)=0;
yy= X;
figure;plot(t(1:3500),yy(1:3500)),
title('Sinal no tempo')
ylabel('amplitude'), xlabel('tempo (s)'),
s=yy;
nfft=256;
janela=256;
[b,f,t]=specgram(s,nfft,1000,janela,250);
figure,
imagesc(t,f,abs(b)),colormap cool, shading interp
xlabel('tempo (s)'),ylabel('frequência (hz)')
title(['janela ',num2str(janela)])
colorbar
axis xy
figure,surf(t,f,abs(b)),
colormap jet, shading interp,view(-38,70)
rotate3d on
title(['janela ',num2str(janela)])
xlabel('tempo (s)'),ylabel('frequência (hz)'),zlabel('amplitude')

```