

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DANILO DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO
CUSTO PARA DETECÇÃO PRECOCE DE DESGASTE
EM ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁ-
SICOS USANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÕES**

PORTO ALEGRE

2019

DANILO DE CARVALHO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA DETECÇÃO PRECOCE DE DESGASTE EM ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS USANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de concentração Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Duarte Ribeiro.

PORTO ALEGRE

2019

ESPAÇO RESERVADO PARA CIP BIBLIOTECA

Carvalho, Danilo

Desenvolvimento de um sistema de baixo custo para detecção precoce de desgaste em rolamentos de motores de indução trifásicos usando análise de vibrações / Danilo de Carvalho. – 2019. 150 f.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Duarte Ribeiro.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Rolamento. 2. Motor de indução trifásico. 3. Defeitos prematuros. 4. Metodologia. 5. Vibração. 6. Análise Espectros Frequência. I. Ribeiro, José Luis Duarte, orient. II. Título

DANILO DE CARVALHO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA DETECÇÃO PRECOCE DE DESGASTE EM ROLAMEN- TOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS USANDO ANÁ- LISE DE VIBRAÇÕES

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Transportes da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. José Luis Ribeiro
Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, PhD.
Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Juan Pablo Reggio Quintas (DEMEC/UFRGS)

Prof. Dr. Marcelo Cortemiglia (PPGEP/UFRGS)

Prof. Dr. Hans Kulitz (Depto Eng. Elétrica/IFES)

Porto Alegre – 2019

Dedico este trabalho a minha esposa Adriana

AGRADECIMENTOS

Esta tese não teria sido possível de ser realizada sem a contribuição e participação de pessoas que sempre estiveram ao meu lado, acreditando em meu trabalho e me incentivando quando momentos difíceis apareceram. Dentre elas, não poderia deixar de citar o incentivo de minha esposa Adriana, sem o qual eu teria desistido de me empenhar e superar todas as minhas dificuldades. A ela dedico este trabalho. Não poderia deixar de citar os colegas da Coordenação do Curso Técnico em Mecânica do IFES, campus Vitória, ES, que me apoiaram e incentivaram ao longo desta jornada. Agradeço também aos colegas da Coordenação do Curso Técnico em Eletrotécnica pela troca de ideias e apoio constante. Agradeço ao IFES pela oportunidade de realizar este doutorado através do convênio Dinter entre o IFES Campus Cariacica e o Departamento de Pós-Graduação do Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Agradeço ao apoio financeiro da CAPES através do suporte financeiro que me permitiu a construção da bancada e a aquisição de dispositivos que possibilitaram a realização deste trabalho. Agradeço à aluna Gabrielli Yamashita, do Programa de doutorado do Curso de Pós Graduação em Eng. Produção da UFRGS pela orientação e troca de ideias no uso das ferramentas de Estatística que nortearam as conclusões deste trabalho. Finalmente, um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. José Luis Ribeiro, cuja paciência e orientação foram fundamentais para que este trabalho fosse concretizado.

RESUMO

A proposta deste trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia de baixo custo para avaliação do desgaste de rolamentos utilizados em motores elétricos trifásicos. Para a realização deste trabalho, foram coletados dados de cinco rolamentos novos e 20 rolamentos usados em diferentes empresas e substituídos em atividades de manutenção. Os rolamentos ensaiados foram nomeados de E1 a E25 e agrupados em cinco categorias de acordo com seu estado visual de desgaste: (i) novo; (ii) ótimo; (iii) bom; (iv) desgastado e (v) muito desgastado. Cada um desses rolamentos foi ensaiado em uma bancada especialmente construída para esta atividade. As variáveis avaliadas foram temperatura, velocidade, amplitude de vibração, energia de vibração e nível de pressão sonora. Amplitude e energia de Vibração apresentaram variações maiores, e foram selecionadas como os melhores indicadores de desgaste. Os valores mensurados nos ensaios foram tratados no domínio da frequência usando-se a Transformada Rápida de *Fourier* (FFT). Os dados mensurados foram agrupados em tabelas que representam os estados dos rolamentos. Foram desenvolvidos critérios para realizar comparações entre os sinais de rolamentos novos e os sinais obtidos nos ensaios periódicos em rolamentos usados. A metodologia desenvolvida permitiu localizar o desgaste em rolamentos de esferas através das vibrações que o motor apresenta, baseado na análise da amplitude e energia das vibrações no mancal que suporta o rolamento de teste. Foi possível, também, estabelecer com critérios para utilização desta metodologia nos processos de manutenção das empresas.

Palavras-chave: rolamentos, vibração, espectro de frequência, deslocamento RMS, motor trifásico.

ABSTRACT

The proposal of this work was the development of a low cost methodology to evaluate the wear of ball bearings used in three-phase electric motors. In order to perform this work, data were collected on five new ball bearings and 20 used ball bearings substituted in regular maintenance activities. The ball bearings tested were labeled from E1 to E25 and grouped into five categories according to their visual wear state: (i) new; (ii) optimal; (iii) good; (iv) worn and (v) heavily worn. Each of these ball bearings was tested on a bench specially constructed for this activity. The variables evaluated were temperature, velocity, amplitude of vibration, energy of vibration and level of sound pressure. Vibration amplitude and energy presented greater variations, and were selected as the best indicators of wear. The values measured in the tests were treated in the frequency domain using the Fast Fourier Transform (FFT). The measured data were grouped into tables that represent the states of the ball bearings. Criteria were developed to make comparisons between the signals of new ball bearings and the signals obtained in the periodic tests on used ball bearings. The developed methodology allowed to locate the wear on ball bearings through the vibrations that the motor presents, based on the analysis of the amplitude and energy of the vibrations in the bearing that supports the ball bearing under test. It was also possible to establish criteria for the use of this methodology in companies' maintenance processes.

Keywords: bearings, vibration, frequency spectrum, RMS displacement, three-phase electric motors.

LISTA FIGURAS

Capítulo I	16
Figura 1.1.1 Exemplo de Motor de Indução Trifásico..	16
Figura 1.3.1 Condições que definem a durabilidade de rolamentos.....	23
Figura 1.4.1 Bancada de Ensaio Instrumentalizada.....	24
Figura 1.4.2 Placa de Aquisição de Dados Arduino.....	25
Capítulo II.....	36
Figura 2.4.1 Rolamento 6201 ZZ.	35
Figura 2.5.1 Fenômeno de Spalling.....	38
Figura 2.5.2 Fenômeno de False-Brinelling.....	39
Capítulo III.....	45
Figura 3.3.1 Amostra Rolamentos Utilizados.....	44
Figura 3.4.1 Bancada de Ensaio.....	45
Figura 3.4.2 Bancada de granito.....	48
Figura 3.4.3 Largura bancada granito.....	48
Figura 3.4.4 Largura base madeira.....	49
Figura 3.4.5 Amortecedor usado nos quatro cantos da bancada de madeira.....	49
Figura 3.4.6 Espessura base madeira.....	50
Figura 3.4.7 Localização decibelímetro.....	50
Figura 3.4.8 Localização sensor vibração na bancada de madeira.....	51
Figura 3.4.9 Motor com sensores.....	51
Figura 3.4.10 Motor com sensores e Arduino.....	52
Figura 3.4.11 Sensor de vibração instalado no motor	52
Figura 3.4.12 Sensores, motor, base madeira.....	53
Figura 3.4.13 Sistema de medição completo	52
Figura 3.5.1 Esquemático Ensaio interação motor bancada	53
Figura 3.5.2 Análise de Frequência Motor-bancada.....	55
Figura 3.6.1 Dados do rolamento 6201 ZZ.....	57
Figura 3.6.2 Esforços aplicados ao rolamento.....	60
Figura 3.7.1 Análise Espectral de um Sinal de 10Hz.....	62
Figura 3.7.2 Análise Espectral de um Sinal de 3kHz.....	62
Figura 3.10.1 Visão Geral de Diagnóstico de Falhas.....	65
Figura 3.11.1 Sistema de Coleta e Análise de Vibração	66
Figura 3.11.2 Ambiente de Software para Coleta de Dados	67
Figura 3.11.3. Dados Mensurados nos Ensaio.....	67
Capítulo IV.....	81
Figura 4.2.1 Curvas Características dos Rolamentos Novos.....	89

Figura 4.2.2	Curvas Características dos Rolamentos Ótimos.....	91
Figura 4.2.3	Curvas Características dos Rolamentos Bons.....	93
Figura 4.2.4	Curvas Características dos Rolamentos Desgastados.....	95
Figura 4.2.5	Curvas Características dos Rolamentos muito desgastados.....	96
Figura 4.3.1.1	Avaliação do comportamento temperatura motores.....	99
Figura 4.3.1.2	Avaliação do comportamento pressão sonora do conjunto.....	100
Figura 4.3.1.3	Avaliação do comportamento energia 0 a 50 Hz.....	100
Figura 4.3.1.4	Avaliação do comportamento energia 50 a 100 Hz.....	103
Figura 4.3.1.5	Avaliação do comportamento energia 100 a 150 Hz.....	104
Figura 4.3.1.6	Avaliação do comportamento energia 150 a 200 Hz.....	105
Figura 4.3.1.7	Avaliação do comportamento energia 200 a 250 Hz.....	106
Figura 4.3.1.8	Avaliação do comportamento energia total.....	107
Figura 4.3.1.9	Energia associada ao pico frequência de 118Hz.....	108
Figura 4.3.1.10	Energia associada ao pico frequência de 147Hz.....	110
Figura 4.3.1.11	Valores médios de deslocamento RMS.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.6.1 - Frequências naturais do rolamento ensaiado.....	58
Tabela 4.1.1 – Dados Coletados dos Rolamentos Novos.....	81
Tabela 4.1.2 – Dados Coletados dos Rolamentos Ótimos	83
Tabela 4.1.3. – Dados Coletados dos Rolamentos Bons.....	84
Tabela 4.1.4 – Dados Coletados dos Rolamentos Desgastados.....	85
Tabela 4.1.5 – Dados Coletados dos Rolamentos muito Desgastados.....	86
Tabela 4.3.1 - Correlação das variáveis analisadas com o macroindicador.....	113
Tabela 4.4.1- Critérios para Classificação do Estado do Rolamento.....	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.3.1 Quantidade de amostras de rolamento em cada estado de desgaste.....	47
Quadro 4.1.1 Estado dos Rolamentos.....	80
Quadro 4.4.1 Diagnóstico Rolamentos Estudados.....	86

LISTA SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC – Corrente alternada
AM - Amplitude Modulada
DC - Corrente Contínua
FCD – Frequências Características de Defeitos
FFT – Transformada Rápida de *Fourier*
FM - Frequência Modulada
MI – Motores de Indução
NBR – Normas Brasileiras Regulamentadoras
RNA – Redes Neurais Artificiais
PCA - Análise de Componentes Principais
USB – Porta Serial Universal
DSP - Processador Digital de Sinal
VHDL – Circuito integrado de alta velocidade
PDS - Densidade Espectral de Potência
MCSA – Análise Assinatura Corrente Motor
DWT - Transformada Wavelet Discreta
BPFI - Defeito Pista Interna Rolamento
BPFO – Defeito Pista Externa Rolamento
BSF – Defeito Elemento Rolante Rolamento
FTF – Defeito na Gaiola do Rolamento
SD – Cartão de Memória
GB – Giga Bite

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	16
1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS.....	16
1.2 PROBLEMA DA PESQUISA.....	21
1.3 JUSTIFICATIVA.....	22
1.4 BREVE DESCRIÇÃO DO MÉTODO.....	23
1.5 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	30
1.6 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	31
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	31
CAPÍTULO II.....	33
2.1 COMENTÁRIOS INICIAIS.....	33
2.2 BREVE HISTÓRICO.....	33
2.3 ROLAMENTOS.....	35
2.4 TIPOS DE ROLAMENTOS.....	35
2.5 AVARIAS EM ROLAMENTOS.....	37
2.6 AÇÕES CORRETIVAS.....	40
CAPÍTULO III PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	42
3.1 INTRODUÇÃO.....	42
3.2 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	42
3.3 ROLAMENTOS UTILIZADOS.....	42
3.4 BANCADA DE ENSAIOS.....	44
3.5 TESTE ESTABILIDADE BANCADA.....	53
3.6 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS.....	55
3.7 MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO.....	60
3.8 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER.....	62
3.9 A FFT NO SISTEMA DE DETECÇÃO DE DEFEITOS.....	63
3.9.1 Densidade Espectral De Potência.....	63
3.9.2 Amplitude de Vibração.....	63
3.9.3 Valor RMS de vibração.....	64

3.10 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS.....	65
3.11 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE DETECÇÃO DE DESGASTE.....	66
3.12 MODELOS DE DETECÇÃO DE DESGASTE E DEFEITOS EM ROLAMENTOS....	70
CAPÍTULO IV RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
4.1 DADOS COLETADOS.....	80
4.2 ESPECTRO DE FREQUÊNCIA.....	88
4.3 ANÁLISE DOS INDICADORES MAIS PROMISSORES PARA IDENTIFICAÇÃO DE DESGASTE PREMATURO.....	99
4.3.1 Análise dos resultados.....	100
4.4 CRITÉRIOS PARA IDENTIFICAR OS ESTADOS DOS ROLAMENTOS.....	113
4.5 USO DA METODOLOGIA EM EMPRESAS.....	116
4.6 RESUMO DO CAPÍTULO.....	118
CAPÍTULO V CONCLUSÕES.....	122
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	122
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	127
BIBLIOGRAFIA.....	129

CAPÍTULO I

1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

Máquinas elétricas são dispositivos capazes de converter energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Quando são empregadas como motores elétricos, convertem energia elétrica em energia mecânica e quando são utilizadas como geradores convertem energia mecânica em energia elétrica. De maneira geral, os motores elétricos são divididos em duas grandes classes: motores de corrente contínua (DC) e motores de corrente alternada (AC). Os motores AC também são denominados de motores de indução (MI). Dentre as principais vantagens do motor de indução sobre os motores de corrente contínua pode-se citar o baixo custo de aquisição e manutenção, a robustez e a grande faixa de potência disponível. Entretanto, deve-se destacar como principais desvantagens o controle de velocidade e a elevada corrente de partida (AUGIE, 2015). Em função do tempo de uso, os motores elétricos estão sujeitos a diversos tipos de falhas. Tais falhas, se não forem detectadas rapidamente, contribuem para a degradação e eventual quebra dos mesmos. O monitoramento, diagnóstico e detecção destas falhas justifica-se pela economia gerada através de sua prevenção antes da ocorrência (AUGIE, 2015). A figura 1.1.1 apresenta um típico motor de indução trifásico (MIT).

Figura 1.1.1. Exemplo de motor de indução trifásico



Fonte: [Weg Motores, 2016]

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. 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 processamento 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 máquinas elétricas. 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 desgaste ou 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 desgaste 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 (AMAR, 2015), dentre eles podem ser citados Lógica Fuzzy, Redes Neurais, Análise *Wavelets*, Análise de Componentes Principais (PCA) e outros.

A detecção de desgaste e falhas por meio da análise de vibrações em componentes de máquinas com rolamentos tem sido um tema extensivamente estudado na engenharia. No trabalho de (SILVA, 2014) é investigada a análise de falhas em máquinas elétricas através da análise de vibrações produzida por rolamentos por meio de uma bancada com um motor fixo a uma plataforma, onde a vibração foi monitorada por um acelerômetro e aquisição e tratamento de dados via software *LabView*. Em relação ao estudo desenvolvido nesta tese, observa-se em ambos os trabalhos a utilização de uma bancada de simulação

que permite realizar a análise das vibrações dos mais diferentes tipos de falhas facilitando a obtenção das frequências associadas aos defeitos.

Outro método utilizado para a detecção de defeitos em rolamentos é apresentado por (GONÇALVES, 2015). Esse autor apresenta um estudo baseado na inserção de defeitos em rolamentos. Um modelo PCA (Análise de Componentes Principais) foi criado com base nas amostras de um rolamento saudável e dois rolamentos com defeitos. A comparação entre os resultados obtidos nos ensaios permitiu o desenvolvimento de uma metodologia capaz de classificar corretamente 99,8% das amostras testadas.

A alta sensibilidade ao defeito apresentada pelo modelo sugere sua capacidade de detectar esse tipo de defeito em estágios mais incipientes. Comparativamente, o trabalho desenvolvido nesta tese utilizou uma proposta similar onde rolamentos novos e rolamentos com diferentes níveis de desgaste foram testados, e os resultados obtidos permitiram, através da metodologia desenvolvida, elaborar critérios para diagnosticar a presença de desgaste nos rolamentos testados.

Na mesma linha desta pesquisa, o trabalho de (FUCHS, 2016) analisa os sinais obtidos de um rotor em um aparato experimental, preparado para simular quatro situações: (i) Máquina nova; (ii) Máquina nova desbalanceada; (iii) Máquina com vida média; (iv) Máquina necessitando de reparo imediato. Basicamente, cada condição é caracterizada por uma massa desbalanceada e, também, por diferentes folgas dadas no mancal de rolamento. A monitoração da vibração é aplicada a estas situações tal que a análise do espectro de vibração permitiu a identificação dos problemas que ocorrem nas máquinas testadas. Em relação ao trabalho desenvolvido nesta tese pode-se verificar que ambos utilizam uma bancada para a realização dos ensaios, porém o trabalho de (FUCHS, 2016) se propôs a identificar defeitos específicos de desbalanceamento em máquinas elétricas e não se propôs ao desenvolvimento de uma metodologia para a identificação de desgaste, como proposto nesta tese.

Outra vertente que apresenta uma análise da técnica de vibração utilizada para o monitoramento das condições de operação de máquinas rotativas é apresentada por (TSYPKIN, 2015). Esse autor demonstra que a análise de

vibração é uma ferramenta muito eficiente e conveniente para diagnosticar problemas mecânicos e eletromagnéticos em motores de indução dentre eles falhas no rolamento, porém não especifica detalhadamente os problemas analisados, a técnica utilizada, a metodologia empregada e nem apresenta resultados experimentais que possam validar a análise realizada, como pode ser encontrado nesta tese.

A automação industrial utilizando a internet das coisas e o uso da eletrônica embarcada é foco do trabalho de (FILIPETTI, 2015) que explora a interactividade de máquinas e equipamentos. O trabalho desse autor é baseado na ideia de que as máquinas inteligentes devem ser capazes de identificar e prever possíveis falhas e atuar antes que elas ocorram. Vibrações é um problema recorrente em motores elétricos. Por este motivo, foi abordado um estudo experimental associado a um procedimento de classificação. Baseado em duas arquiteturas distintas para detectar anomalias como (i) placa de aquisição da *National Instruments* e (ii) uma placa Arduino. Com a implementação de uma aprendizagem supervisionada, ambas as abordagens corroboram a aplicabilidade e utilidade deste aprendizado de máquina-algoritmo para prever falhas de vibração e identificar e prever possíveis falhas e atuar antes que elas ocorram. Com a implementação de uma aprendizagem supervisionada, ambas as abordagens corroboram a aplicabilidade e utilidade do aprendizado de máquina-algoritmo para prever falhas de vibração. Comparando com o tema desenvolvido nesta tese, verifica-se que, em comum, ocorreu o uso de dispositivos tecnológicos como placa Arduino e sensores, além do uso da plataforma *MatLab* para aquisição e tratamento dos sinais obtidos nos, em contraste como o uso da plataforma *LabView* utilizada por Filipetti (2015), embora os resultados obtidos sejam semelhantes na análise dos sinais de vibração.

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 estacionariedade

como uma característica importante e, devido ao rápido crescimento do poder computacional, foram introduzidas novas técnicas de modelagem e simulação. Atualmente, as empresas mais avançadas, dentro de seus programas de manutenção preditiva, utilizam o monitoramento de máquinas a partir da análise de vibração, a fim de estabelecer o estado do equipamento e, em particular, de seus elementos críticos, tais como rolamentos, mancais, engrenagens, e desta forma, prevenir falhas catastróficas.

Os rolamentos são causas comuns de falhas em máquinas rotativas (CASSIMIRO, 2015), portanto, faz-se necessário a aplicação de técnicas que permitam a detecção e a localização de problemas, a fim de evitar a destruição do rolamento e, conseqüentemente, a parada da máquina. Em geral, os métodos no domínio do tempo alertam para o surgimento e o desenvolvimento da falha, contudo, não permitem um diagnóstico preciso e não localizam o defeito. Por outro lado, os métodos no domínio da frequência possuem a capacidade de indicar a localização da falha. Teoricamente, usando a técnica convencional de Análise Espectral via Transformada Rápida de *Fourier* (FFT), o espectro de frequências do sinal de vibrações, medido no mancal do rolamento, pode revelar as frequências características de componentes do rolamento que estão defeituosos (SANTOS, 2017).

As falhas nos rolamentos tipicamente ocorrem devido a defeitos localizados na pista externa, pista interna, nos elementos rolantes ou na gaiola que direciona os elementos rolantes. Estes defeitos geram uma série de impactos de vibração devido ao choque dos elementos rolantes com a superfície do defeito. Estas vibrações ocorrem em frequências características, que são estimadas em função da velocidade da rotação do eixo e da geometria dos componentes do rolamento. Estas frequências são denominadas de frequências características dos defeitos (FCDs) (MESQUITA et al., 2016).

Na maioria dos casos a pista externa é fixa e a pista interna gira junto com o eixo de rotação da máquina. Uma vez que a vibração dos impactos (no defeito) possui, relativamente, nível reduzido energia, e considerando que, no espectro, as FCDs podem ser mascaradas por nível de pressão sonora e vibrações geradas por outros elementos da máquina, muitas vezes é difícil identificar

as frequências dos defeitos em uma análise espectral tradicional.

Outro problema que surge na análise espectral é que, devido a pequenas variações na velocidade rotacional, os picos correspondentes às FCDs são espalhados (“*smeared*”) em linhas espectrais adjacentes e têm seus níveis de amplitudes reduzidos, dificultando mais ainda a identificação das FCDs (MESQUITA et al., 2016). Como já mencionado, as FCDs, em geral, são difíceis de serem detectadas em uma simples análise espectral. Contudo, os impactos oriundos do defeito do rolamento causam vibração que excita alguma ressonância de algum componente do rolamento ou do motor. Estes componentes têm frequência muito mais alta que a faixa de frequência em que, geralmente, surgem as FCDs, e este aspecto é explorado nesta tese, onde o desgaste dos rolamentos é detectado através das vibrações do mancal do motor.

No espectro, a frequência de ressonância surge flanqueada por bandas laterais (“*sidebands*”). Estas bandas laterais surgem nos espectros devido a uma modulação no sinal, que pode ser na amplitude (AM) ou na frequência (FM). Modulação na amplitude é uma variação de amplitude em um sinal de frequência constante, enquanto que modulação na frequência é uma variação em frequência de um sinal de amplitude constante. Além disto, tais bandas laterais nos sinais de vibração em rolamentos defeituosos surgem em torno de uma frequência de ressonância (frequência portadora). Modulações em amplitude são comuns nestes sinais. Frequências naturais podem ser moduladas em amplitude pela frequência do defeito, e esta, por sua vez, pode ser modulada pela frequência da rotação da máquina (SANTOS, 2016).

1.2 PROBLEMA DA PESQUISA

Os rolamentos são, dentre os componentes de um motor, um dos mais importantes e um dos mais utilizados como elemento de ligação entre componentes com movimentos relativos de rotação. Os mesmos estão presentes nos mais diversos tipos de aplicação, rotação, tamanho e ambiente. A sua falha, em geral, leva a parada do equipamento trazendo prejuízos à operação. A partir da evolução dos processadores de sinais eletrônicos, as técnicas de monitoramento, análise e diagnóstico tem apresentado grande evolução (THOMSON, 2017). Estes rolamentos são projetados para trabalhar alguns milhares de hora,

podendo atingir uma vida muito maior do que a prevista em função da carga, da qualidade da lubrificação e da contaminação a que estão submetidos. Em função da sua utilização em processos críticos, uma falha de um rolamento pode acarretar sérios prejuízos, quer no próprio equipamento ou em função de uma parada de produção. Portanto o monitoramento, análise e correção de problemas de rolamentos são operações críticas de responsabilidade da manutenção. Esta tese apresenta um método de baixo custo para elaborar um diagnóstico de desgaste em rolamentos de motores elétricos de indução trifásicos (MIT). O método desenvolvido permite a elaboração de um diagnóstico capaz de avaliar a degradação precoce dos rolamentos e antecipar a necessidade de realização de manutenção visando evitar a falha do equipamento, evitando desta forma paradas imprevistas nos sistemas produtivos. Dentre diversos benefícios quando do emprego desta técnica em equipamentos industriais pode-se citar a redução de custos na produção e o aumento da disponibilidade e confiabilidade dos processos eletromecânicos (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

1.3 JUSTIFICATIVA

De acordo com (VASCONCELOS, 2015), equipamentos elétricos e mecânicos podem ser deteriorados devido às condições operacionais. Água, poeira, calor, frio, umidade, atmosfera corrosiva, resíduos químicos, vibrações e inúmeras outras condições podem afetar a confiabilidade operacional e a vida útil dos equipamentos. Estas condições desfavoráveis, combinadas com negligência e descuido na manutenção do equipamento resultam em falha prematura, desnecessária e, em muitos casos, na sua completa destruição. Custos de reparos podem ser evitados implantando-se as recomendações de manutenção fornecidas pelo fabricante. De maneira geral, condições impróprias de funcionamento a que os motores elétricos possam ser submetidos irão afetar o desempenho e a vida útil dos rolamentos tais como surtos de tensão, sobrecargas, falta e desequilíbrio de fases que causam consequências e provocam o desgaste prematuro dos rolamentos. Outros fatores como umidade, calor, vibrações e agentes físicos que podem agredir os rolamentos do motor quando instalado em um determinado ambiente também devem ser considerados.

A durabilidade dos rolamentos dos motores elétricos depende de três

condições importantes, tais como (i) instalação, (ii) utilização e (iii) manutenção. A interação destas três condições faz-se necessária para prover requisitos mínimos que garantam operacionalidade adequada aos motores elétricos e seus rolamentos, conforme pode ser observado na Figura 1.3.1.

Figura 1.3.1 Condições que definem a durabilidade de rolamentos



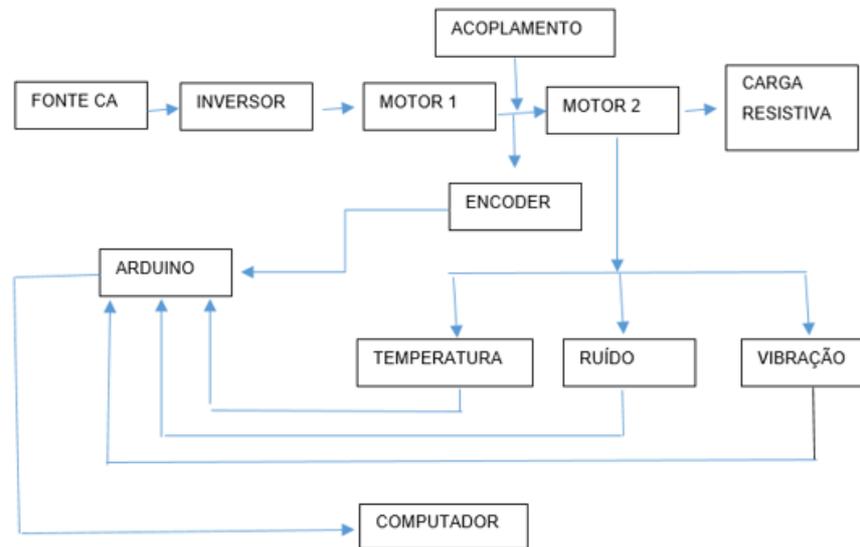
[Fonte: Freibergger, 2011]

Alguns exemplos de trabalho em condições severas acontecem quando o motor trabalha acima de sua capacidade nominal, em locais de muita vibração e/ou temperaturas superiores a 40°C, ou motores instalados próximos de fontes transmissoras ou irradiantes de calor, e regime de trabalho não constante (ora com carga, ora sem carga), onde também podem ocorrer partidas e paradas sucessivas (SANTOS, 2017).

1.4 BREVE DESCRIÇÃO DO MÉTODO

Para a execução deste trabalho foi construída uma bancada que possibilitou a realização de ensaios de motores de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola. A bancada é constituída por um sistema de acoplamento mecânico entre motores acionados por inversor de frequência, instrumentalizada por sensores e transdutores, placa de aquisição de sinais e computador para aquisição, registro e tratamento dos sinais através de softwares específicos. A figura 1.4.1 mostra o diagrama esquemático da bancada.

Figura 1.4.1 Bancada de ensaios instrumentalizada



[Fonte: o autor]

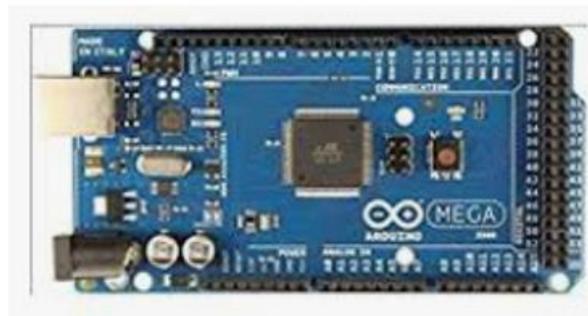
Deve-se observar que os sensores de temperatura, ruído e vibração estão inseridos no motor 2, enquanto o sensor de velocidade está inserido no eixo de acoplamento entre os motores. Além disso, usa-se um inversor de frequência para controle e estabilização da corrente do motor. Todos os dados absorvidos pelos sensores são encaminhado ao Arduino que os armazena em sua memória externa. Além disso, o Arduino encaminha esses dados para um computador via cabo USB para registro e tratamento dos sinais.

O sistema de aquisição e processamento de dados para ensaios de motores de indução trifásicos (MIT) com rotor do tipo gaiola, atendeu ao estabelecido nas normas de ensaios de motores elétricos de indução trifásicos (NBR-5383-1:2002). Este trabalho utilizou uma técnica de análise de sinais baseada na análise espectral de frequência, apoiando-se na transformada rápida de *Fourier* (FFT) (MESQUITA et al., 2011). O uso da técnica convencional de Análise Espectral via FFT, permitiu avaliar o espectro de frequências do sinal de vibrações, medido na tampa do motor por onde sai o eixo do motor, localizado bem próximo ao rolamento. Desta forma, foi possível obter as frequências características do motor. Em geral, o monitoramento de máquinas e equipamentos é realizado através da obtenção dos sinais de vibração da máquina operando a uma velocidade constante, o que caracteriza este sinal como estacionário, ou

seja, suas componentes em frequência não variam com o tempo. Neste caso, a transformada de *Fourier* pode ser utilizada como ferramenta para o estudo das características espectrais do sinal no domínio da frequência. Foram avaliados motores com rolamentos novos e rolamentos usados, já substituídos e fora de uso por apresentarem algum nível de degradação.

Como contribuição inovadora, o método desenvolvido neste trabalho irá permitir comparações estatísticas de espectros de frequência, indicando quando as diferenças são significativas, alterando o diagnóstico do rolamento com funcionamento normal para rolamento desgastado, demandando substituição. Espera-se que o método desenvolvido, apoiado no nível de pressão sonora, na amplitude de vibração e análise espectral de frequência, possibilite um diagnóstico preciso e eficiente do estado físico dos rolamentos, indicando a necessidade de sua substituição quando for o caso. Para tanto foram utilizados sensores cujos sinais foram coletados por uma placa de aquisição de sinal denominado Arduino, conforme mostra a figura 1.4.2.

Figura 1.4.2 - Placa de aquisição de dados Arduino



[Fonte: Arduino Co.]

Os valores obtidos foram armazenados em um software dedicado, especialmente desenvolvido para o tratamento desses sinais em uma plataforma *MatLab/Simulink*, onde os dados numéricos obtidos nos ensaios foram convertidos em gráficos no domínio do tempo e convertidos ao domínio da frequência usando-se a transformada rápida de *Fourier* denominada *FFT*. O estudo envolveu a avaliação das características de funcionamento dos rolamentos de um MIT quando em operação normal e quando sujeito a desgastes que comprometem sua eficiência e, portanto, o desempenho do processo produtivo.

O Foco principal desta tese é o desgaste de rolamentos. Contudo, vale ressaltar que vibrações anormais também podem ser consequências de uma falha no alinhamento, redução da vida útil dos mancais e do acoplamento, além de uma redução no rendimento do motor. Elas podem ter como origem uma fixação insuficiente ou defeituosa do motor em sua base, de folgas excessivas dos mancais, ou, ainda, de um balanceamento inadequado nas partes giratórias (FREIBERGER, 2011). Em casos onde ocorre a queima dos motores, as causas devem ser investigadas. A queima pode ocorrer por fatores como travamento dos rolamentos, com consequente queima por sobrecarga.

A inspeção do estado dos rolamentos obtida com auxílio de um medidor digital de vibração é um importante auxílio nas atividades de manutenção. Os rolamentos ZZ, classe usada nesta tese, vão de 6201 ao 6308, e sua vida útil está em torno de 20.000 horas. Os motores até a carcaça 132 são fornecidos com rolamentos ZZ e não possuem graxeira, enquanto que para motores da carcaça 160 até a carcaça 200 o pino graxeira é opcional. Acima desta carcaça (225 à 355) a presença do pino graxeira é usual.

Os rolamentos usados nos motores desta tese são do tipo ZZ 6201. A finalidade da manutenção, neste caso, é prolongar o máximo possível a vida útil do conjunto mancal-rolamento. A manutenção abrange: i) observação do estado geral em que se encontram os mancais; ii) lubrificação e limpeza; iii) exame minucioso dos rolamentos. Na substituição dos rolamentos, a fim de evitar danos aos núcleos, após a retirada da tampa do mancal, o entreferro entre o rotor e o estator foi calçado com cartolina de espessura correspondente. A desmontagem dos rolamentos foi realizada utilizando ferramentas adequadas (extrator de rolamentos). As garras do extrator foram aplicadas sobre a face lateral do anel interno a ser desmontado ou sobre uma peça adjacente. A montagem dos rolamentos foi efetuada em condições de rigorosa limpeza e por pessoal qualificado para assegurar um bom funcionamento e evitar danos. Rolamentos novos somente foram retirados da embalagem no momento de serem montados (conforme recomendado por AGOSTINHO, 2013). Neste trabalho, a norma ABNT NBR5383 foi utilizada como referência principal, determinando os procedimentos para o conjunto dos ensaios realizados.

O conjunto de ensaios escolhidos foi definido de forma a otimizar o tempo e atender ao que é prescrito pela norma. Foram ensaiados um conjunto de vinte e cinco rolamentos com diversas características de uso. As curvas com os espectros de frequência obtidos nesses ensaios e o método desenvolvido permitiram uma avaliação do comportamento do motor bem como a avaliação do estado do rolamento, indicando a eventual necessidade de substituição.

No trabalho de SILVA, (2012) intitulado Bancada para Análise de Vibração, é investigada a análise de falhas em máquinas elétricas através da análise de vibrações produzida por rolamentos por meio de uma bancada com um motor fixo a uma plataforma, onde a vibração foi monitorada por um acelerômetro e aquisição e tratamento de dados via software LabView. O trabalho concentrou simulações em desbalanceamento do eixo de rotação e comprovou que, quando se trata de desbalanceamento do eixo do motor, o pico do espectro de frequência do sinal de vibração ocorre na frequência de rotação do equipamento. Em relação ao trabalho desenvolvido nesta tese, observa-se em ambos os trabalhos a utilização de uma bancada de simulação que permite realizar a análise das vibrações dos mais diferentes tipos de falhas facilitando a obtenção das frequências de defeito.

Outro método utilizado para a detecção de defeitos em rolamentos é apresentado por (SILVA, 2012) no trabalho intitulado Análise de Componentes Espectrais para avaliação de defeitos em rolamentos de máquinas elétricas. A metodologia utilizada pelo autor apresenta um estudo baseado na inserção de defeitos em rolamentos. Um modelo PCA foi criado com base nas amostras de um rolamento saudável e dois rolamentos com defeitos. A comparação entre os resultados obtidos nos ensaios permitiu o desenvolvimento de uma metodologia capaz de classificar corretamente 99,8% das amostras testadas. A alta sensibilidade ao defeito apresentada pelo modelo sugere sua capacidade de detectar esse tipo de defeito em estágios mais incipientes. Comparativamente, o trabalho desenvolvido nesta tese utilizou uma proposta similar onde rolamentos novos e rolamentos com diferentes defeitos foram testados e os resultados obtidos permitiram através da metodologia desenvolvida elaborar modelos capazes de diagnosticar a presença prematura de defeitos nos rolamentos testados.

Por outro lado, o trabalho apresentado em (COSTA, 2015) intitulado Instrumento de Análise e diagnóstico em Máquinas Rotativas de Indução apresenta o estudo e o desenvolvimento de um instrumento de análise de falhas e diagnóstico em máquinas rotativas de indução, em tempo real, pela monitoração da vibração e da corrente elétrica, de forma a se diagnosticar falhas e defeitos, por meio da associação e consulta a padrões de espectros de frequência de corrente e vibração mecânica. O analisador de vibração proposto fará a aquisição dos sinais de corrente e aceleração, cálculo dos espectros de frequência, implementação de algoritmos de análise e diagnóstico de falhas e o processamento dos dados numéricos obtidos, em processador DSP faz uma transformação automática e direta do programa criado no Matlab/Simulink para a linguagem de descrição de hardware VHDL. Esse autor afirma ser esta uma proposta inicial para apresentação do estágio inicial da descrição comportamental do instrumento de análise de falhas e diagnóstico de máquinas rotativas de indução em tempo real, cuja aplicação não necessita de nenhum especialista em vibrações mecânicas, e isso permitirá um ganho considerável em tempo e custos de manutenção, possibilitando, em tempo real, a detecção do defeito e estabelecimento de um diagnóstico e a análise da tendência de falhas. Comparado ao estudo de Costa (2015), esta tese apresenta como diferencial o uso de tecnologias mais avançadas, como o uso de Arduino e sensores como acelerômetros, sensores de vibração, encoder e outros, além do desenvolvimento e construção de uma bancada para ensaios. Apresenta também como diferencial a análise dos espectros de frequência de rolamentos com diferentes estados de conservação, o que permitiu o desenvolvimento de uma metodologia para a identificação precoce de desgaste nos rolamentos.

No trabalho de (CESARDA, 2016) é apresentado um método experimental inteligente para medição de vibração e detecção de falhas desbalanceadas em máquinas rotativas. Uma análise de espectro completo é apresentada para o sinal de vibração para revelar as assinaturas específicas de falha. Os resultados indicam claramente o potencial e a viabilidade da abordagem discutida para o diagnóstico do desbalanceamento do rotor em um sistema de eixo do rotor acoplado a um motor de indução trifásico. A preocupação do autor foi

averiguar como o desbalanceamento no rotor pode afetar o comportamento do motor, especialmente o desequilíbrio do rotor como causa mais comum de vibração da máquina, porém algumas lacunas como informações adicionais sobre a realização de ensaios, resultados obtidos e metodologia utilizada não foram apresentadas de maneira clara e detalhada impedindo uma análise mais detalhada dos procedimentos adotados e resultados obtidos. Além disso, a análise de picos do espectro de frequência não apresenta parâmetros comparativos para diagnosticar com precisão a demanda de energia dispendida pelo desbalanceamento da máquina.

O trabalho de (PLANT, 2015) intitulado Detecção de Falhas e Previsão de Falhas Usando Análise de Vibração concentrou-se na análise de vibrações dos motores elétricos para detectar falhas em equipamentos rotativos com o uso de análise de vibração. Uma experiência de monitoramento de condições do motor é configurada e a velocidade operacional do motor é controlada por um acionamento do motor CA. A vibração do motor é medida e monitorada. Os dados de vibração medidos são analisados usando software de análise de espectro e um programa MATLAB. O nível geral de vibração é monitorado, a gravidade da vibração é comparada com a tabela de gravidade padrão e é usada para determinar a condição do motor. A frequência natural específica corresponde a qual tipo de falha ou modo de falha é identificado. Esta informação fornece uma visão sobre a condição da máquina. Observa-se que esta tese também utiliza a análise do espectro de frequência da vibração do rolamento, que, indiretamente, também afeta o comportamento da máquina. O trabalho de (PLANT, 2015) porém não se concentrou em um dispositivo específico capaz de causar a vibração, mas apenas em avaliar como a vibração pode interferir no comportamento do motor. Esta tese, entretanto, teve por objetivo avaliar como o rolamento de motor pode causar vibrações na máquina e como estas irão afetar o comportamento da máquina. (PLANT, 2015) também não desenvolveu uma metodologia ou critérios para identificar o problema, conforme desenvolvido nesta tese.

MORUTHI et al. (2014) utilizou apenas acelerômetros para identificação de defeitos enquanto nesta tese são usados, além do acelerômetro, encoders,

sensores de temperatura e decibelímetros. Ambos os trabalhos utilizam FFT para análise das curvas de espectro de frequência, embora esta tese também utilize a função RMS para análise das vibrações provocadas pelos rolamentos. Além disso, esta tese faz uma série de ensaios com rolamentos que apresentam diversos níveis de desgaste, e realiza uma análise detalhada dos sinais obtidos pelos sensores.

Diversos outros trabalhos encontram-se na literatura técnica. Selecionamos para análise os trabalhos acima como forma de comparação e posicionamento do trabalho desenvolvido nesta tese, enfatizando os aspectos inovadores que ela apresenta. Verifica-se que, nos trabalhos acima avaliados, a técnica de monitoramento foi usada para detectar falhas diversas em rolamentos de motores elétricos. Existem muitos tipos de técnicas de monitoramento que são usadas para a detecção de falhas. Esta tese concentrou suas atenções na análise e detecção prematura do desgaste dos rolamentos, um tema ainda incipiente na literatura especializada.

1.5 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um método para diagnóstico do estado do rolamento e detecção precoce da presença de desgaste, utilizando o monitoramento dos sinais de vibração no mancal que suporta o rolamento, apoiado no uso de técnicas de análise de espectro de frequência. Um ponto importante que merece destaque é a construção de uma bancada de testes que propicia a possibilidade de diversos estudos além desta tese. Em particular, pretende-se que esta bancada seja utilizada em aulas práticas de laboratório do Instituto Federal do Espírito Santo nos cursos técnico de Eletrotécnica e Mecânica bem como nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, contribuindo para qualificar o ensino de engenharia no Instituto Federal do Espírito Santo. O estudo e a aplicação do método irá proporcionar aos alunos desses cursos qualificação para utilizar os preceitos da análise de vibrações, podendo atuar nas empresas como executores ou até mesmo como empreendedores. Um outro aspecto que merece destaque é o fato que o método desenvolvido, de

baixo custo, poderá ser utilizado em pequenas e médias empresas. Entre os objetivos específicos destacam-se: i) testar, na bancada construída, os motores elétricos típicos, em perfeitas condições de uso para estabelecer parâmetros iniciais de funcionamento. Este teste deve ser realizado utilizando rolamentos novos ou em ótimas condições; (ii) criar um banco de dados com os resultados obtidos nos ensaios, para comparações futuras; (iii) avaliar rolamentos em uso, para verificar seu estado físico; (iv) comparar os dados obtidos nas duas situações acima descritas através da análise das curvas de frequência obtidas e (v) estabelecer um método para o diagnóstico do desgaste dos rolamentos dos motores elétricos avaliados, definindo através de critérios pré-estabelecidos se os rolamentos podem ser mantidos em uso ou se devem ser substituídos.

1.6. DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Um motor elétrico possui inúmeras variáveis importantes que podem afetar seu desempenho, tais como tensão, frequência, corrente elétrica, velocidade, torque, deslizamento, fator de potência e temperatura dos enrolamentos, além dos diversos tipos de acoplamento em seu eixo. O local de instalação também pode influir em seu desempenho. Pode-se considerar também a possibilidade de mais de uma variável interagindo entre si como outro fator de influência. A análise do comportamento do motor face a tantas variáveis dificulta a elaboração de um diagnóstico completo sobre o estado geral do motor. Considerando que todas as demais variáveis podem ser influenciadas por um defeito no rolamento do motor e que este é um elemento que deve ser substituído em função de desgaste, optou-se por uma investigação mais precisa e detalhada das vibrações do motor e da identificação de desgaste nos rolamentos, desconsiderando-se os demais fatores citados acima.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese apresenta a seguinte estrutura:

No Capítulo I apresenta-se esta introdução, discorrendo sobre os objetivos do trabalho, justificativa e breve apresentação da abordagem teórica. O segundo capítulo apresenta um levantamento do estado da arte referente a medições e previsões de falhas em MIT em função de seus rolamentos. Este capítulo

também apresenta uma revisão da literatura sobre comparação de curvas, concentrando-se nos métodos de comparação de espectros de frequência. O Capítulo III discorre sobre a realização de testes e ensaios para aquisição dos sinais de nível de pressão sonoras, velocidade, temperatura e vibração nos rolamentos dos MIT. Apresenta os resultados obtidos nos ensaios com motores utilizando rolamentos novos e substituídos de outros motores elétricos equivalentes. O capítulo IV analisa e discute os resultados obtidos apresentando o desenvolvimento e aplicação do método para diagnóstico de desgaste em rolamentos de motores elétricos de indução trifásicos usando técnicas de análise de espectro de frequência. O Capítulo V apresenta as conclusões finais e perspectivas para a realização de trabalhos complementares.

Esse método foi desenvolvido para facilitar e tornar mais eficiente a decisão referente a avaliar se o rolamento se encontra em condições de trabalho ou se deve ser substituído em função do nível de vibração ou gasto de energia emitido. Vale mencionar que o desenvolvimento deste trabalho foi possível por meio de um recurso adquirido junto ao CNPq – chamada 17/2014 – Linha 4, através da aprovação de um projeto denominado CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS EM MOTORES ELÉTRICOS DE CORRENTE ALTERNADA.

CAPÍTULO II - AVARIAS EM ROLAMENTOS

2.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

Neste capítulo serão analisadas as técnicas utilizadas para a identificação de anomalias e defeitos em rolamentos, especificamente utilizando-se a análise de espectro de frequência, particularmente usando-se a transformada rápida de *Fourier* (FFT), com o intuito de contextualizar este trabalho na identificação de defeitos que podem ocorrer nos rolamentos e como esta técnica pode identificá-los antes que esses rolamentos comprometam o funcionamento dos motores e do processo produtivo onde estão inseridos.

2.2 BREVE HISTÓRICO

O motor elétrico é a máquina mais utilizada na indústria. Estima-se que mais de 90% de todos os motores usados na indústria são motores de indução (DEVANEY, 2014). Por isso qualquer tipo de falha que ocorra pode ser catastrófica em relação ao processo em que o motor está inserido, originando, por vezes, perdas muito elevadas. Dentre os dispositivos utilizados em um motor elétrico, os rolamentos representam um dos componentes mais sensíveis ao desenvolvimento de falhas devido aos problemas a que estes são expostos como desalinhamentos e desbalanceamentos, montagens inadequadas, lubrificação deficiente, sobrecargas imprevistas, desgastes por contaminação e fadiga superficial das pistas ou elementos rolantes. Estes fatores justificam as razões pelas quais verifica-se o constante interesse pela manutenção preditiva de rolamentos.

Em condições normais de operação os rolamentos estão sujeitos a várias fontes de excitação gerando sinais que apresentam características relacionadas com o estado do elemento. Inicialmente, quando o rolamento se encontra

em bom estado, o sinal se apresenta como um nível de pressão sonora aleatório de banda larga com nível reduzido amplitude de vibração. Em seguida, com o surgimento e desenvolvimento de uma pequena falha na pista estacionária o sinal obtido mostra alguns transientes periódicos com amplitudes praticamente invariantes no tempo, o que facilita sua análise pelos métodos baseados na aplicação da transformada de *Fourier*. Porém quando a falha se desenvolve na pista rotativa ou no elemento rolante, o efeito do carregamento e do meio de transmissão irão causar uma modulação na amplitude de vibração gerando um sinal cujo espectro apresenta bandas laterais mistas que dependem da posição angular da falha (DELGADO et al., 2017). Além disso, a presença de ruídos e de outras fontes de vibrações internas da máquina ou transmitidas através das fundações podem aumentar a complexidade dos sinais, dificultando a sua análise.

Num estágio mais avançado de falha em rolamentos, o sinal volta a apresentar características típicas de nível ruído. O seu espectro apresenta uma configuração de banda larga em frequências, não permitindo fazer um diagnóstico confiável da frequência característica do defeito. Neste caso, os efeitos dos impactos irão dominar o espectro. As amplitudes correspondentes se tornam altas em relação às amplitudes de vibração medidas quando os rolamentos estavam em bom estado (DELGADO et al., 2017).

Segundo DEVANEY (2016), 40 a 50% das avarias registradas em motores de indução são consequência de anomalias que ocorrem nos rolamentos. Uma nova tendência de gestão de manutenção que está em vigência nas grandes empresas faz com que a competitividade e as exigências do mercado tenham um efeito positivo na melhoria dos desempenhos da generalidade dos equipamentos, por outro lado têm um aspecto negativo em relação a problemas de operação e manutenção das máquinas. Depara-se então com uma nova filosofia de manutenção, com critérios de qualidade, rentabilidade e disponibilidade de recursos inseridos nas atividades de gestão global da empresa, em um universo de máquinas com maiores exigências de desempenho, menores custos e, conseqüentemente, maior número de horas a operar sem atividades de manutenção (WEI et al., 2017).

Para diagnosticar avarias mecânicas como falhas nos rolamentos, ainda

são utilizadas técnicas como análise de sinais vibratórios e análise de sinais elétricos para obter-se a informação necessária para o diagnóstico (BELLINI et al., 2016). Esta tese, entretanto, irá utilizar a técnica de análise do espectro de frequência das vibrações do motor, usando a Transformada Rápida de *Fourier*, para identificação do desgaste e estado geral do rolamento.

2.3 ROLAMENTOS

Um rolamento pode ser definido como uma peça constituída por vários elementos que serve para apoiar o movimento de componentes de uma máquina e evitar a fricção de deslizamento entre as superfícies do eixo e da chumaceira. Dos vários tipos de rolamentos existentes, muitos são uma combinação de três elementos, a saber: (i) anéis com pistas, (ii) corpos rolantes (esferas ou rolos) (iii) um elemento retentor que é a gaiola. A Fig. 2.4.1 ilustra de uma forma simplista a constituição de um rolamento fixo de esferas e as suas dimensões.

2.4 TIPOS DE ROLAMENTOS

Existem diversos tipos de rolamentos desenvolvidos para as mais diferentes aplicações. O rolamento utilizado neste trabalho foi o 6201 ZZ como pode ser visto na Figura 2.4.1 (Fonte: SKF, 2016).



Fonte: [SKF, 2016]

Nesta tese, os rolamentos utilizados foram os rolamentos radiais fixos de esfera. Estes dividem-se em três partes principais, a parte rotacional, a não

rotacional e os corpos rolantes que estão entre estas duas partes. Destes elementos também faz parte uma gaiola que permite manter os elementos rolantes equidistantes entre si. Este tipo de rolamentos pode ser dividido em dois sub-grupos em função do corpo rolante que utiliza. Os corpos rolantes podem ser esferas ou rolos (SKF, 2016). Estes são usados em diversas aplicações, têm uma construção simples, as suas partes constituintes não são separáveis e podem operar a velocidades elevadas, podem suportar carga radial combinada com carga axial moderada, mas têm um nível reduzido de tolerância ao desalinhamento do eixo. Este tipo de rolamento não requer uma manutenção muito frequente e complicada, o que aliado a um custo reduzido faz com que seja uma solução popular e largamente utilizada (SADARANGI, 2016). Quando da especificação de um rolamento é importante observar uma série de parâmetros importantes para sua melhor adequação e eficiência, tais como (i) dimensão: na maioria dos casos a potência de saída determina o tamanho do eixo, e consequentemente, o tamanho do eixo determina o diâmetro do furo do respectivo rolamento.

Nos últimos anos, para tornar os motores mais compactos, a tendência tem sido a de reduzir a largura dos rolamentos; (ii) cargas: com o intuito de escolher o melhor rolamento para uma determinada aplicação, todos os tipos de carga devem ser levados em conta e não apenas os pesos envolvidos e as forças que resultam da potência transmitida. É importante considerar as forças que resultam de desequilíbrios e desalinhamento de cargas, assim como as forças que estão associadas aos sistemas de transmissão (caixa de velocidades, correia, etc), (iii) velocidade: a velocidade de operação de um motor influencia a longevidade do rolamento e da respectiva lubrificação; (iv) eixo e chumaceira: devido à variação de temperatura a que os componentes do motor estão sujeitos é normal que ocorra dilatação e contração do material, perante tal situação é habitual ter em conta o coeficiente de expansão e selecionar rolamentos com alguma folga. Por vezes há necessidade de usar um rolamento que suporte movimentos axiais apenas devido ao comportamento termodinâmico descrito anteriormente, (v) montagem vertical: máquinas montadas verticalmente necessitam de considerações especiais, quer seja pelo fato

dos rolamentos necessitem de suportar forças axiais superiores assim como pelo fato de ser mais difícil de estabilizar a lubrificação, quando houver, (vi) ambiente: em locais sujos e com poeiras é habitual usar blindagens específicas para proteção dos rolamentos, (vii) temperatura: para dimensionar ou projetar uma máquina é importante saber previamente a temperatura ambiente a que vai estar sujeita e a temperatura a que vai operar. Sabendo estes valores de temperatura torna-se mais assertiva a escolha do método de arrefecimento. A temperatura normal de operação de um motor elétrico se situa entre valores de 70 a 110 °C, caso a temperatura ambiente seja muito elevada é importante ter em conta a dilatação e a contração dos materiais e compensá-las escolhendo rolamentos com uma determinada folga e tolerância a movimentos axiais, (viii) vibrações: em ambientes onde o motor fique sujeito a vibrações externas é recomendado usar rolamentos de esferas, de preferência pré-carregados para reduzir a sensibilidade às vibrações. Tendo em conta todas as considerações feitas até agora, é importante ter consciência do tipo de motor mais adequado a uma determinada aplicação, das condições a que será sujeito ao longo do seu funcionamento e da manutenção que irá requerer (ZHOU, 2017).

2.5. AVARIAS EM ROLAMENTOS

Com o passar dos anos os rolamentos tornaram-se o elo mais fraco dos componentes constituintes do MIT, em parte devido à melhoria na construção do rotor e do estator que passaram a ser mais robustos e por outro lado porque os rolamentos são sujeitos a condições extremas de operação. Por vezes funcionam indefinidamente em condições impróprias, ao ponto de serem substituídos sem que tenham atingido metade do seu tempo de vida útil e sem que se analisem as causas da falha, persistindo a real causa do problema. Em razão disso, é importante estar consciente do tempo de vida do rolamento nas condições estabelecidas pelo fabricante para que se possa constatar se o comportamento do rolamento está de acordo com o pressuposto. A vida de um rolamento é definida como o número de revoluções completas que o próprio pode realizar, ou como o número de horas em operação que o rolamento realiza a uma velocidade constante, antes de aparecer o primeiro sinal de fadiga. Contudo, testes

laboratoriais provam que mesmo em condições idênticas de operação, rolamentos iguais têm diferentes tempos de vida (WEI, 2015).

Nos motores elétricos os rolamentos podem falhar precocemente devido a diferentes razões. Dentre elas destacam-se: (i) cargas superiores às suportáveis, (ii) lubrificação inadequada, (iii) cargas demasiado leves, (iv) estragos durante o transporte, (v) manuseamento impróprio, (vi) problemas de montagem, (vii) erosão elétrica, (viii) contaminação interna do rolamento, (ix) vedantes inadequados, ou folgas, quer seja do lado da chumaceira ou do lado do eixo (WEI, 2015). Para que se possa prolongar a durabilidade de um rolamento é essencial identificar e eliminar o maior número de situações causadoras de avaria. A questão que se coloca é: como chegar à conclusão sobre uma determinada causa. Sob condições normais de operação, com cargas equilibradas e um bom alinhamento, a falha começa com a forma de pequenas fissuras localizadas abaixo da superfície da pista e dos elementos rolantes. Estas fissuras vão-se propagando gradualmente ao longo da superfície gerando vibrações perceptíveis e aumentando os níveis de pressão sonora. Continuando nas mesmas condições de operação surge a fragmentação do material levando à ocorrência do fenómeno conhecido como *spalling* ou *flaking* (Fig. 2.5.1).

Figura 2.5.1. Fenômeno de *Spalling* ou *Flaking*



Fonte: (Wei, 2015)

Por vezes, a causa da falha do rolamento surge imediatamente quando do seu transporte ou da sua instalação no eixo do motor, dado que o submetem

a esforços e pressões inadequadas. Outras vezes, a aplicação de esforços excessivos numa zona do rolamento, que origina esforços dinâmicos entre os seus elementos constituintes, é suficiente para causar danos ao longo das pistas sob a forma de *brinelling* e *false-brinelling*, o que leva à falha prematura do rolamento.

Segundo BONNET (2015), o fenómeno de *brinelling* é caracterizado pela formação de endentações localizadas nas pistas dos rolamentos, exatamente onde o corpo rolante é pressionado entre as duas pistas. Na maioria das situações, a sua ocorrência é consequência da força aplicada quando da montagem do rolamento. Esta força é aplicada no anel errado e é transmitida através dos elementos rolantes provocando uma deformação de origem estática. Enquanto este tipo de deformação raramente ocorre, o fenómeno de *false-brinelling* ocorre com maior frequência. Neste último, o rolamento é exposto a vibrações estáticas que podem surgir durante o transporte do motor ou do próprio rolamento originando endentações semelhantes às anteriores e com o aspecto que pode ser observado na Fig. 2.5.2.

Figura 2.5.2 Fenômeno de *false-brinelling*



Fonte: (Wei, 2015)

Problemas podem ocorrer quando o eixo é acoplado à carga, visto que se o alinhamento não for perfeito e a carga equilibrada sujeita-se novamente os rolamentos a tensões e vibrações elevadas que conduzem a uma redução do seu tempo de vida. Outro aspecto a ser observado no caso do eixo do motor estar acoplado a uma correia, é que não deve ser usada uma tensão excessiva na correia, porque causa esforços nos rolamentos e consequentes danos. Contrariamente a esta situação, existe o caso em que o motor roda sem qualquer

tipo de carga e há elevada probabilidade dos rolamentos se danificarem devido ao possível aparecimento de uma vibração excessiva.

Outra causa importante de analisar é o tipo de lubrificação a que o rolamento é submetido ao longo do seu funcionamento, dado que este é um fator preponderante e com influência direta na durabilidade do mesmo. A lubrificação imprópria engloba o excesso e a falta de lubrificação, pois em ambas as situações não estão reunidas as condições ideais de funcionamento, e o sobreaquecimento do rolamento é uma consequência. Idealmente é suposto que todos os elementos rolantes estejam envolvidos numa fina película de óleo/massa, permitindo que não haja contato direto entre as superfícies de metal. As avarias devidas à contaminação são comuns em ambientes industriais e manifestam-se sob a forma de endentações (GONGORA, 2013). Os agentes contaminadores são essencialmente provenientes do meio em que o motor se encontra e penetram nas pistas do rolamento devido a defeitos que possam surgir nos retentores, a partículas contidas no lubrificante que contaminem o meio quando da relubrificação, a ligeiros defeitos na superfície do eixo que possam soltar pequenos fragmentos de aço e, ainda, devido a tarefas de manutenção levadas a cabo em condições não isentas de partículas contaminantes. Estas situações descritas anteriormente são suficientes para que o rolamento atinja níveis de fadiga elevados e eventualmente *spalling* (BONNET, 2015). O rolamento utilizado nesta tese apresenta como característica lubrificante uma fina película de óleo para que não ocorra contato direto entre as superfícies de metal. Sendo que os rolamentos usados estavam sujeitos a contaminações em função do ambiente industrial onde os motores estiveram instalados.

2.6 AÇÕES CORRETIVAS

No que diz respeito à fadiga normal do rolamento, não há grandes ações corretivas ou técnicas que possam ser aplicadas de forma a que se possa prolongar a vida do rolamento. Obviamente que uma manutenção feita de acordo com as indicações do fabricante, com intervalos de relubrificação adequados e respeitando as compatibilidades que as massas apresentam pode atrasar o processo de fadiga do rolamento. Já no caso das avarias causadas pela instalação imprópria ou por vibrações estáticas decorrentes do processo de transporte, é

possível evita-las mantendo o rotor fixo em situações de transporte, evitando oscilações bruscas e, no caso de existirem vibrações decorrentes do tipo de carga a que o motor está acoplado, a solução passa por verificar o alinhamento da carga e se estiver tudo correto podem ser utilizados rolamentos pré-carregados que anulam as vibrações consequentes de uma carga demasiado leve. No caso da substituição de rolamentos é imperativo que quando da montagem do novo rolamento se faça pressão no anel interno do rolamento (DÓRIA, 2015).

CAPÍTULO III - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 INTRODUÇÃO

O processo de monitoramento do estado dos rolamentos de máquinas rotativas deve receber uma atenção especial no plano de manutenção de qualquer empresa, visto que são peças fundamentais para o funcionamento correto das máquinas de produção, e máquinas paradas causam prejuízos (XU; CHEN, 2013). Com isso, torna-se necessário o desenvolvimento de métodos que auxiliem na construção de modelos robustos de controle do comportamento dos rolamentos, através dos quais pode-se estabelecer um diagnóstico do estado do rolamento e detectar a presença de inconformidades e falhas. Desta forma, este capítulo apresenta, inicialmente, a caracterização desse estudo, em seguida descreve os materiais e instrumentos utilizados, assim como os ensaios realizados e, por fim, detalha as análises executadas para a predição do estado dos rolamentos.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Nesta tese, utilizou-se a pesquisa experimental, que é aquela que ocorre quando se utilizam ensaios para investigar diretamente as variáveis relacionadas com o objeto de estudo (GIL, 1989). A manipulação de variáveis proporciona o estudo da relação entre as causas e os efeitos de determinado fenômeno (CERVO; BERVIAN; DA SILVA, 2007, p.61). Para GIL (1989, p.73) “de modo geral, o experimento representa o melhor exemplo de pesquisa científica”.

3.3 ROLAMENTOS UTILIZADOS

Para a realização dos ensaios, foram utilizados 25 rolamentos. Desses, cinco eram rolamentos novos comprados em lojas locais e 20 eram rolamentos usados, já descartados por manutenções preventivas em indústrias da Grande Vitória, como CST, Vale do Rio Doce, Fibria e Chocolates Garoto, gentilmente

cedidos. Os rolamentos descartados pelas empresas foram substituídos em atividades de manutenção preventiva e não em função de terem apresentado comprometimento em seu funcionamento. Por isso, os 20 rolamentos coletados das empresas apresentavam estados diferentes, de forma que cinco foram considerados em ótimo estado, cinco em bom estado, cinco estavam visivelmente desgastados e seis estavam muito desgastados. O estado das amostras obtidas foi classificado visualmente, mas também apoiou-se em um ensaio preliminar na bancada, tal que os resultados obtidos foram preliminarmente estabelecidos conforme quadro 3.3.1.

Quadro 3.3.1. Quantidade de amostras de rolamento em cada estado de desgaste.

Estado do rolamento	Número de amostras
Novo	5
Ótimo	5
Bom	5
Desgastado	4
Muito desgastado	6

Os rolamentos utilizados nos ensaios foram o 6201ZZ fabricado pela NSK. Uma amostra dos rolamentos utilizados pode ser vista na Figura 3.3.1. São rolamentos de esferas, indicados para uso onde o toque de atrito é pequeno, sendo o mais adequado para aplicações que requerem baixo nível de ruído e vibração, e em locais de alta velocidade de rotação (NSK, 2016).

Figura 3.3.1 Amostra dos rolamentos utilizados



{Fonte; o autor}

3.4 BANCADA DE ENSAIO

Para coleta e análise dos dados de nível de pressão sonora, temperatura, velocidade, amplitude e energia de vibração de cada rolamento foi montada uma bancada de ensaio, apresentada no esquema da Figura 3.4.1 composta por:

- Placa de aquisição de dados Arduino Uno;
- Motor trifásico, 6 terminais, 1800rpm (30 rps), 2CV, 220/380V, ligação em estrela, fabricado pela WEG;
- Motor secundário, idêntico ao motor principal, funcionando como carga; fabricado pela WEG;
- Sensor de velocidade: encoder, específico para Arduino. Instalado no eixo de acoplamento entre os motores. Especificações: (i) tensão de operação: 3,3-5V; (ii) saída digital e analógica; (iii) comparador LM393; (iv) abertura disco encoder: 5mm.
- Sensor de vibração: Acelerômetro MPU6050, instalado próximo ao rolamento. Específico para Arduino. Características: (i) Modelo GY-521;(ii) Chip: MPU-6050; (iii) Tensão de Operação: 3 - 5V;(iv) conversor AD: 16 bits (v) Comunicação: I2C; (vi) Faixa do Giroscópio: ± 250 , 500, 1000, 2000°/s; (vii) faixa do Acelerômetro: ± 2 , ± 4 , ± 8 , $\pm 16g$; (viii) Faixa do Sensor de Temperatura: -40 a 85°C;

- Sensor de temperatura, DS18B2, específico para Arduino. Instalado na parte superior da carcaça do motor, próximo à placa de identificação do motor. Especificações: (i) Tensão de alimentação: 3.0 VDC a 5.5 VDC; (ii) Lê temperaturas de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$; (iii) Resolução de 9 ou 12 bit; (iv) Alarme de limite de temperatura; (v) Comprimento do cabo: 95cm
- Sensor de nível de pressão sonora: decibelímetro, marca AKRON. microfone captador de nível de pressão sonora instalado próximo ao rolamento, em uma base especialmente adaptada para ele. Especificações: (i) Faixa de medição: 30 a 130 dBA / Dbc; (ii) Faixa de frequência: 31.5 Hz a 8.5 kHz; (iii) Microfone: Capacitivo de eletreto de $\frac{1}{2}$;
- Memória interna (datalogger): 32000 registros; (v) Temperatura de operação: 0 a 50°C ; (vi) Alimentação: 6V (4 pilhas AA);
- Inversor de frequência tipo CFW08, trifásico, 220V, 5CV, marca WEG;
- Notebook DELL VOSTRO 5480;
- Matlab/Simulink 2014b.
-

Figura 3.4.1 Bancada de Ensaio



Fonte: [o autor]

Apresenta-se também as características do laboratório e da bancada de testes que serviu de base para a realização dos experimentos realizados, bem como a localização dos sensores instalados no motor, além da localização do sensor de vibração no motor e na bancada. Deve-se salientar que existem duas bancadas envolvidas no experimento; a primeira, constituída por uma base de

madeira com pés amortecedores de borracha onde os motores e sensores foram fixados e a segunda, a bancada que suporta esta primeira, constituída por uma base de granito fixada ao longo de toda a parede do laboratório.

3.4.1 Dados das bancadas do laboratório

3.4.1.1. Bancada de granito

Largura = 62 cm

Altura = 4,5 cm

Comprimento = 500 cm

3.4.1.2. Bancada de madeira que fixa os motores:

Largura = 43 cm

Altura = 2,5 cm

Comprimento = 76 cm

3.4.1.3. Espessura borracha que cobre ambas as bancadas:

Espessura: 2,5 cm

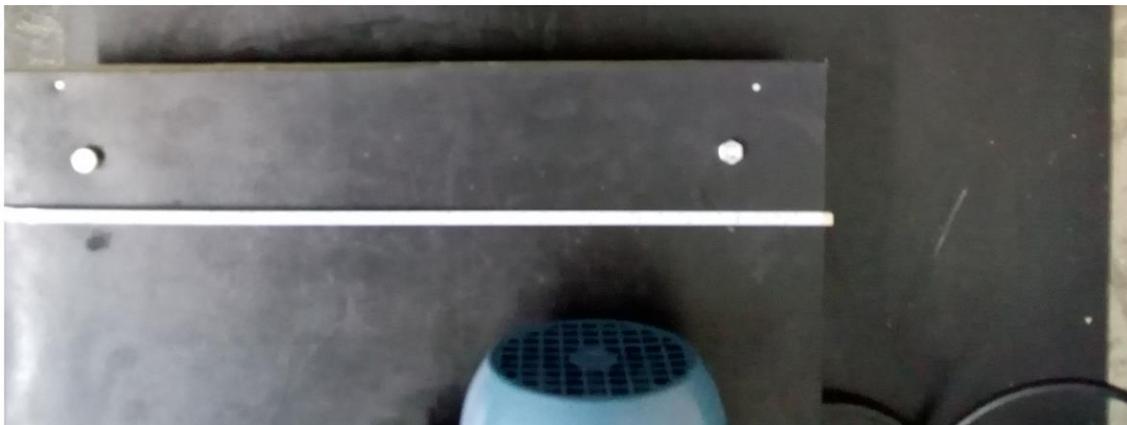
A bancada de madeira está fixada na bancada de granito. Ambas possuem uma borracha como cobertura. A bancada de madeira possui ainda amortecedores de borracha com altura de 4,0 cm nos quatro cantos da mesma, para atenuar possíveis vibrações. Esses amortecedores estão fixados na bancada de madeira por parafusos com porca e contra porca.

As figuras 3.4.2 a 3.4.13 mostram os detalhes descritos acima. Todas as figuras foram fotografadas pelo autor.

Figura 3.4.2. Bancada de granito engastada na parede do laboratório + armários + base de madeira com motores acoplados + alimentação rede trifásica



Figura 3.4.3. Largura da base de madeira (43cm) que apoia os motores + parafusos que fixam a base de madeira nos amortecedores.



Observa-se que entre os motores e a base de madeira existe uma borracha isolante. Esta borracha também cobre a bancada de granito que apoia a base de madeira.

Figura 3.4.4 Amortecedor usado nos quatro cantos na bancada de madeira ($H_{total} = 70$ mm)



Figura 3.4.5. Espessura da base de madeira que fixa os motores (2,5 cm)



Figura 3.4.6. Localização do decibelímetro



Figura 3.4.7. Localização do sensor de vibração na base de madeira que fixa os motores + cabo do sensor de temperatura localizado na tampa do motor próximo ao rolamento

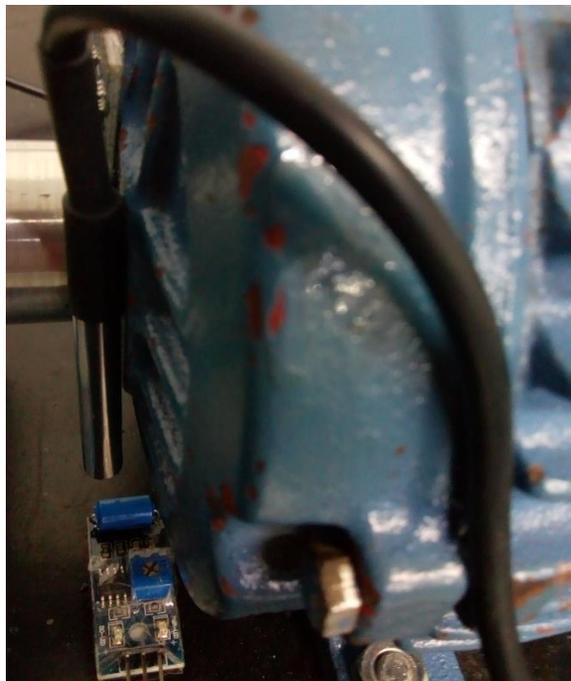


Figura 3.4.8. Motor + sensor óptico + disco encoder + sensor de vibração

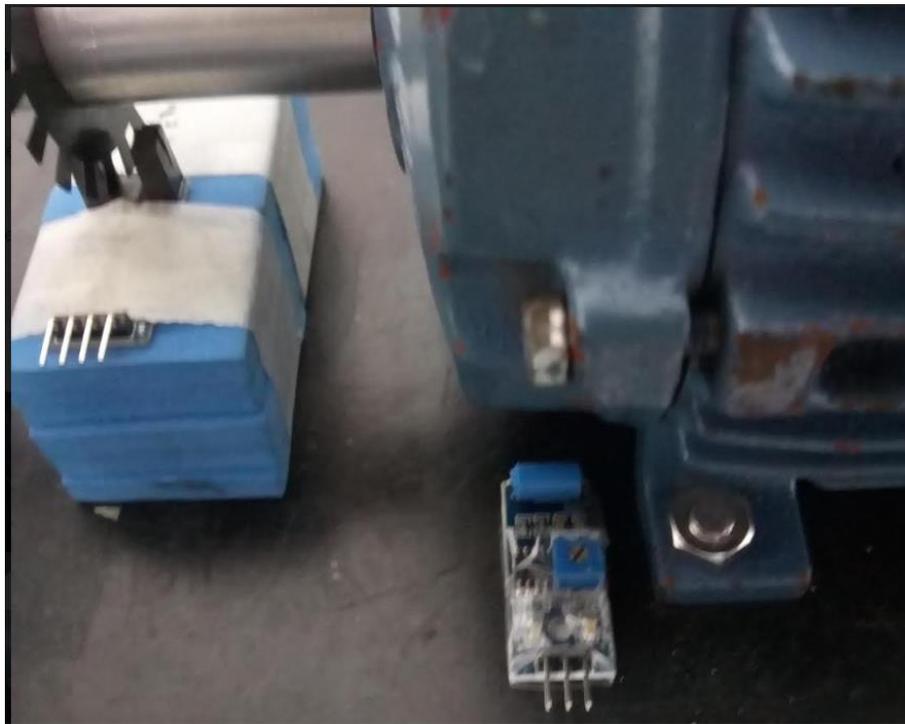
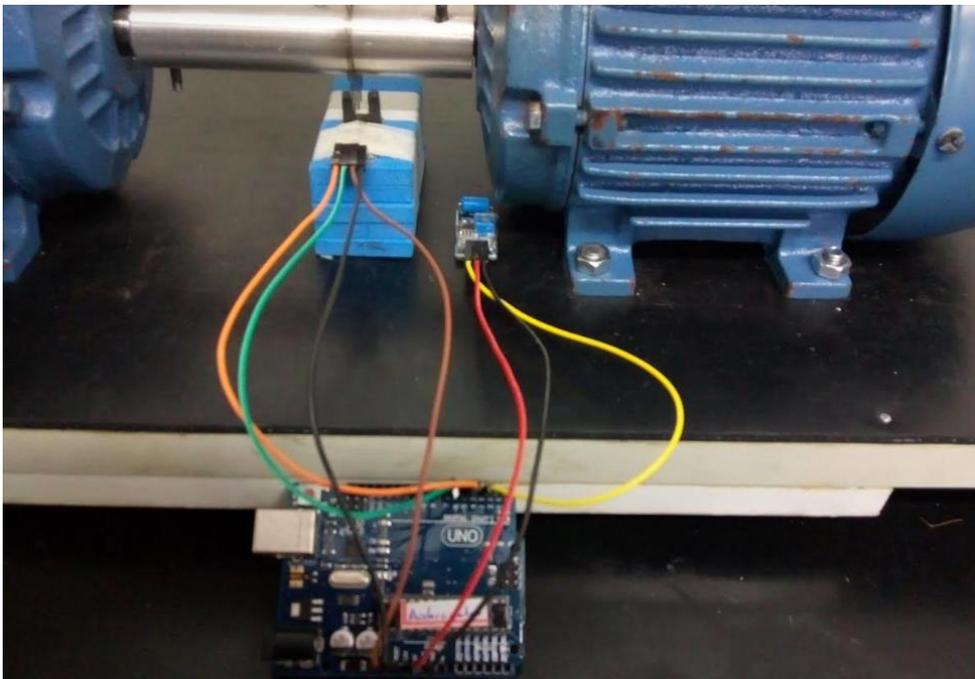


Figura 3.4.9. Motores acoplados + *disco encoder* + leitor óptico + sensor de vibração na bancada + arduino



Pode-se observar nas Figuras 3.4.7, 3.4.8 e 3.4.9 a posição do sensor de vibração fixado à base de madeira onde os motores estão fixados, que foi utilizado para verificar o nível de vibração na bancada produzido pelo funcionamento dos motores.

Figura 3.4.10 Sensor de vibração instalado no motor próximo ao rolamento + sensor de temperatura

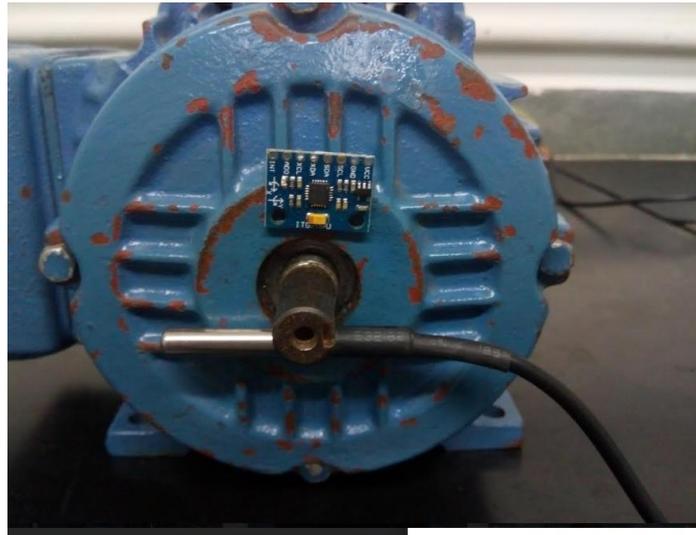


Figura 3.4.11. Sensor de vibração instalado no motor próximo ao rolamento + sensor de temperatura + sensor de vibração instalado na bancada de madeira + disco encoder instalado no acoplamento + disco óptico do encoder

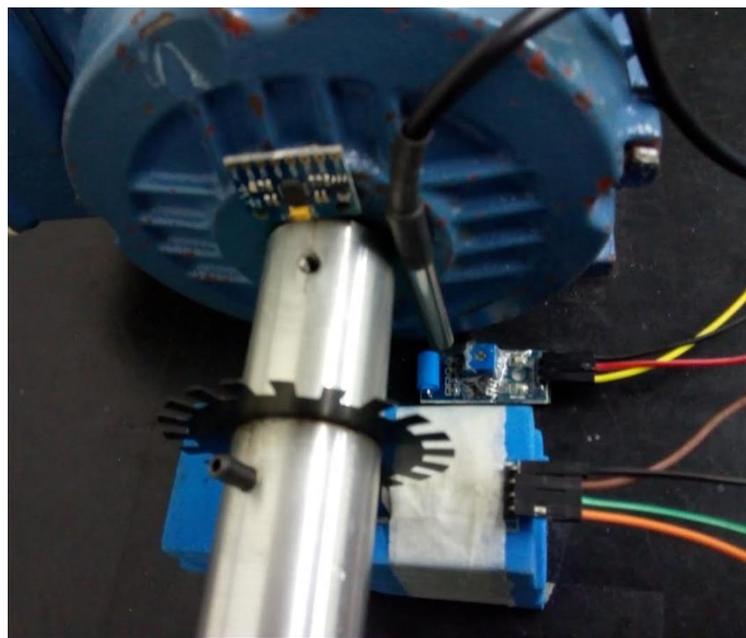
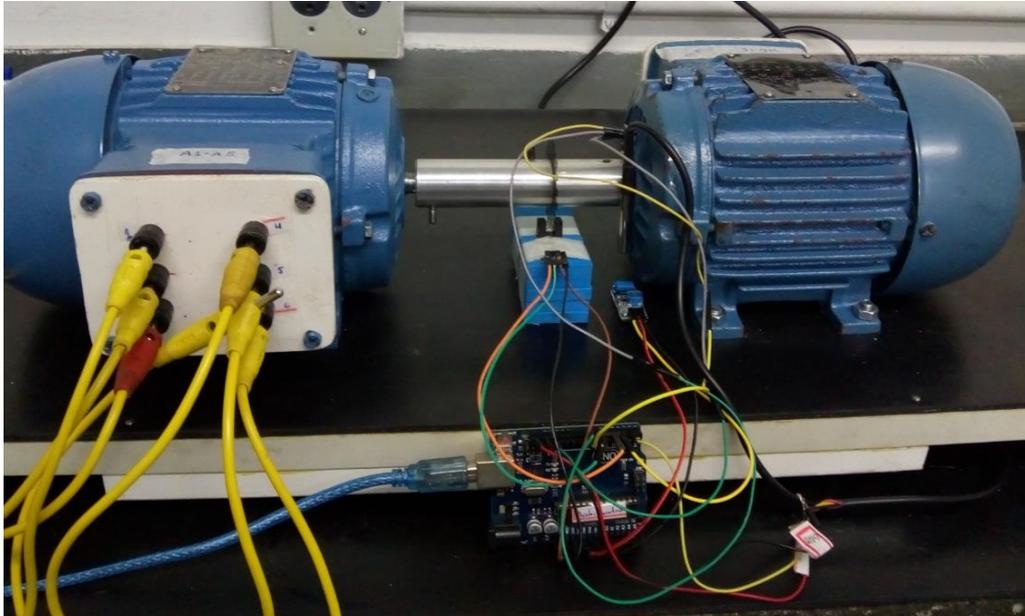


Figura 3.4.12. Sistema de medição completo - motores acoplados + disco encoder no eixo de acoplamento + sensor óptico + encoder + sensor vibração instalado no motor + sensor de vibração na base de madeira + sensor de temperatura



Para comprovar a estabilidade do sistema observando os dados captados pelo sensor de vibração instalado na bancada, foram realizados ensaios para verificar se o funcionamento dos motores não transmitiria vibrações à bancada na faixa de frequência de interesse. Estes ensaios são apresentados a seguir.

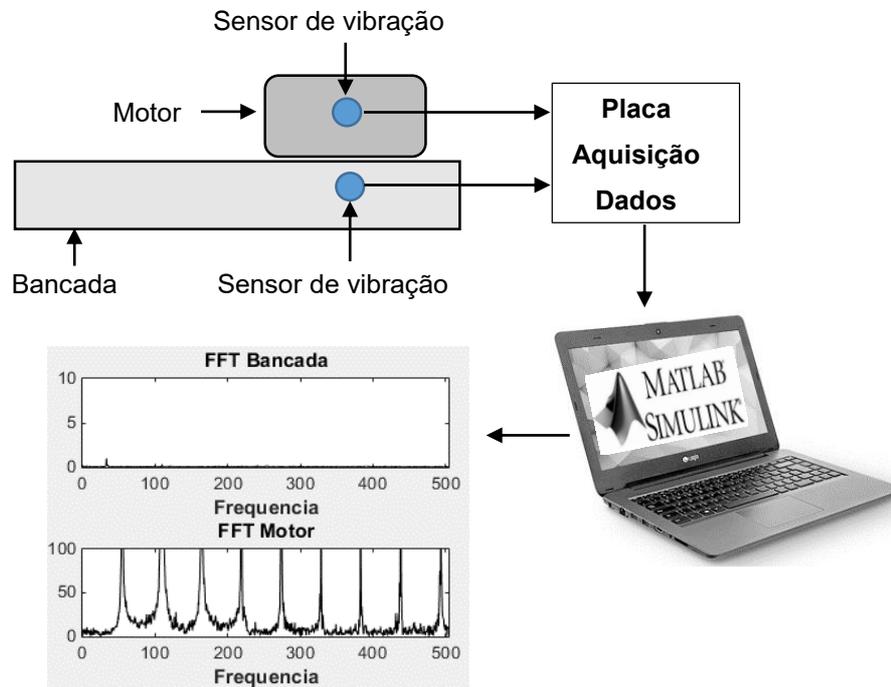
3.5. TESTE DE ESTABILIDADE DA BANCADA

Para verificar a interação do motor com a bancada de apoio, foi realizado o seguinte teste:

- 1) Apoiou-se um motor sobre a bancada a ser analisada.
- 2) Foram colocados sensores de vibração no motor e na bancada.
- 3) Excitou-se o motor, que apresentava alto grau de vibração.
- 4) Os sinais dos sensores foram captados por uma placa de aquisição de dados e entregues a um computador para posterior análise.

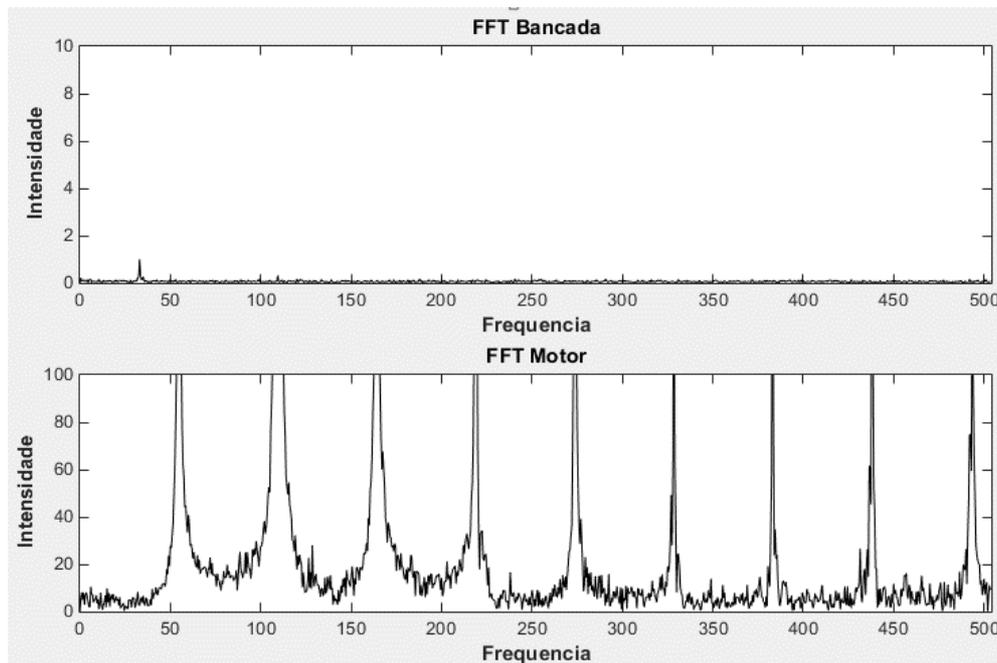
A Figura 3.5.1 ilustra o esquema utilizado.

Figura 3.5.1 Esquemático do ensaio de interação entre o motor e a bancada



Na figura 3.5.1 observa-se que, sobre a bancada de madeira, foi instalado o motor com um sensor de vibração e outro sensor de vibração colocado sobre a bancada. Excitado o motor, foram capturados, pela placa de aquisição de dados, os sinais de vibração do motor e da bancada a uma taxa de 10.000 amostras por segundo durante dois segundos. Os sinais capturados deram origem a dois arquivos. Estes arquivos foram submetidos a análises que mostram as componentes de frequência presentes nas vibrações do motor e da bancada. A comparação destes espectros tem por objetivo revelar a influência entre os dois componentes analisados. A Figura 3.5.2 apresenta os gráficos obtidos da análise em frequência dos sinais de vibração do motor e da bancada.

Figura 3.5.2 Análise de frequência do motor e da bancada



Os gráficos da Figura 3.5.2 apresentam as análises de frequência das vibrações da bancada e do motor. Deve-se ressaltar que as graduações de intensidade (eixo das ordenadas) são diferentes: bancada (0 a 10) e motor (0 a 100). Isto foi feito para que se pudesse observar alguma atividade na bancada.

Os gráficos mostram que não existem componentes de frequências presentes na vibração do motor que apareçam no espectro da vibração da bancada. Portanto, conclui-se que a bancada está desacoplada, sob o ponto de vista de vibração do motor. Isto significa que vibrações presentes no motor não sofrem influência da bancada.

3.6. PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

O sistema desenvolvido para a detecção de desgaste em motores trifásicos pode ser dividido em quatro principais etapas: (a) captação dos sinais de interesse; (b) aquisição dos dados; (c) processamento dos dados colhidos; e (d) diagnóstico. Cada uma das etapas desse sistema está intrinsecamente ligada com a outra, pois a qualidade e o tipo de informação que deve ser repassado

depende diretamente da manipulação que será feita na etapa seguinte. A transdução dos sinais é feita por um dispositivo que é sensibilizado por uma grandeza de entrada que se deseja monitorar e o disponibiliza em forma de um sinal condicionado de saída que representa a entrada. Este sinal é então enviado ao sistema de aquisição de dados. No sistema desenvolvido, utilizou-se os transdutores de vibração, temperatura, velocidade e nível de pressão sonora.

A aquisição de dados é uma etapa de fundamental importância, pois cabe a ela garantir a integridade e precisão dos dados coletados. A coleta e a transmissão dos dados devem ser feitas de modo a minimizar ao máximo o efeito de interferências externas, com o objetivo de tornar os dados consistentes e confiáveis. A tarefa do processamento dos dados colhidos tem como objetivo obter a representação dos dados coletados em forma de vetores de pontos (sinais amostrados) e manipulá-los e/ou transformá-los visando a disponibilização desses dados para o sistema de diagnóstico de forma mais rápida e de fácil análise. Finalmente, pode-se dizer que o diagnóstico é a parte que agrega maior valor ao sistema, pois envolve tomada de decisão. O tratamento dos dados obtidos permitiu a avaliação do estado dos rolamentos para a elaboração de um diagnóstico precoce de desgaste nesses elementos.

Em se tratando de rolamentos, o desgaste irá promover folgas e maior vibração no motor, objeto principal de análise nesta tese. Paralelamente, a literatura mostra que as vibrações geradas por um rolamento novo são de níveis de pequena dimensão e se apresentam como um nível de pressão sonora aleatório. Porém com o surgimento e desenvolvimento de uma falha, as vibrações começam a se modificar e apresentar frequências características, correlacionadas com o defeito (BRAUN & DATNER, 1979).

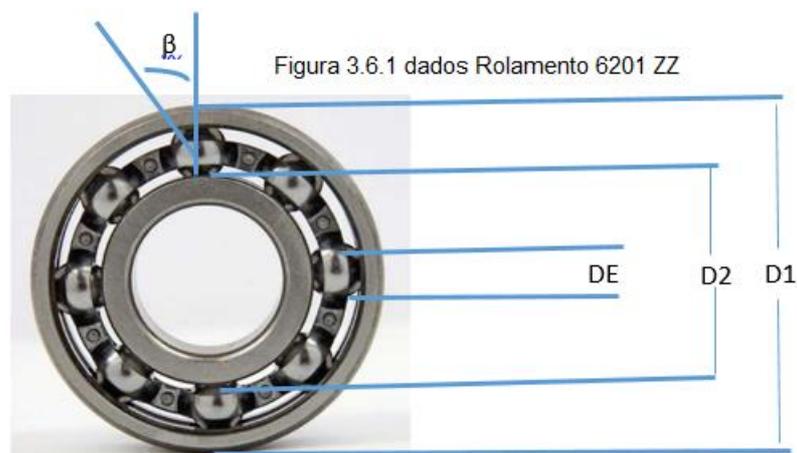
Cálculo das frequências naturais do rolamento

Teoricamente, usando a técnica convencional de Análise Espectral via Transformada Rápida de *Fourier* (FFT), o espectro de frequências do sinal de vibrações, medido no mancal do rolamento, além de indicar as frequências do motor, também pode revelar as frequências características de componentes do rolamento que estão defeituosos (SANTOS, 2017). As falhas nos rolamentos

tipicamente ocorrem devido a defeitos localizados na pista externa, pista interna, nos elementos rolantes ou na gaiola que direciona os elementos rolantes.

Estes defeitos geram uma série de impactos de vibração devido ao choque dos elementos rolantes com a superfície do defeito. Estas vibrações ocorrem em frequências características, que são estimadas em função da velocidade da rotação do eixo e da geometria dos componentes do rolamento. Estas frequências são denominadas de frequências características dos defeitos (FCDs) (MESQUITA et al., 2016). Diferentemente dos demais tipos de defeito, os mancais de rolamento não possuem uma frequência característica de defeito única que possa ser calculada através de múltiplos de rotação de eixo. Dado que o mancal de rolamento é composto de vários componentes: pistas, esferas e gaiola e existe movimento relativo entre eles, as frequências de defeito são calculadas em função da geometria de cada mancal de rolamento.

A Figura 3.6.1 apresenta os dados geométricos da esfera, gaiola, pista interna e pista externa do rolamento 6201ZZ.



Fonte: [NSK, 2016]

Onde:

$$D1 = 27,6 \text{ mm}$$

$$D2 = 17,0 \text{ mm}$$

$$DE = 7,2 \text{ mm}$$

$$\beta = 0$$

Número de rolamentos = 8

$$F = 30\text{Hz (rps)}$$

$$DP = \frac{D1+D2}{2} = 22,3 \text{ mm}$$

Observa-se que o ângulo de deslizamento β é zero, definido pelo fabricante para toda a linha de rolamentos da família 6000 (www.NSK.com.br). Para a obtenção dos valores de frequência de defeitos em rolamentos são usadas as seguintes fórmulas:

Defeito na pista externa - BPF1

$$BPF1 (Hz) = \frac{n}{2} \cdot f \cdot (1 - \frac{DE}{DP} \cdot \cos \beta) \dots \dots \dots (\text{eq. 1})$$

Defeito na pista interna - BPF0

$$BPF0 (Hz) = \frac{n}{2} \cdot f \cdot (1 + \frac{DE}{DP} \cdot \cos \beta) \dots \dots \dots (\text{eq. 2})$$

Defeito no elemento rolante (Hz) – BSF

$$BSF (Hz) = \frac{1}{2} \cdot f \cdot \frac{DP}{DE} \cdot [1 - (\frac{DP}{DE})^2 \cos^2 \beta] \dots \dots \dots (\text{eq. 3})$$

Defeito na gaiola – FTF

$$FTF (Hz) = \frac{1}{2} \cdot f \cdot (1 - \frac{DE}{DP} \cdot \cos \beta) \dots \dots \dots (\text{eq. 4})$$

O cálculo dessas frequências, que aparece na Tabela 3.6.1, pode ajudar na interpretação dos espectros de frequência, permitindo identificar se os picos estão associados à vibração do motor ou aos defeitos mencionados acima.

Tabela 3.6.1. Frequências naturais do rolamento ensaiado

Elemento	Frequência
BPF1 (pista externa)	81,3 Hz
BPF0 (pista interna)	158,7 Hz
BSF (elemento rolante)	41,6 Hz
FTF (gaiola)	10,2 Hz

Fonte: {o autor}

Procedimentos de ensaio do motor

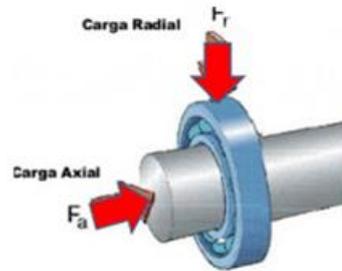
Fontes de vibração incluem movimento imperfeito dos rolamentos

durante a rotação, emissão acústica e vibração externa transmitidos por meio dos rolamentos. Os ensaios dos rolamentos usados no motor em teste seguiram os seguintes procedimentos:

1. Utilizou-se para ensaio um motor trifásico, 1800rpm (30 rps), novo, 2CV, 220V, ligação em estrela, acoplado a outro motor de características semelhantes
2. Um motor secundário, que funcionava como gerador, foi instrumentalizado com sensores de velocidade, vibração, nível de pressão sonora e temperatura;
3. Os motores foram fixados a uma base especialmente construída para estes ensaios;
4. Todos os ensaios foram realizados nesta bancada;
5. Os dados dos sensores foram coletados com uma placa de aquisição de sinais independentes, denominada Arduino Uno;
6. O Arduino também alimentava um cartão de memória para registro dos dados obtidos;
7. O Arduino estava conectado diretamente a um microcomputador portátil e enviava valores numéricos de cada sensor para registro e tratamento dos dados em arquivo texto que depois foram tratados em planilha eletrônica;
8. Este arduino possuía uma comunicação com o *MatLab/Simulink*. Usando a transformada FFT estes dados foram tratados no domínio do tempo e no domínio da frequência;
9. Terminado cada ensaio, o rolamento do motor que funcionava como carga era trocado, e novo ensaio era realizado;
10. Todos os ensaios foram realizados com os sensores instalados sempre no mesmo ponto, a saber: Sensor de velocidade: encoder, instalado no eixo de acoplamento entre os motores; Sensor de vibração: instalado na carcaça do motor, na parte superior da tampa anterior do motor, por onde sai o eixo do motor;

Importante destacar que em rolamentos de esferas, os principais esforços a serem considerados são radiais, como mostra a Figura 3.6.1.

Figura 3.6.2 Esforços aplicados ao rolamento



[Fonte: www.skf.com.br]

11. Sensor de temperatura: instalado na parte superior da carcaça do motor, próximo à placa de identificação do motor;
12. Sensor de nível de pressão sonora: decibelímetro, microfone captador de nível de pressão sonora instalado próximo ao rolamento, em uma base especialmente adaptada para ele.
13. Os ensaios foram realizados em ambiente de laboratório, fechado, com ausência de nível de pressão sonoras externos, e temperatura controlada em 25°C.
14. Os motores estavam fixados à base da bancada, alinhados e nivelados horizontalmente através de parafusos de fixação localizados na base do motor.
15. O nivelamento paralelo foi verificado sempre que ocorreu uma intervenção no motor para troca de rolamento, através da utilização de um relógio comparador (CST/Senai, 2007).
16. Nos ensaios foi usado um inversor de frequência tipo CFW08, trifásico, 220V, 2cv, para evitar o pico de corrente na partida do motor, que descaracterizaria o ensaio, cujo objetivo é a avaliação do estado de deterioração do rolamento em motores trabalhando em regime permanente.

3.7. MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO

O nível de pressão sonoras e as vibrações geradas por rolamentos têm relação direta com a frequência de rotação do motor, com o número de esferas do rolamento e com o tipo de defeito apresentado. Defeitos nas pistas interna, externa e nos elementos rolantes geram sinais com frequências diferentes,

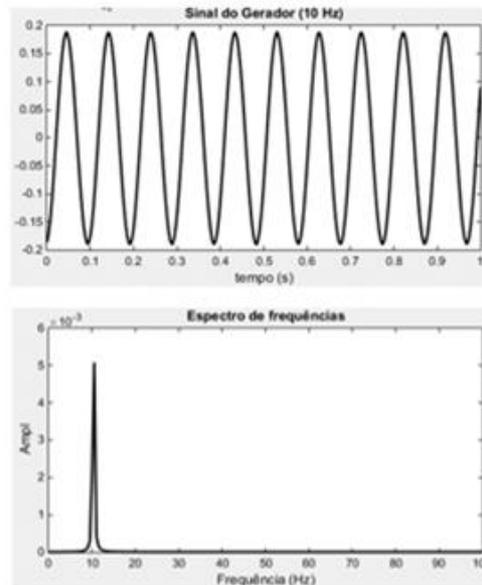
conforme ilustrado na Tabela 3.6.1. Deve-se ressaltar que os elementos rolantes além de se deslocarem sobre pistas, giram sobre seu próprio eixo e que uma das pistas de rolamento permanece fixa enquanto a outra gira. De forma geral as vibrações características geradas pelos rolamentos se encontram em frequências abaixo de 500 Hz, embora possam apresentar harmônicas de maior ordem (SKEIRIK, 2016).

Os problemas nos rolamentos aparecem como picos no espectro de frequências dos seus sinais de vibração. Para analisar a composição da frequência dos sinais de vibração é necessário capturar tais sinais a uma taxa pelo menos duas vezes maior que a maior frequência máxima de interesse, de acordo com o Teorema de *Nyquist*. No caso em estudo, deve-se escolher uma frequência de amostragem maior do que 1000 Hz. A frequência de amostragem define a máxima frequência que pode ser detectada em um sinal, enquanto o tempo de coleta de dados define a menor frequência.

Usou-se 4000 Hz como frequência de amostragem para obter-se uma resolução de frequência de 0,5 Hz. Foram coletados dados durante 2 segundos, o que permitiu, com boa resolução, a análise de sinais na faixa de interesse, de 5 Hz até 400 Hz. Antes da captura dos sinais de vibração o conjunto de aquisição sensor/placa foi submetido a testes com sinais conhecidos. Os sinais produzidos por um gerador de funções foram amplificados e usados para excitar um alto-falante. Foi variada a frequência e mantida a amplitude dos sinais. Foram produzidos sinais senoidais nas seguintes frequências: 10 Hz, 40 Hz, 500 Hz e 3 kHz. O resultado das coletas e seus respectivos espectros de frequências são apresentados na Figura 3.7.1 e 3.7.2.

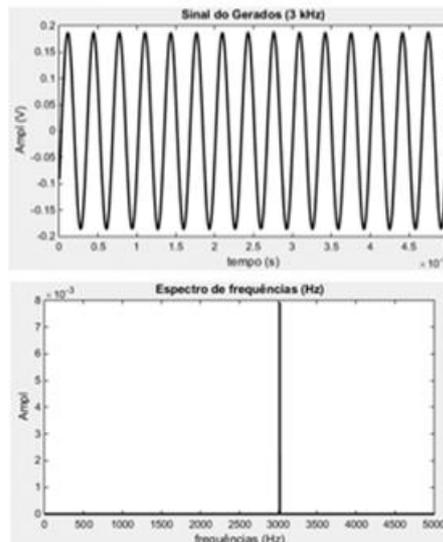
Pode-se observar que a análise do sinal de 10 Hz até 3 KHz revelou corretamente a sua composição espectral.

Figura 3.7.1 : Análise espectral de um sinal de 10 Hz obtido por sensor/placa de aquisição



Fonte: [o autor]

Figura 3.7.2 Análise espectral de um sinal de 3 kHz obtido por sensor/placa de aquisição.



Fonte: [o autor]

Os resultados mostraram que o conjunto sensor/placa de aquisição de dados é capaz de capturar sinais em frequências consideravelmente mais altas do que aquelas definidas na faixa de interesse (5 a 400 Hz).

3.8. TRANSFORMADA RÁPIDA DE *FOURIER* -FFT

Esta tese utilizou a Transformada Rápida de *Fourier* (*Fast Fourier Transformer* - FFT) para obter os espectros de frequência usados na detecção

de desgaste em motores elétricos. A FFT é muito utilizada em todos os analisadores de vibrações. A Transformada de *Fourier* tem uma importante aplicação prática, pois permite que se decomponha o sinal do tempo em espectro de frequências, possibilitando a identificação das frequências e suas amplitudes, sendo possível, então, o estudo das causas geradoras destas frequências identificadas, e posterior ação para corrigi-las se houver necessidade. A transformada de *Fourier* fornece a resposta em frequência e revela as frequências em que a energia vibratória se concentra.

3.9. A FFT NO SISTEMA DE DETECÇÃO DE DEFEITOS

A FFT constitui uma ferramenta importante para um sistema de detecção de defeitos em máquinas elétricas girantes. A análise da condição da máquina é feita em função do aspecto do espectro de frequências. Assim, a avaliação do estado da máquina é feita com base no estudo de determinadas frequências que têm sua amplitude modificada quando da presença de mecanismos de falha.

3.9.1. Densidade espectral de potência – PDS

Na análise de vibração, é importante conhecer previamente como é esperado que as forças se comportem ao longo do tempo. Um equipamento rotativo com rotação constante gera forças conhecidas ao longo do tempo. Isto permite avaliar se os resultados da coleta de dados estão coerentes com o funcionamento da máquina, como também auxiliar no tipo de processamento de sinal que deve ser realizado e na definição das ferramentas necessárias, entre outras peculiaridades. Na prática, para a análise dos sinais, é utilizada a Transformada de *Fourier* que consiste na transformação do sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência. Esta transformação pode ser realizada pelo *Matlab* através de uma rotina para obtenção do sinal da frequência (Espectro). A densidade espectral de potência (PSD) representa a densidade de energia para cada faixa de frequência e descreve como a energia do sinal é distribuída no domínio da frequência. O gráfico de densidade espectral mostra a energia para cada frequência discreta ou banda de frequência.

3.9.2. Amplitude de vibração

A amplitude de vibração é a característica que descreve o nível ou intensidade da vibração. Essa amplitude é uma informação importante para o diagnóstico da análise da vibração podendo ser quantificada de várias maneiras, dentre elas, a relação entre o nível de pico a pico, o nível de pico, o nível médio e o nível RMS (Martins, 2010).

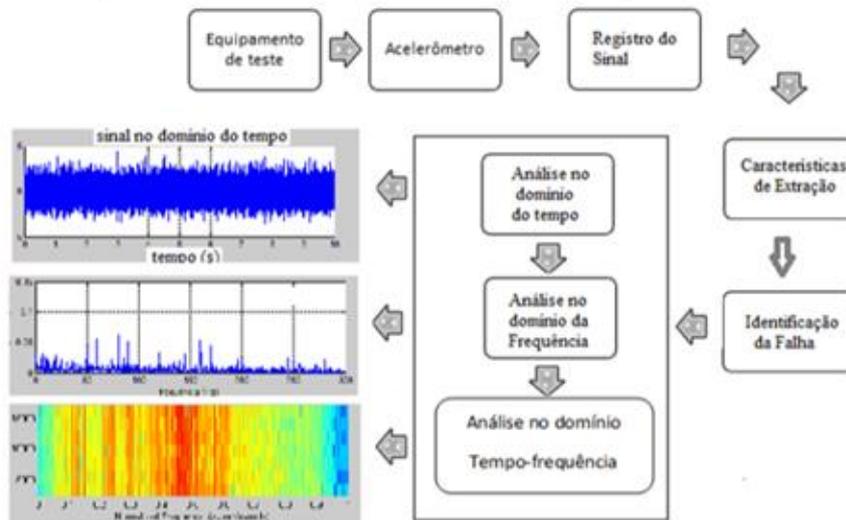
3.9.3 Valor RMS da vibração

O valor RMS ou *Root Mean Square* é a medida do deslocamento de vibração mais utilizado, porque leva em consideração o histórico da onda no tempo e seu valor, o qual é diretamente relacionado à energia contida e, portanto, à capacidade destrutiva da vibração. O valor RMS é calculado como a raiz quadrada da média dos desvios, onde os desvios referem-se a diferença entre os valores observados e o valor médio do sinal.

3.10 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

Em condições normais de operação, os mancais de rolamento sempre geram algum grau de vibração e nível de pressão sonora, embora a um nível baixo em um rolamento devidamente instalado e 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 devidas a problemas na fabricação, aplicação, operação do rolamento, ou devido ao seu desgaste com o uso. O diagnóstico de falha é realizado normalmente nas seguintes fases: aquisição de dados, extração de características, detecção de falhas e identificação, como mostrado na Figura 3.10.1.

Figura 3.10.1 Visão geral de diagnóstico de falhas com base em sinais de vibração



(Fonte YANG,2013)

As técnicas de extração de dados relevantes são decisivas para o sucesso do diagnóstico de falhas (YANG et al., 2013). Na figura 3.10.1 também é possível identificar que, dentre os diversos métodos de diagnóstico em falhas de máquinas girantes, a análise das frequências de vibração no domínio da frequência apresenta um aspecto visual mais nítido e com menor complexidade para análise. No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados sensores de velocidade, vibração, temperatura e pressão sonora, placas de aquisição de sinais capazes de registrar as vibrações dos rolamentos rígidos de esferas como o Arduino, um computador, planilhas eletrônicas e softwares como *MatLab*. Com isso, foi possível criar um banco de dados dos sinais dos rolamentos nos ensaios realizados. Esse banco de dados contém informações sobre temperatura, velocidade, nível de pressão sonora, vibração e valores de RMS que registram gastos de energia pelos rolamentos além de permitir a realização gráfica de curvas de espectro de frequência em função das diferentes frequências a que o motor está submetido nos ensaios. Após esse procedimento, foi realizada uma análise de indicadores de vibrações no domínio do tempo e no domínio da frequência para a extração das frequências características excitadas pelo desgaste dos rolamentos.

3.11 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE DETECÇÃO PRECOCE DE DESGASTE EM ROLAMENTOS

No desenvolvimento da metodologia de detecção precoce de desgaste em rolamentos procedeu-se inicialmente aos testes para a avaliação das variáveis selecionadas para análise como velocidade, nível de pressão sonora, temperatura e vibração. Conforme já observado, foram ensaiados 25 rolamentos caracterizados como novos, ótimos, bons, deteriorados e muito deteriorados. Como será visto mais adiante, os resultados dos ensaios demonstraram que nível de pressão sonora, velocidade e temperatura não sofreram alterações significativas, que podem ajudar na detecção de desgaste. Por outro lado, amplitude do deslocamento e energia de vibração, revelaram-se melhores indicadores para a detecção de desgaste em rolamentos. As curvas foram classificadas como E1 a E25, representando 25 ensaios com 25 rolamentos diferentes tal que cada ensaio foi caracterizado por uma denominação. Configurou-se a placa de aquisição de dados do Arduino para amostrar o sinal do sensor a uma taxa de 2500 amostras a cada segundo. O ambiente para coleta e análise dos sinais de vibração foi composto por: (i) Placa de aquisição de dados Arduino; (ii) Notebook DELL VOSTRO 5480; (iii) *Matlab/Simulink* 2014b; (iv) sensor de vibração MPU 6050. Utilizando dispositivos denominados *shields* compatíveis com o Arduino foram coletados sinais pela placa de aquisição de dados através do *Simulink*. A Figura 3.11.1 mostra o sistema de coleta e análise de sinais de vibração.

Figura 3.11.1 Sistema de coleta e análise de vibração

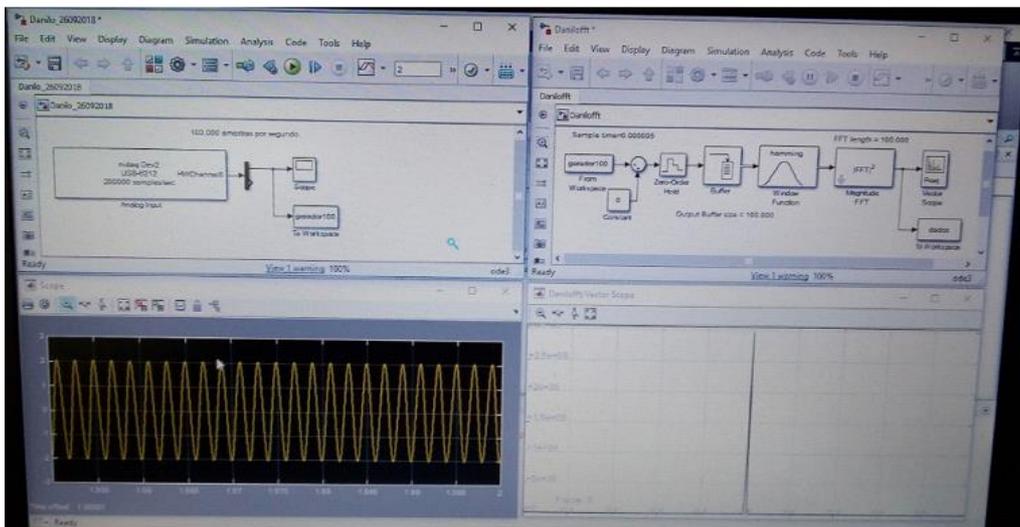


Fonte: [o autor]

Na Figura 3.11.2 pode-se observar o *Simulink* rodando no *notebook*, que acessa a placa de aquisição de dados através de um cabo USB. O sensor

de vibração é conectado a uma entrada analógica da placa de aquisição de dados. Ele foi instalado na tampa do motor por onde sai o eixo, próximo do rolamento. Através do *Simulink* e do Arduino configurou-se a placa de aquisição de dados para amostrar o sinal do sensor a uma taxa de 2500 amostras por segundo. A placa tem a capacidade de armazenar até 4095 amostras antes de enviar para o notebook. Isto permite que o notebook leia estes dados através da interface USB sem problemas. Os dados coletados são armazenados em arquivo para futuro processamento. A Figura 3.11.2 apresenta o ambiente de software na plataforma *MatLab/Simulink*.

Figura 3.11.2 Ambiente de software para coleta de dados



[Fonte: o autor]

Os dados coletados de nível de pressão sonora, vibração, velocidade e temperatura foram inseridos e analisados em planilhas eletrônicas para a realização de análises, como pode ser visto na figura 3.11.3.

Figura 3.11.3 Dados mensurados dos ensaios

Rolamento	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	E25
Classificação inicial	Novo	Novo	Novo	Novo	Novo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Desgastado	Desgastado	Desgastado	Desgastado	Muito desgastado					
Temperatura média (°C)	25,9	28,4	27,7	26,9	28,5	26,3	28,3	28,1	28,4	28,2	26,4	26,4	28,2	28,5	27,8	26,2	28,6	28,4	28,4	27,9	28,3	28,6	27,7	26,4	25,6
Velocidade média (rpm)	1684	1843	1776	1742	1778	1762	1782	1782	1798	1796	1764	1746	1784	1788	1774	1762	1744	1786	1792	1748	1778	1788	1774	1732	1682
Nível de pressão sonora (dB)	88	107	76	76	69	62	77	76	83	74	69	69	77	70	66	76	66	64	76	70	88	76	99	76	75
Energia 0-50 Hz	2,5	2,1	1,7	1,8	1,5	0,8	2,1	7,6	9,6	8,8	2,6	3,0	3,9	5,4	11,2	2,9	4,0	8,5	13,3	11,8	22,2	22,4	31,9	26,5	26,1
Energia 50-100 Hz	8,1	7,7	4,3	5,0	4,8	8,8	19,5	8,0	11,9	10,8	34,5	41,4	19,3	20,9	13,7	42,1	51,7	25,3	18,8	35,1	30,9	31,0	38,9	48,5	43,2
Energia 100-150 Hz	10,7	9,2	9,0	7,8	4,9	5,1	13,9	8,2	14,6	14,9	10,7	15,5	16,5	18,9	18,9	18,9	23,1	27,1	21,3	21,9	100,1	68,4	57,4	33,2	44,8
Energia 150-200 Hz	3,0	2,8	2,9	2,4	1,9	3,2	11,5	7,0	11,1	13,9	6,3	5,6	8,1	11,5	14,1	6,8	6,2	7,8	21,3	10,6	35,3	24,2	28,0	14,3	15,2
Energia 200-250 Hz	4,1	5,8	7,9	7,2	5,5	1,7	10,3	6,0	8,4	11,7	2,4	3,0	10,3	9,1	14,8	2,6	2,8	15,6	15,2	32,0	40,1	29,1	27,8	15,4	13,5
Energia total (0 a 250 Hz)	28,4	27,7	25,9	24,1	18,5	19,5	57,2	36,8	55,6	60,2	56,4	68,4	58,1	65,9	72,6	73,2	87,8	84,2	89,9	111,4	228,6	175,1	184,0	137,9	142,8
Energia no pico de 118 Hz	7,3	4,1	2,9	2,4	1,6	2,6	0,7	1,8	2,7	2,4	5,4	11,2	7,1	2,6	4,9	15,0	18,0	3,3	2,9	13,4	32,3	22,5	13,0	11,7	19,2
Energia no pico de 147 Hz	2,2	3,9	5,5	4,8	2,7	1,4	8,7	1,8	1,5	2,4	3,7	3,0	5,7	12,1	4,8	3,2	4,2	18,0	5,1	2,0	52,0	28,7	22,8	8,7	11,1
Amplitude RMS (mV)	0,71	0,77	0,55	0,65	0,69	1,48	0,91	1,33	1,08	0,50	1,46	1,50	0,96	1,20	1,59	2,03	3,01	3,42	1,83	4,30	2,74	4,09	3,25	2,58	2,91

Fonte:[o autor]

A coleta de dados permitiu, para cada ensaio, a medição da temperatura em graus centígrados, da velocidade média do motor (em rpm), do nível de pressão sonora (em dB), da energia em diferentes faixas de frequência e da amplitude de vibração (valor RMS). Os deslocamentos de vibração (e seu valor RMS) estão expressos em mV. Não houve o interesse em conversão para milímetros, pois o método utilizado irá se apoiar no aumento percentual do sinal para detectar desgaste, de forma que o uso de milivolts ou milímetros é indiferente. Então, para manter o método tão simples quanto possível, utilizou-se diretamente mV para expressar a amplitude e o valor RMS dos deslocamentos. A simplicidade do método é importante para o seu efetivo uso em campo, o que é desejável. Da mesma forma, a energia não foi convertida para unidades usuais de energia (por exemplo, Joules) o que implicaria definir a massa do motor. Assim, os valores de energia que aparecem na Tabela e no restante desta tese estão relacionados à leitura direta do sinal, em milivolts, e são, na verdade, valores proporcionais a energia de vibração. Os valores de energia nas diferentes faixas de frequência foram calculados integrando a curva de densidade espectral (a área sob a curva do espectro de frequências é proporcional a energia de vibração do motor). Os valores de energia nos picos de 118 e 147 Hz foram calculados integrando a curva de densidade espectral nas faixas de frequência referentes, respectivamente a 118 ± 3 Hz e 147 ± 3 Hz. Esses valores específicos (118 e 147 Hz) foram selecionados, pois mais adiante será visto que os mesmos correspondem às frequências onde são observados os maiores picos de vibração dessa classe de motor.

A análise dos dados obtidos permitiu o estabelecimento de curvas comportamentais dos rolamentos (em função de desgaste) que permitirão caracterizar a classe de rolamentos investigada. O método empregado atende um princípio prático aplicado em atividades de manutenção. O diagnóstico, utilizando os critérios que serão vistos mais adiante, mostrou-se rápido e eficiente. Observa-se que a aplicação do método proposto é simples. Um banco de dados e as curvas representativas são desenvolvidos, servindo de modelo para a avaliação do estado de desgaste dos rolamentos de interesse. Os dados são regis-

trados e tratados em uma planilha eletrônica. Uma comparação entre indicadores do rolamento em investigação e critérios pré-estabelecidos permite classificar o rolamento testado em uma análise rápida e simples, apoiada na energia e deslocamento RMS de vibração.

3.12 MODELOS DE DETECÇÃO DE DESGASTE E DEFEITOS EM ROLAMENTOS

Tendências no diagnóstico de falhas em máquinas elétricas podem ser vistas no trabalho de HENAO (2014), com ênfase na redução dos custos de manutenção e a prevenção de paralisações não programadas, que resultam em perdas de produção e receitas financeiras.

De acordo com IMMOVILLI et al. (2010), muitas atividades de pesquisa foram focadas no diagnóstico de falhas de rolamento por sinal de corrente. Os componentes da corrente do estator são gerados em frequências previsíveis relacionadas à alimentação elétrica e às frequências mecânicas das falhas nos mancais. No entanto, sua detecção nem sempre é confiável, pois a amplitude das assinaturas de falha no sinal atual apresenta um nível muito reduzido. Sua pesquisa compara a capacidade de detecção de falhas de rolamentos obtida com sinais de vibração e corrente usando como técnica de processamento de sinal a FFT e *MatLab*. Esse autor também realizou ensaios em uma máquina com mancais saudáveis e defeituosos. As técnicas de processamento de sinal para ambos os casos são revisadas e comparadas para mostrar qual procedimento é mais adequado para os diferentes tipos de falhas nos rolamentos.

BLODT et al. (2008) avaliaram modelos para detecção de danos em rolamentos de motores de indução utilizando monitoramento de corrente do estator e variações de torque de carga causadas pela falha do rolamento. Testes experimentais foram realizados medindo-se a vibração, o torque e a corrente do estator. Os resultados obtidos por análise espectral indicaram que os modelos adotados apresentaram resultados satisfatórios. No trabalho desses autores, os modelos não foram caracterizados e os efeitos descritos se caracterizaram pela variação de corrente com o uso de inversor de frequência. A variação de corrente foi a variável utilizada para a detecção de possíveis defeitos em rolamentos. O trabalho difere do apresentado nesta tese, pois nesta tese considera-se

que o rolamento irá apresentar desgaste que deve ser detectado independente da variável que pode causar este defeito, pois o meio em que o motor está inserido também deve ser considerado, o que torna o estudo desenvolvido na tese mais abrangente que o produzido por BLODT et al. (2008).

No trabalho de CAMCI et al. (2013), denominado avaliação de características para prognósticos eficazes de rolamentos, é avaliado possíveis futuras falhas em elementos de rolamentos. Como as falhas futuras são imprevisíveis, os diagnósticos são baseados em históricos de defeitos. No artigo desses autores, é apresentado um método de avaliação da qualidade dos recursos para prognósticos e são apresentados os resultados de rolamentos que são testados até a falha em um ambiente de laboratório. O trabalho desenvolvido tem relação similar com o trabalho desta tese, que visa diagnosticar desgaste nos rolamentos, porém o trabalho desta tese utiliza rolamentos novos e desgastados, sem acesso aos históricos de utilização e substituição. Através dos resultados obtidos em ensaios, estabeleceu-se um método para a identificação prematura de desgaste.

BEZERRA (2004) realizou um estudo comparativo entre diversas técnicas de detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração, como defeitos induzidos nas pistas e esferas com diferentes tamanhos de falhas submetidas a diferentes velocidades. Rolamentos foram submetidos a ensaios observando-se a evolução das falhas. Dentre as diversas técnicas avaliadas o envelope com filtro adaptativo foi o mais eficiente.

O trabalho de FUJIMOTO (2006), denominado diagnóstico automático de defeitos em rolamentos baseado em lógica *fuzzy*, apresenta duas metodologias com lógica *fuzzy* e compara o desempenho de ambas para realizar o diagnóstico automático de defeitos em rolamentos. Para tanto utiliza um banco de dados experimental composto por sinais de vibração. O autor discute qualidades e defeitos de cada metodologia testada. Em comparação com o estudo desenvolvido nesta tese, o autor utiliza dados conhecidos sobre o comportamento dos rolamentos, avalia os mesmos em função de metodologias conhecidas para definir qual deverá ser empregada, mas não define qual tipo de defeito será avaliado. No trabalho desta tese a metodologia desenvolvida

concentra-se especificamente em avaliar o desgaste prematuro dos rolamentos para estabelecer critérios de substituição.

No trabalho de FILIPETTI (2015) não ocorreram ensaios com dispositivos para desenvolver uma metodologia de identificação prematura de defeitos como ocorreu nesta tese. A abordagem desse autor visou o desenvolvimento de uma aprendizagem supervisionada de dispositivos existentes em máquinas elétricas com aplicação genérica, diferente do trabalho desenvolvido nesta tese que, utilizando tecnologia semelhante, realizou ensaios e desenvolveu uma metodologia para a identificação prematura de desgaste em rolamentos.

No estudo realizado por VARANIS (2016), utilizou-se a plataforma Arduino em conjunto com sensores, como acelerômetro, giroscópio e ultrassom, para medição de vibrações em sistemas mecânicos. O principal objetivo do trabalho foi a montagem de um sistema para aquisição de sinais de fácil manuseio, baixo custo e boa precisão para fins didáticos. O trabalho de VARANIS (2016) se propõe a estudar vibrações em uma viga, em que se mede a sua posição, velocidade e aceleração. Uma montagem experimental foi implementada. Os resultados obtidos são comparados com modelos analíticos e de simulação computacional. Os resultados estão em concordância com a literatura. Embora com objetivos diferentes, o trabalho desenvolvido nesta tese utiliza uma tecnologia muito semelhante ao trabalho desenvolvido por VARANIS (2016), pois nele também foram utilizados sensores, plataforma multiprocessada, Arduino e montagem experimental. A análise dos resultados desta tese envolveu a análise de curvas de espectro de frequência usando a transformada rápida de *Fourier* e o software *MatLab* para a transformação dos sinais obtidos no domínio do tempo para o domínio da frequência. Comparativamente, os resultados apresentados nesta tese apresentam-se mais significativos, pois são baseados em ensaios e todas as curvas obtidas são apresentadas e analisadas e, baseado na análise das mesmas, uma metodologia de identificação de desgaste é desenvolvida.

O trabalho de PLANT (2015) concentrou-se na análise de vibrações dos motores elétricos para detectar falhas em equipamentos rotativos com o uso de análise de vibração. A vibração do motor é medida e monitorada. Os dados de vibração medidos são analisados usando software de análise de espectro e um

programa desenvolvido em *MatLab*. Esta informação fornece uma visão sobre a condição da máquina. Observa-se que esta tese também utiliza a análise do espectro de frequência da vibração do motor. O trabalho de (PLANT, 2015) porém não se concentrou em um dispositivo específico capaz de causar a vibração, mas apenas em avaliar como a vibração pode interferir no comportamento do motor. Esta tese, entretanto, teve por objetivo avaliar como o rolamento de motor pode causar vibrações no motor, que irão causar problemas se forem intensas. PLANT (2015) também não desenvolveu critérios para detectar o desgaste e substituição, como é desenvolvido nesta tese.

No trabalho de LIN et al. (2016), a análise de vibração foi usada como uma ferramenta fundamental para detecção de falhas ocorridas a partir de um defeito no mancal. Esses autores desenvolveram um método de detecção e análise de vibração de rolamentos *on-line* usando um algoritmo de transformada rápida de *Fourier* aprimorado. A frequência de vibração é usada para estabelecer um modelo matemático para encontrar as principais frequências do sinal de vibração. O modelo proposto é desenvolvido usando uma simples operação aritmética baseada na transformada rápida de *Fourier*, de modo que seja possível um cálculo mais eficiente na análise de sinais de impulso. Tanto a calibração da medição quanto os resultados práticos comprovam que o esquema proposto pode alcançar resultados precisos, rápidos e confiáveis. A semelhança entre a metodologia usada no trabalho de LIN et al. (2016) e o trabalho desenvolvido nesta tese é o uso da Transformada Rápida de *Fourier* para realizar a análise do espectro de frequência causado pela vibração do rolamento. O autor caracteriza seu modelo como *on line* embora a metodologia utilizada não permita essa ação, pois necessita da transformação do sinal de tempo em frequência, impossibilidade esta demonstrada nesta tese. Além do mais a análise do espectro de frequência permite apenas a identificação dos picos do sinal de vibração em função da frequência.

Para uma análise mais eficiente, é necessário a interpretação do gasto de energia usando o valor RMS do sinal de vibração. A avaliação conjunta da amplitude de vibração e do espectro de frequência pode fornecer uma análise mais precisa e confiável. GOYAL et al. (2018) publicaram um trabalho intitulado

Uma Revisão das Condições de Monitoramento de Máquinas Rotativas, onde aborda as plataformas de diagnóstico de máquinas enfatizando os sistemas de automação utilizados. Enfatiza o uso da análise de tempo e de frequência, porém aponta como fatores limitadores o alto custo operacional que envolve estes processos. É importante salientar que na análise do trabalho desenvolvido nesta tese verifica-se a utilização de plataformas multiprocessadas e sensores de alta precisão e baixo custo além de softwares como *MatLab*, capazes de realizar análises no domínio do tempo e da frequência com rapidez e eficiência, inserindo o processo de monitoração em um estágio de alta tecnologia, aliado a um baixo custo de implantação.

GONÇALVES et al. (2015), em seu artigo denominado Diagnóstico de Falhas de Rolamentos em Motores de Indução por Sinais de Vibração, analisam a detecção precoce de falhas nos rolamentos de motores elétricos através da análise do sinal de vibração. Enfatizam a dificuldade de identificação de pequenos defeitos, em um estágio inicial de desenvolvimento, caracterizando a necessidade de utilização de técnicas avançadas de processamento de sinais para facilitar a extração das frequências características das falhas dos sinais de vibração. Nesta tese pode-se observar que os sinais de vibração que caracterizam desgaste precoce foram identificados através da análise da vibração do motor. Posteriormente, em função das informações oferecidas por essas variáveis, foram identificados critérios que melhor traduzem o início do desgaste dos rolamentos. Além disso, gráficos representativos dos sinais iniciais de desgaste são apresentados e analisados.

No artigo de ROAD & PUNJAB (2014), é apresentada uma técnica de diagnóstico de falhas em rolamentos utilizando a análise do espectro da assinatura de corrente do motor. A análise é feita através da comparação entre um rolamento saudável e um rolamento defeituoso. O autor também utiliza a Transformada Rápida de *Fourier* para a comparação dos resultados obtidos. Comparativamente com o trabalho desenvolvido nesta tese, também foram utilizados ensaios em rolamentos novos e usados, além de dispositivos de alta tecnologia como microprocessadores Arduino, sensores e acelerômetros, além de um decibelímetro para obtenção dos sinais de defeitos, e foi utilizada a

Transformada Rápida de *Fourier* para a obtenção dos sinais no domínio da frequência. Procedeu-se também a análise dos sinais utilizando a análise do espectro de frequência e do deslocamento RMS.

Outra técnica moderna de análise de falhas em rolamentos é encontrada no trabalho de PAZOUKI et al. (2015), denominado Diagnóstico de Falhas e Monitoramento da Condição de Rolamentos Usando Agrupamento Baseado em Lógica Difusa e Abordagem Multissensorial. Esse trabalho investiga a aplicação da extração de características de falhas de multisensores e clustering baseado em lógica difusa para o monitoramento de condições de rolamentos. Múltiplos sensores independentes em um sistema de acionamento de motor elétrico fornecem valiosa indicação antecipada de uma falha e podem ser efetivamente utilizados para realizar uma detecção de falhas. Através da utilização de sensores comuns, incluindo sensor de corrente e sensores de vibração no motor, a análise de assinatura de corrente do motor (MCSA) e a análise de vibração foram usadas para extrair a energia de falha do rolamento. A transformada *wavelet* discreta (DWT) foi aplicada para monitorar a energia dos sinais de falha do rolamento. Em seguida, a técnica de *fuzzy c-mean* (FCM) foi desenvolvida para utilizar os dados do sensor único e do multisensor para identificar a gravidade da falha do rolamento. Extensa análise teórica e teste experimental foi realizado para demonstrar as vantagens da abordagem proposta. A validade deste estudo foi confirmada através da análise do motor de indução monofásico de 1/6 HP e do sistema de acionamento. Este trabalho apresenta características tecnológicas e técnicas de análise *fuzzy* e transformada *wavelet* discreta o que caracteriza sua inovação, mas deixa claro sua abordagem excessivamente teórica e um teste experimental simples

O artigo de MORUTHI et al. (2014) denominado Investigação Preliminar sobre Análise de Falhas de Mancais em Motores de Indução Trifásicos por Acelerômetro propõe um método simples para detectar defeitos de ponto único na parte interna do rolamento de motor de indução de potência menor, empregando sinais de vibração e corrente do motor. Investigações experimentais foram realizadas sob condições sem carga, carga total e tensão de desequilíbrio. A análise espectral do sinal de vibração e corrente foi realizada

utilizando o algoritmo de transformação de *Fourier* (DIT-FFT). Os resultados de ambos os métodos são comparados com os valores teóricos e são encontrados como próximos. Isso indica que o método proposto pode ser usado como uma alternativa à análise convencional de vibração e assinatura para monitoramento de condições de rolamento. Diferente do proposto nesta tese, este trabalho se caracteriza pela investigação de um ponto de defeito no rolamento, enquanto que nesta tese o objetivo é encontrar desgaste precoce nos rolamentos independente da característica ou localização.

Os trabalhos também diferem na metodologia empregada, pois MORUTH et al. (2014) utilizam apenas acelerômetros para identificação de defeitos, enquanto nesta tese são usados, além do acelerômetro, sensores de vibração, encoders, sensores de temperatura e decibelímetros. Ambos os trabalhos utilizam FFT para análise das curvas de espectro de frequência, embora esta tese também utilize o deslocamento RMS para análise da energia de vibração provocada pelo desgaste dos rolamentos. Além disso, esta tese faz uma série de ensaios com rolamentos que apresentam diversas características e realiza uma análise detalhada das curvas dos sinais obtidos pelos sensores.

No trabalho de ARAUJO (2015), técnicas de monitoramento são usadas para a detecção de falhas em rolamentos através do desenvolvimento de um projeto de uma bancada para realização de testes de capacidade dos motores. Foi desenvolvido um sistema de análise e diagnóstico de falhas mecânicas em motores elétricos, através da inclusão de sensores adaptados para monitorização dos parâmetros de funcionamento. A escolha das técnicas utilizadas teve por base uma análise dos modos de falha dos elementos do motor. A proposta foi apresentada no 13^o CNM (Congresso Nacional de Manutenção), mas não apresenta resultados experimentais.

Nas aplicações industriais, 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 preven-

tiva, que requer uma base estatística. Essa estratégia é uma manutenção planejada baseada no tempo esperado de durabilidade de um componente de máquina, forçando a substituição a fim de se evitar a manutenção corretiva. Porém isso pode resultar na troca de um elemento de máquina substancialmente 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, que implica em aumento de custos de manutenção (horas de parada, mão-de-obra, falta de reposição, etc.) (GOUNDAR et al., 2017).

A estratégia de manutenção preditiva faz uso de vários métodos para avaliação da condição de máquina como a 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 (AUGIE, 2015).

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 o uso das Transformadas Rápidas de *Fourier*, as Redes Neurais Artificiais (RNA), Lógica *Fuzzy* e *Wavelet*, têm sido

implementadas com sucesso na identificação de falhas em rolamentos, engrenagens e outros elementos de máquinas (RIERA-GUAPS, 2015).

Existem diversos trabalhos na literatura que utilizam os mais variados métodos para a investigação de defeitos em rolamentos. Os principais métodos utilizados foram aqui apresentados. Verifica-se, contudo, que os métodos adotados são desenvolvidos através de modelos matemáticos e/ou de simulação, muitos deles complexos e muitas vezes dissociados de testes práticos. Uma inovação decorrente deste trabalho é a realização de ensaios práticos, que possibilitam o estabelecimento de critérios para a avaliação do eventual desgaste de rolamentos. O método desenvolvido alia simplicidade, uso de tecnologia avançada e baixo custo, que não encontra similaridade na literatura técnica existente, caracterizando assim o aspecto pioneiro e inédito.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo, inicialmente, apresenta os dados de temperatura, nível de pressão sonora, energia e deslocamento RMS coletados dos 25 rolamentos utilizados neste estudo. A energia foi medida através da integração das curvas de densidade espectral de frequência. Os valores capturados encontram-se em uma tabela relativamente longa de valores, pois foram coletados 2500 pontos por segundo. A FFT gerou valores de densidade espectral para frequência de 1 a 250 HZ, medidos a cada 0,1 Hz, totalizando 2500 pontos. Considerando a curva definida por esses pontos, procedeu-se uma análise da energia contida nas faixas de frequências de 0-50 HZ, 50-100 HZ, 100-150 HZ, 150-200 HZ e 200-250 HZ. Também foram obtidos os dados das variáveis no domínio do tempo. Esses dados foram convertidos em valor RMS dos deslocamentos de vibração, como indica a tabela 4.1.1.

Após, os espectros de potência, obtidos através da aplicação da FFT para cada rolamento ensaiado, são apresentados em forma gráfica. Em seguida, os dados apresentados são analisados para identificar aqueles que contribuem na definição dos estados dos rolamentos (novo, bom, ótimo, desgastado ou muito desgastado). O objetivo é identificar desgaste em rolamentos utilizando o monitoramento dos sinais de vibração no mancal do motor, que suporta o rolamento de teste. Essa identificação é feita através do processamento dos dados com o auxílio do método desenvolvido nesta tese para a detecção de desgaste prematuro. O método desenvolvido permitiu estabelecer critérios para identificar os estados dos rolamentos. Esses critérios foram usados junto ao conjunto de 25 rolamentos estudados, viabilizando o diagnóstico dos rolamentos estudados, de forma a verificar se o rolamento está em condições de utilização, se foi retirado de uso precocemente, no momento certo ou tardiamente. Por fim,

é discutida a aplicação do método proposto nas empresas, enfatizando-se os elementos que devem ser reunidos, incluindo materiais e conhecimentos, para que a aplicação possa ser feita.

4.1 DADOS COLETADOS

Os rolamentos ensaiados foram nomeados de E1 a E25 e agrupados em cinco categorias de acordo com seu estado visual de desgaste: (i) novo; (ii) ótimo; (iii) bom; (iv) desgastado e (v) muito desgastado. Os rolamentos novos foram adquiridos nessa condição (sem nenhum uso), enquanto que os demais foram classificados de acordo com seu estado visual nas empresas em que foram coletados. O Quadro 4.1.1 apresenta um resumo dessa classificação preliminar dos rolamentos. Vale observar que a amostra, propositalmente, foi reunida de forma a conter aproximadamente o mesmo número de rolamentos nas diferentes classes de degradação.

Quadro 4.1.1. Estado dos rolamentos.

Estado do Rolamento	Ensaio
Novo	E1 - E2 - E3 - E4 - E5
Ótimo	E6 - E7 - E8 - E9 - E10
Bom	E11 - E12 - E13 - E14 - E15
Desgastado	E16 - E17 - E18 - E19
Muito Desgastado	E20 - E21 - E22 - E23 - E24 - E25

Fonte: [o autor]

Os dados coletados nos 25 ensaios realizados, assim como as figuras dos espectros de frequência, obtidas via FFT, são descritos na sequência, agrupados pelo estado dos rolamentos. Assim, as Tabelas 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4 e 4.1.5 apresentam os valores obtidos de temperatura, nível de pressão sonora, energia de vibração e valor RMS do deslocamento de vibração para os rolamentos classificados como novos, bons, ótimo, desgastados e muito desgastados, respectivamente. Todas as tabelas apresentadas nesta seção foram elaboradas pelo autor do texto.

Tabela 4.1.1. Dados coletados com o uso dos rolamentos novos

	Rolamento				
	E1	E2	E3	E4	E5
Característica	Novo	Novo	Novo	Novo	Novo
Temperatura média (°C)	25,9	28,4	27,7	26,9	28,5
Nível de pressão sonora (dBA)	87,9	107,2	75,95	76	68,9
Energia 0-50 hz	2,5	2,1	1,7	1,8	1,5
Energia 50-100 hz	8,1	7,7	4,3	5,0	4,8
Energia 100-150 hz	10,7	9,2	9,0	7,8	4,9
Energia 150-200 hz	3,0	2,8	2,9	2,4	1,9
Energia 200-250 hz	4,1	5,8	7,9	7,2	5,5
Energia total hz	28,4	27,7	25,9	24,1	18,5
Energia no pico 118 hz	7,3	4,1	2,9	2,4	1,6
Energia no pico 147 hz	2,2	3,9	5,5	4,8	2,7
Deslocamento RMS (mV)	0,71	0,77	0,55	0,65	0,69

Os rolamentos caracterizados como novos apresentam um comportamento similar padrão, que servirá como referência para a avaliação dos demais rolamentos. Observa-se que a temperatura média permanece aproximadamente a mesma, enquanto o nível de pressão sonora apresenta alterações maiores, oscilando entre 75,9 e 107,2. Vale observar que, em termos de nível de pressão sonora ambiente, a NR 15 indica como valor máximo para jornada de 8h o limite de 85 dBA. Os rolamentos designados como E1 e E2 apresentam valores acima da norma, 87,9 e 107,2, respectivamente. Alguns fatores, como instalação do rolamento, desbalanceamento, problemas no acoplamento entre eixos e fixação do motor em sua base, podem causar estas variações de nível de pressão sonoras mesmo em rolamentos novos. Observa-se que o rolamento E2 apresentou os maiores valores de nível de pressão sonora e deslocamento RMS, comparado aos demais rolamentos novos, logo pode-se imaginar que ele esteja levemente desalinhado no eixo do motor ou apresentando uma leve excentricidade. Esse problema costuma ocorrer com regularidade quando da troca de rolamento. Esse problema também pode ser provocado por desalinhamento

entre o anel interno e externo em função do método utilizado de colocação do rolamento no eixo do motor. Vale mencionar que, além dos fatores que provocam nível de pressão sonora e vibrações já citados em relação ao rolamento E1, caso o rolamento seja instalado e testado no motor antes de entrar em operação, sob tensão nominal e corrente de partida elevada, isso pode causar danos nos corpos rolantes das esferas e esses causarem danos nas pistas ou na gaiola que suporta as esferas. Valores mais acentuados de nível de pressão sonora e deslocamento RMS podem ser indicativos de uma montagem que irá causar desgaste prematuro. Se esse for o caso, isso deve ser corrigido antes do motor entrar em operação, o que ilustra a necessidade e a importância do uso desta metodologia.

Em termos de amplitude de vibração, os rolamentos novos apresentam em média deslocamento de vibração (valor RMS) de 0,67mV, valores que indicam que os rolamentos ainda não apresentam características de defeitos. Observa-se que os valores energia são relativamente baixos, sendo que os valores de energia estão dispersos ao longo das faixas de 0 a 250 Hz. Observa-se que a energia nos picos próximos de 118 Hz e 147 Hz ainda não apresenta crescimento nesse estágio inicial de uso. Infere-se que o desgaste nessa classe de rolamento (que excita essas frequências como será visto mais adiante) ainda não surgiu.

Tabela 4.1.2. Dados coletados com o uso dos rolamentos ótimos

	Rolamento				
	E6	E7	E8	E9	E10
Característica	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
Temperatura média (°C)	26,3	28,3	28,1	28,4	28,2
Nível de pressão sonora (dBA)	61,9	76,5	75,5	83,4	74,1
Energia 0-50 hz	0,8	2,1	7,6	9,6	8,8
Energia 50-100 hz	8,8	19,5	8,0	11,9	10,8
Energia 100-150 hz	5,1	13,9	8,2	14,6	14,9
Energia 150-200 hz	3,2	11,5	7,0	11,1	13,9
Energia 200-250 hz	1,7	10,3	6,0	8,4	11,7
Energia total hz	19,5	57,2	36,8	55,6	60,2
Energia no pico 118 hz	2,6	0,7	1,8	2,7	2,4
Energia no pico 147 hz	1,4	8,7	1,8	1,5	2,4
Deslocamento RMS (mV)	1,48	0,91	1,33	1,08	0,50

Os rolamentos caracterizados como ótimos apresentam um comportamento similar aos novos. Observa-se que a temperatura média permanece aproximadamente a mesma, enquanto o nível de pressão sonora (médio) apresenta uma redução, recuando de 83 dBA (novos) para 74 dBA (ótimos). Essa redução no nível de pressão sonora pode ser devido a alguma acomodação que ocorre no início do uso dos rolamentos (possivelmente eliminação de pequenas protuberâncias, que geram nível de pressão sonora). Essas observações permitem inferir que temperatura e nível de pressão sonora não são bons indicadores para a detecção prematura de desgaste. Em comparação com os rolamentos novos, observa-se que, além do aumento do gasto de energia total de 24,9 (novos) para 45,9 (ótimos), o deslocamento de vibração (valor RMS) também cresce, avançando em média de 0,67 mV (novos) para 1,06 mV (ótimos) caracterizando que a presença inicial de desgaste, possivelmente fuga de esfericidade, já inicia a ocorrer mesmo no início do uso dos rolamentos. Dentre os rolamentos classificados como ótimos testados, o rolamento E9 apresentou os maiores valores de nível de pressão sonora (83,4 db), enquanto que o rolamento E10 apresentou o

maior valor de energia total (60,2) e o rolamento E6 o maior valor RMS de deslocamento de vibração (1,48 mV). Esses rolamentos deveriam ser monitorados com maior frequência quando em uso, pois apresentam sintomas de que podem apresentar defeitos prematuros. Observa-se que a energia nos picos próximos de 118 Hz e 147 Hz ainda não apresenta crescimento nesse estágio inicial de uso, demonstrando que os rolamentos não estão produzindo vibração que afete o motor.

Tabela 4.1.3. Dados coletados com o uso dos rolamentos bons

	Rolamento				
	E11	E12	E13	E14	E15
Característica	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom
Temperatura média (°C)	26,4	26,4	28,2	28,5	27,8
Nível de pressão sonora (dBA)	68,9	69,4	77,0	69,9	65,8
Energia 0-50 hz	2,6	3,0	3,9	5,4	11,2
Energia 50-100 hz	34,5	41,4	19,3	20,9	13,7
Energia 100-150 hz	10,7	15,5	16,5	18,9	18,9
Energia 150-200 hz	6,3	5,6	8,1	11,5	14,1
Energia 200-250 hz	2,4	3,0	10,3	9,1	14,8
Energia total hz	56,4	68,4	58,1	65,9	72,6
Energia no pico 118 hz	5,4	11,2	7,1	2,6	4,9
Energia no pico 147 hz	3,7	3,0	5,7	12,1	4,8
Deslocamento RMS (mV)	1,46	1,50	0,96	1,20	1,59

Os rolamentos caracterizados como bons apresentam um comportamento com maior variação em seus parâmetros. Observa-se que a temperatura média permanece aproximadamente a mesma, enquanto o nível de pressão sonora (médio) apresenta um leve aumento, aumentando de 74 dBA (ótimos) para 77A dB (bons). De acordo com a NR15, os limites de tolerância para nível de pressão sonora contínuo estão entre 85 e 115 dBA, logo o nível de pressão sonora mensurado nestes ensaios não implica em desconforto ao operador. Essas observações permitem concluir que nível de pressão sonora e temperatura

não são bons indicadores para a detecção prematura de desgaste. A energia total, no entanto, aumenta, avançando de 45,9 (média para rolamentos ótimos) para 64,3 (média para rolamentos bons) indicando, também, que algum desgaste se acumula no rolamento. Esse aumento na energia ocorre de forma mais concentrada, sendo observado nas faixas de 0 a 50 Hz e 50 a 100 Hz. Observa-se que a energia nos picos próximos de 118 e 147 Hz apresenta crescimento (comparado aos rolamentos ótimos), passando de 45,9 (ótimos) para 64,3 (bons), indicando que desgastes já se manifestam. Nota-se também que o deslocamento RMS médio aumenta 26% em relação aos rolamentos ótimos, crescendo de 1,06 para 1,34 mV. De posse desta análise, pode-se concluir que deslocamento RMS e energia de vibração do motor são parâmetros que permitem identificar a passagem dos rolamentos do estado “ótimo” para “bom”, o que demonstra a importância da aplicação deste método na análise do estado físico do rolamento.

Tabela 4.1.4. Dados coletados com o uso dos rolamentos desgastados

	Rolamento			
	E16	E17	E18	E19
Característica	Desgastado	Desgastado	Desgastado	Desgastado
Temperatura média (°C)	26,2	28,6	28,4	28,4
Nível de pressão sonora dBA	75,6	66,3	64,2	75,5
Energia 0-50 hz	2,9	4,0	8,5	13,3
Energia 50-100 hz	42,1	51,7	25,3	18,8
Energia 100-150 hz	18,9	23,1	27,1	21,3
Energia 150-200 hz	6,8	6,2	7,8	21,3
Energia 200-250 hz	2,6	2,8	15,6	15,2
Energia total hz	73,2	87,8	84,2	89,9
Energia no pico 118 hz	15,0	18,0	3,3	2,9
Energia no pico 147 hz	3,2	4,2	18,0	5,1
Deslocamento RMS (mV)	2,03	3,01	3,42	1,83

Os rolamentos indicados como desgastados apresentam temperatura média e nível de pressão sonora (médio) semelhante aos rolamentos bons

(27°C e 70 dBA, respectivamente), confirmando que essas variáveis não são relevantes para a detecção prematura de desgaste em rolamentos. Contudo, a energia total média aumenta de 64,3 (bons) para 83,8 (desgastados), indicando que esses rolamentos já sofrem desgaste considerável. Observa-se que, em alguns rolamentos, já aparecem valores altos de energia nos picos próximos de 118 Hz e 147 Hz (valores da ordem de 18,0), apontando a presença de desgaste que intensifica a vibração do motor. Por fim, o deslocamento RMS tem um aumento de 92% em relação aos rolamentos bons, avançando em média de 1,34 mV (bons) para 2,57 mV (desgastados). Percebe-se que Energia e Deslocamento RMS podem ser considerados bons indicadores para a detecção de desgaste de uso de rolamentos. Além disso, é claramente perceptível a distinção entre os rolamentos classificados como novos, ótimos, bons e desgastados em função da análise dessas variáveis.

Tabela 4.1.5. Dados coletados com o uso dos rolamentos muito desgastados

	Rolamento					
	E20	E21	E22	E23	E24	E25
Característica	Muito desgastado					
Temperatura média (°C)	27,9	28,3	28,6	27,7	26,4	25,6
Nível de pressão sonora	69,8	88,2	76,2	98,5	76,1	75,4
Energia 0-50 hz	11,8	22,2	22,4	31,9	26,5	26,1
Energia 50-100 hz	35,1	30,9	31,0	38,9	48,5	43,2
Energia 100-150 hz	21,9	100,1	68,4	57,4	33,2	44,8
Energia 150-200 hz	10,6	35,3	24,2	28,0	14,3	15,2
Energia 200-250 hz	32,0	40,1	29,1	27,8	15,4	13,5
Energia total hz	111,4	228,6	175,1	184,0	137,9	142,8
Energia no pico 118 hz	13,4	32,3	22,5	13,0	11,7	19,2
Energia no pico 147 hz	2,0	52,0	28,7	22,8	8,7	11,1
Deslocamento RMS ((mV)	4,30	2,74	4,09	3,25	2,58	2,91

Os rolamentos descritos como muito desgastados apresentam temperatura média de 27°C, similar aos rolamentos dos demais estados (novos, ótimos, bons e desgastados) e o nível de pressão sonora (médio) apresenta um aumento em relação aos rolamentos desgastados, de 70dBA (desgastados) para 80dBA (muito desgastados), porém o nível de pressão sonora dessa classe é menor do que da classe novos, indicando mais uma vez que essas variáveis (temperatura e nível de pressão sonora) não são bons indicadores para a detecção de desgaste. A energia total média, entretanto, aumenta 75% em relação aos rolamentos desgastados e mais de 500% em relação aos rolamentos novos, sinalizando que rolamentos com um grau avançado de deterioração tendem a induzir vibrações elevadas no motor. A energia nos picos próximos de 118 Hz e 147 Hz apresentam crescimento, chegando a valores como 52, sendo este valor extremamente elevado em relação aos demais. O deslocamento RMS aumenta em média de 2,57 mV (média para rolamentos desgastados) para 3,31mV (média para rolamentos muito desgastados). Percebe-se que, no geral, a temperatura média e o nível de pressão sonora não apresentam diferenças características entre as classes. Por outro lado, observou-se que os rolamentos novos, ótimos e bons apresentam valores de energia total e de deslocamento RMS menores do que os rolamentos desgastados e muito desgastados, indicando que essas variáveis exibem valores que podem distinguir as classes dos rolamentos. Por fim o deslocamento RMS apresenta um aumento substancial quando se compara os rolamentos desgastados e muito desgastados, o que indica que em ambos os estágios a presença de desgaste já se manifesta com intensidade, na forma de vibração provocada no motor. Essas últimas observações indicam que Energia e Amplitude de vibração do mancal do motor constituem os melhores indicadores para a detecção de desgaste nos rolamentos. Observa-se que a indicação de desgaste em rolamentos está intrinsecamente relacionada com a análise dos valores mensurados e a necessidade da existência de critérios de referência, o que caracteriza a importância da utilização deste método para tal análise.

4.2. ESPECTROS DE FREQUÊNCIA

O aumento do nível de vibração normalmente indica o desenvolvimento de desgaste ou falha em um elemento particular do rolamento. Medidas de vibração de nível global fornecem pouca informação que ajude a identificar as falhas. O espectro de frequência permite obter o diagnóstico preciso de uma falha em desenvolvimento através do aumento do nível de vibração em uma ou mais frequências conhecidas. Na diagnose de falhas de rolamentos, isto é equivalente a conhecer as frequências de vibração características de uma possível falha e encontrar aquelas que coincidem com as frequências que sofreram aumento em suas componentes (CUNHA, 2016). Isto implica no desenvolvimento de modelos de falhas de rolamentos para efeito de comparação com os dados que possam ser fornecidos por novas medições. Esta tese tem por objetivo o desenvolvimento desses modelos, que irão facilitar o diagnóstico de defeitos em rolamentos a serem testados. Diferentemente dos demais tipos de defeito, os rolamento não possuem uma frequência característica de defeito única que possa ser calculada através de múltiplos de rotação de eixo. As frequências de falha de rolamentos são assíncronas à frequência de rotação, isto é, não são múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo, uma característica importante a ser considerada durante a análise (CUNHA, 2016). Dado que o rolamento é composto de vários componentes tais como pistas, esferas e gaiola e existe movimento relativo entre eles, as frequências de defeito são calculadas em função da geometria de cada mancal de rolamento. Pode-se citar como exemplo um ponto fixo na pista por onde passarão as esferas. Será necessário identificar a frequência com que as esferas passarão por este ponto, pois caso haja um defeito neste ponto cada esfera que passar irá registrar um impacto no sinal. A análise de frequências é a ferramenta eficiente para a identificação de defeitos em máquinas, especificamente em rolamentos. Esta análise é realizada, basicamente, pelo espectro de frequência, processado em tempo real por meio das Transformadas Rápidas de *Fourier* (FFT). O conhecimento completo do projeto da máquina para calcular e determinar as frequências prováveis que estarão presentes no espectro, e assim, definir a frequência máxima do espectro

(*RANGE*), que irá contê-las é importante para uma análise mais detalhada. Esses valores foram calculados e se encontram na Tabela 3.6.1. No caso dos rolamentos ensaiados nesta tese, o fator gerador de vibrações é a rotação da máquina, como será visto a seguir (e não falhas em elementos específicos do rolamento). Identificadas as frequências onde ocorrem picos de energia, a etapa seguinte é saber se as amplitudes correspondentes são críticas. Nas Figuras 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4 e 4.2.5, são apresentados os espectros de frequência de cada ensaio dos grupos de rolamentos considerados novos, bons, ótimos, desgastados e muito desgastados, respectivamente. A análise das curvas de espectro de frequência do sinal das vibrações do motor, utilizando a FFT como ferramenta de análise revela as frequências características bem como a identificação de possíveis defeitos que existam. Além disso, a análise da densidade espectral de potência indica a magnitude da energia de vibração. A seguir são apresentadas as figuras contendo os gráficos dos espectros de frequência dos rolamentos classificados como novos, ótimos, bons, desgastados e muito desgastados.

Como pode ser visto na Figura 4.2.1, os picos na densidade espectral ocorrem em múltiplos de 29,5 Hz, o que coincide com a frequência natural do motor, como segue:

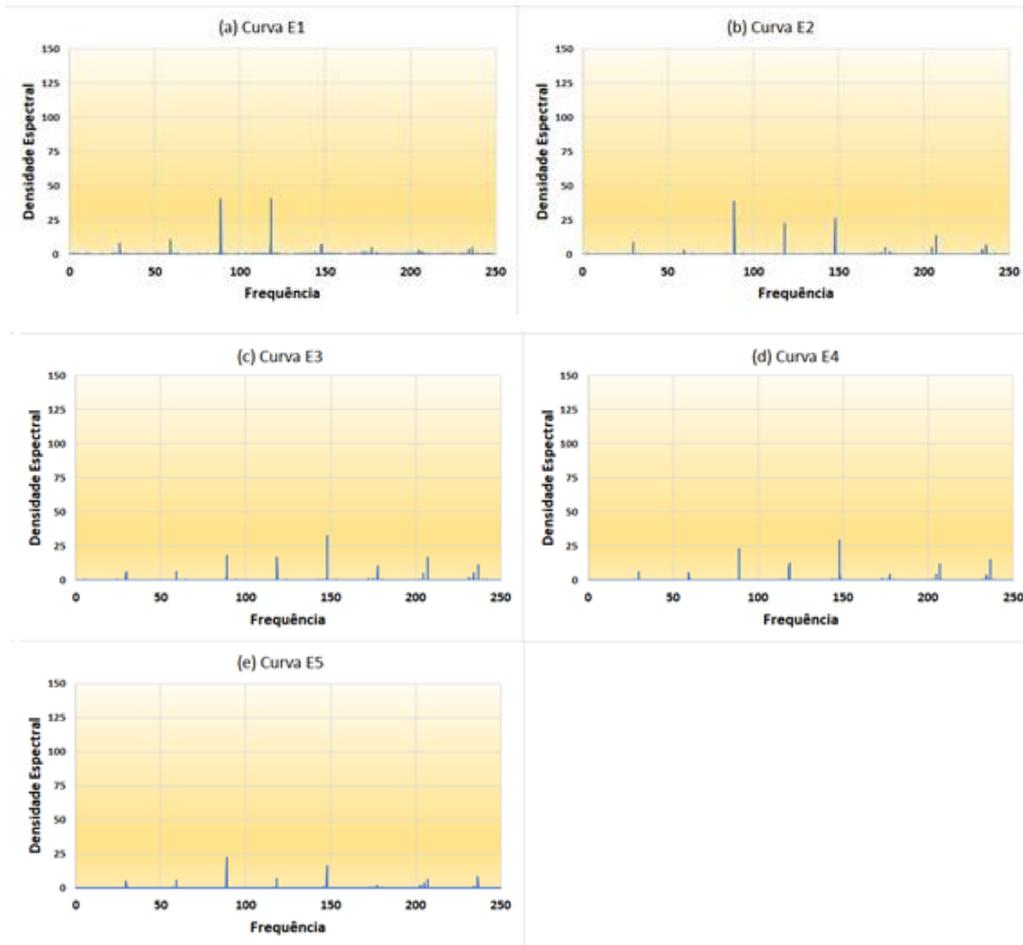
$$1 \text{ Hz} = 60 \text{ rpm}$$

$$X = 1770 \text{ rpm (velocidade média do motor observada nos ensaios)}$$

$$X = 1770/60 = 29,5 \text{ Hz.}$$

Dessa forma, os espectros revelam as frequências naturais do motor, como seria esperado em função da posição do acelerômetro, e não há evidências de defeitos nos elementos do rolamento, que apareceriam nas frequências calculadas na Tabela 3.6.1: 10,2 Hz, 41,6 Hz, 81,3 Hz e 158,7 Hz.

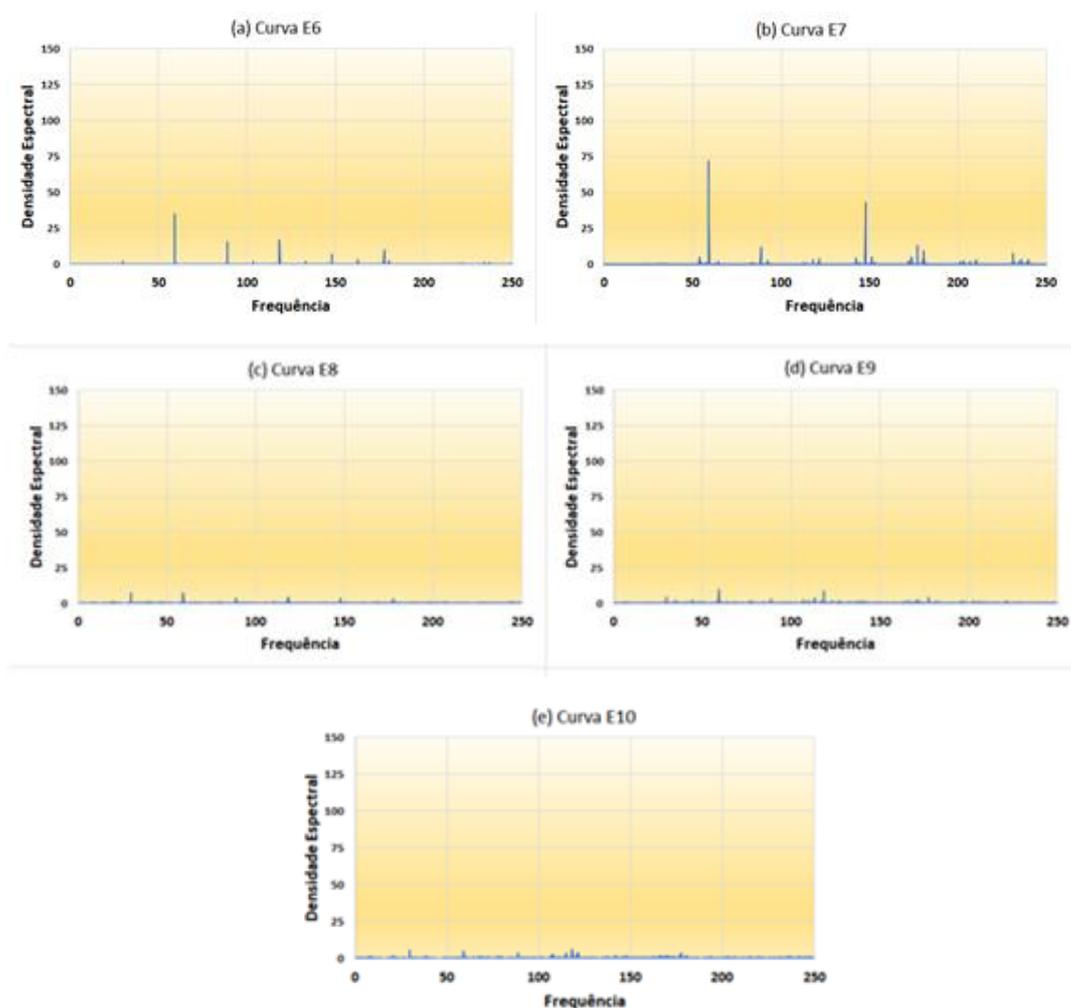
Figura 4.2.1. Espectros de frequência de rolamentos novos: (a) Ensaio E1, (b) Ensaio E2, (c) Ensaio E3, (d) Ensaio E4, (e) Ensaio E5



A análise dos espectros de frequência dos rolamentos novos revela picos baixos e pouca energia fora desses picos. De forma geral, os picos estão concentrados em frequências múltiplas de 29,5 Hz. Os picos em 118 Hz e 147 Hz já podem ser identificados, mas a energia associada a esses picos ainda é reduzida. Fora dos múltiplos de 29,5 Hz, a energia é virtualmente zero. Além disso, entre os dados coletados e apresentados na tabela 4.1.1 pode-se observar que os valores RMS do deslocamento de vibração do motor também são relativamente pequenos, o que significa que não há efeitos que podem indicar a necessidade de manutenção. Os rolamentos novos não apresentaram nenhum tipo de falha ou defeito de fabricação, e nos ensaios verificou-se que eles apresentaram resultados semelhantes para os diversos parâmetros, considerando, ainda que eram procedentes de fabricantes diferentes, como SKF (2) e NSK (3). Os picos, identificados nas frequências múltiplas de 29,5 Hz são consequência

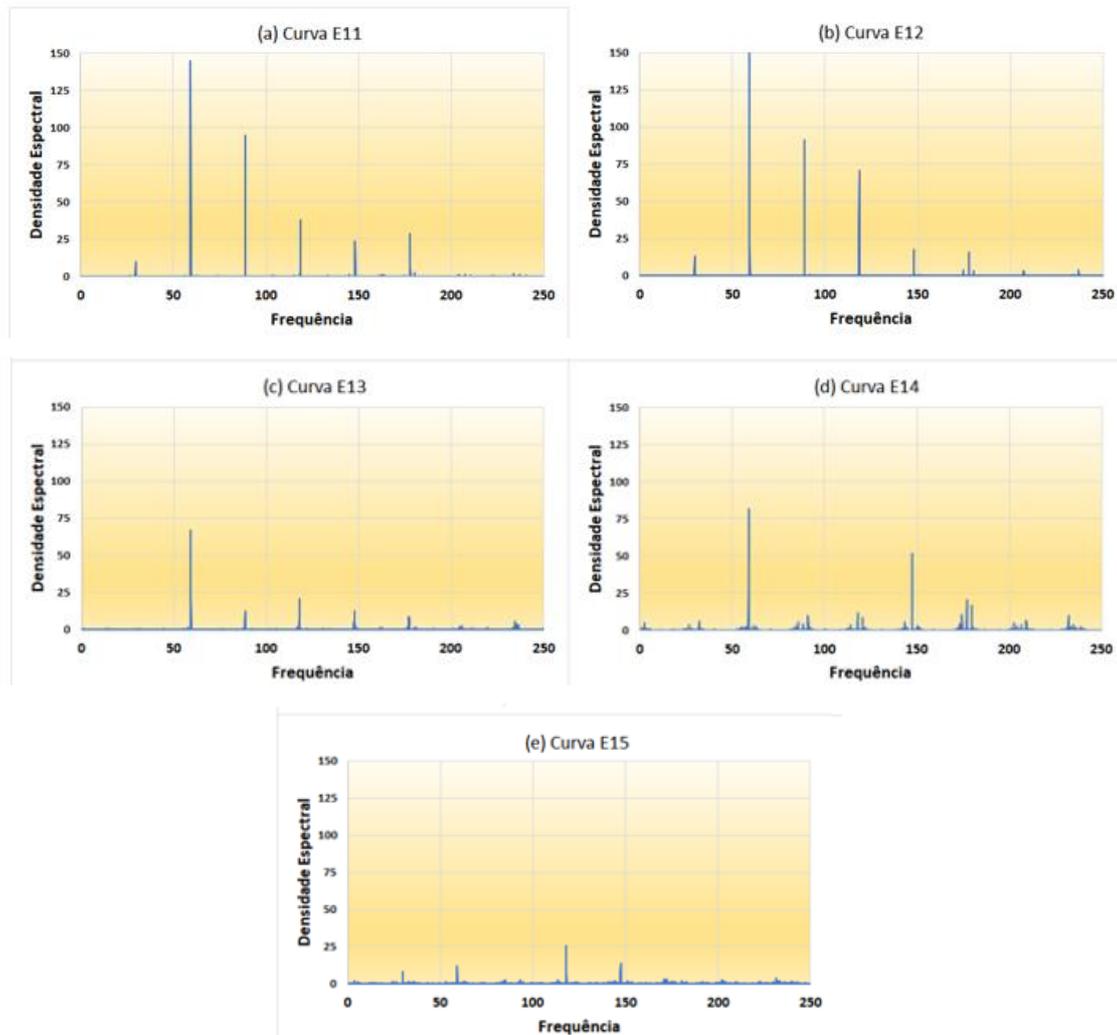
de excitações previstas, que ocorrem em função da rotação fundamental da máquina. Apresentaram valores identificados no espectro com as frequências harmônicas da rotação fundamental da máquina, onde os mancais de apoio dos rotores transferem as rotações da máquina para os rolamentos e para o sistema onde está inserido o rolamento. Ocorre nesse momento vibrações excitadoras que irão do rotor para a carcaça, passando pelo mancal e gerando vibrações, detectadas nos sensores. A próxima figura (Figura 4.2.2) apresenta os gráficos correspondentes à densidade espectral dos rolamentos caracterizados como ótimos.

Figura 4.2.2. Espectros de frequência dos rolamentos ótimos: (a) Ensaio E6, (b) Ensaio E7, (c) Ensaio E8, (d) Ensaio E9, (e) Ensaio E10



A análise dos espectros de frequência dos rolamentos ótimos revela picos baixos e pouca energia fora desses picos, em um comportamento muito próximo dos obtidos entre os rolamentos novos. De forma geral, os picos estão concentrados em frequências múltiplas de 29,5 Hz. Em alguns ensaios, os picos em 118 Hz e 147 Hz já podem ser identificados, mas a energia associada a esses picos ainda é reduzida, caracterizando vibrações de carregamento tais como cargas rotacionais sem impacto, do tipo desbalanceamento e ou desalinhamento. Fatores como acoplamento entre máquinas, fixação do motor em sua base e flutuações na rede elétrica também podem causar frequências identificáveis. Fora dos múltiplos de 29,5 Hz, a energia é virtualmente zero. Os rolamentos classificados como ótimos já foram utilizados em trabalhos industriais e retirados de operação em períodos de manutenção preventiva. Porém, como atestam seus dados, demonstram terem sido subutilizados. Embora não haja um histórico sobre os mesmos, pode-se afirmar que foram retirados de operação prematuramente, pois seus valores de energia apresentados na tabela 4.1.2 são pequenos e seus valores de deslocamento RMS de vibração do motor também indicam desgaste incipiente. As frequências de falha nos elementos do rolamento somente são visualizadas no espectro de vibração se o rolamento apresentar algum defeito, mas elas não aparecem nos espectros da Figura 4.2.2.

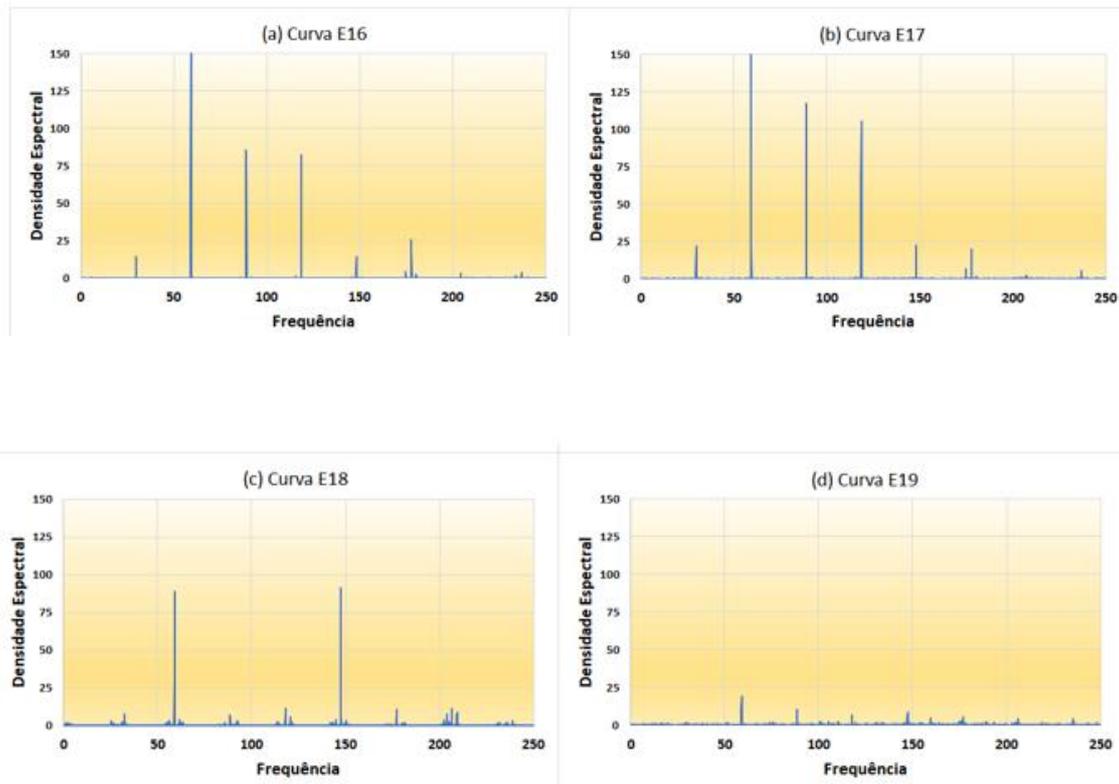
Figura 4.2.3. Espectros de frequência dos rolamentos bons: (a) Ensaio E11, (b) Ensaio E12, (c) Ensaio E13, (d) Ensaio E14, (e) Ensaio E15.



Propositalmente, as figuras desta seção estão todas na mesma escala horizontal e vertical. A análise dos espectros de frequência dos rolamentos bons revela picos com maior valor de energia do que nos rolamentos novos e ótimos. De forma geral, os picos continuam concentrados em frequências múltiplas de 29,5 Hz. Os picos em 118 Hz e 147 Hz são facilmente detectados, apresentando energia maior que nos rolamentos novos e ótimos, como citado na descrição da Tabela 4.1.3. Os sinais que aparecem nos múltiplos de 29,5 Hz representam os primeiros sinais de desgaste, o que produz maior excitação das frequências naturais do motor. As quatro frequências básicas geradas por defeitos nos elementos dos rolamentos (Tabela 3.6.1) são relacionadas com o

comportamento dinâmico de seus principais componentes ou seja: (i) Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da Pista Interna (geralmente indicada por BPF_I do inglês *Ball Pass Frequency Inner Race*), associada a defeitos na pista interna. (ii) Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da Pista Externa (geralmente indicada por BPF_O do inglês *Ball Pass Frequency Outer Race*), associada a defeitos na pista externa. (iii) Frequência de giro dos elementos (geralmente indicada por BSF do inglês *Ball Spin Frequency*), associada a defeitos nos elementos rolantes (rolos ou esferas). (iv) Frequência de giro da gaiola ou do conjunto (trem) de elementos rolantes (geralmente indicada por FTF do inglês *Fundamental Train Frequency*), associada a defeitos na gaiola e a defeitos em alguns dos elementos rolantes (BASTOS, 2010). É importante ressaltar que, ao contrário da maioria das frequências de vibração geradas por componentes mecânicos, essas frequências são verdadeiramente frequências de defeito. Isto é, elas só estarão presentes nos espectros de vibração quando os rolamentos estiverem realmente defeituosos ou, pelo menos, quando seus componentes estiverem sujeitos a tensões e deformações excessivas que poderão induzir uma falha. Os impactos gerados pelo contato das esferas com uma falha em uma pista do rolamento tende a excitar a estrutura do sistema e dessa forma suas frequências de ressonância sofrem um aumento no nível das vibrações. Essa energia vibratória ocorre mesmo na fase inicial de propagação da falha. A Figura 4.1.3 mostra que não há picos de energia relacionados a defeitos nos elementos do rolamento, mas apenas aumento na intensidade de vibração do motor, provocada pelo desgaste dos rolamentos (e não por defeitos específicos). O aumento da energia em picos localizados nas frequências entre 50-150 Hz indica que os rolamentos classificados como bons já apresentam sinais de desgaste. Além disso, os valores RMS do deslocamento de vibração também apresentam níveis que indicam a presença de desgastes nos rolamentos.

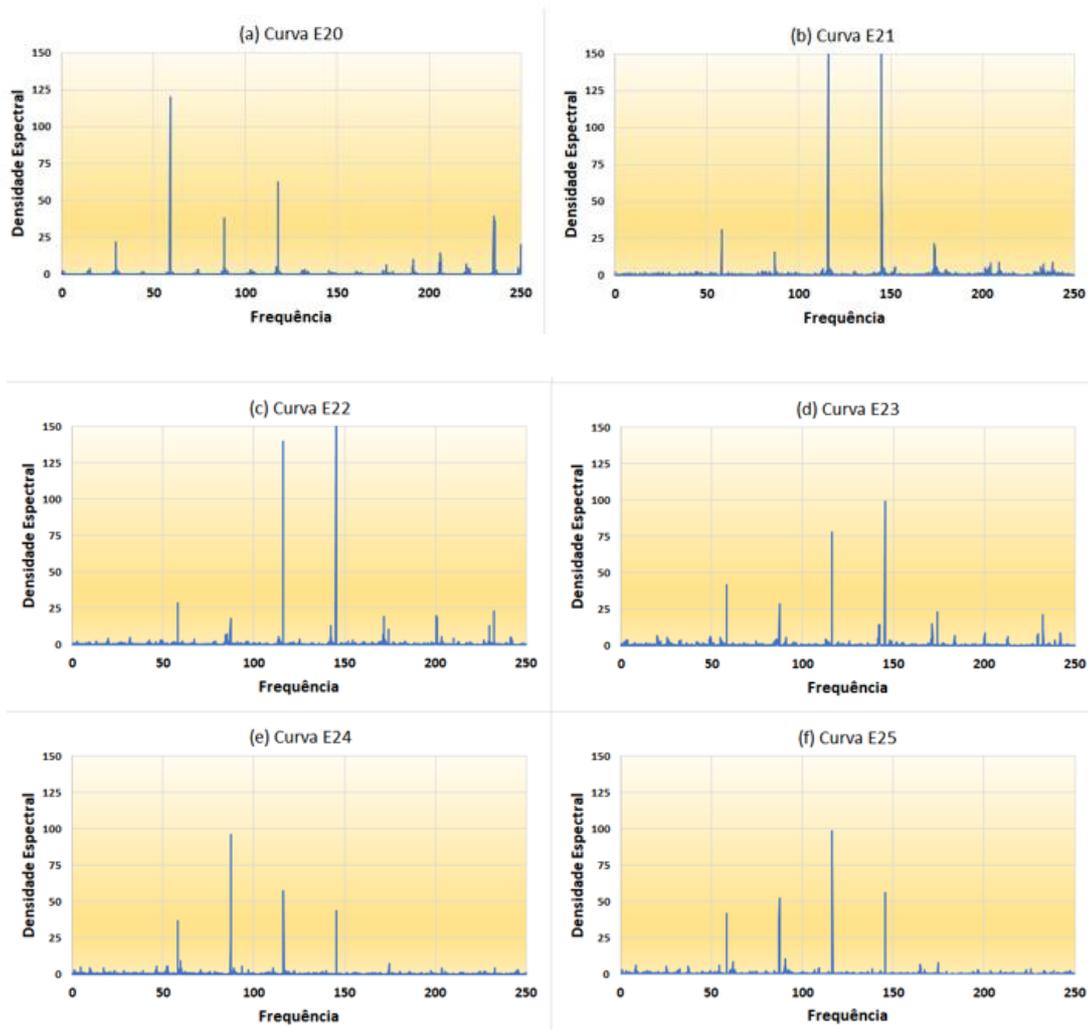
Figura 4.2.4. Espectros de frequência dos rolamentos desgastados: (Ensaio E16, (b) Ensaio E17, (c) Ensaio E18, (d) Ensaio E19.



A análise dos espectros de frequência dos rolamentos desgastados revela picos de alta intensidade especialmente próximos ao intervalo de frequências compreendido entre 50 Hz e 150 Hz abrangendo as frequências de 118 Hz e 147 Hz e alguma energia fora desses picos. As frequências de defeito dos elementos rolantes e da gaiola não aparecem, o que claramente caracteriza o desgaste dos rolamentos e não defeitos específicos em seus elementos. Não há picos visíveis nas frequências de 10,2 Hz, 41,6 Hz, 81,3 Hz e 158,7 Hz. Os picos próximos de 118 Hz e 147 Hz acumulam maior energia e identificam a presença de desgaste nos rolamentos. A expectativa de sobrevida desses rolamentos dependerá da rotação do eixo e da carga do mancal. Fora do intervalo de frequência 50-150 Hz pode-se afirmar que a energia é relativamente reduzida. A presença de picos no espectro de frequência que não são múltiplos exatos da rotação do eixo caracterizaria a existência de problemas no rolamento, uma vez que os defeitos emitem frequências que são assíncronas com a velocidade, mas isso não acontece. Geralmente, os defeitos em rolamentos evoluem com certa lentidão e emitem sinais com bastante antecedência da falha final,

que pode ocorrer por travamento ou ruptura dos componentes. Defeitos típicos que evoluem dessa forma são: riscos nas pistas, roletes ou esferas, "*pitting*", (furos) trincas, corrosão, erosão e contaminação (NSK, 2016). O processo de degradação de um rolamento pode se iniciar na pista externa ou interna, num dos elementos rolantes (rolos ou esferas) ou na gaiola, alastrando-se depois para os demais componentes. Esse processo pode ser dividido em três estágios básicos de evolução até a falha final: inicial, intermediário ou avançado. À medida que os rolamentos são submetidos ao trabalho, ocorrem desgastes em seus componentes, gerando folgas que têm uma grande importância na distribuição de cargas do rolamento. Quando uma superfície com defeito de um elemento do rolamento entra em contato com outra superfície do rolamento, este choque produz um impulso que excita ressonâncias no rolamento e na máquina. Estes impulsos irão ocorrer periodicamente com uma frequência que é determinada, unicamente, pela localização do defeito, sendo ele na pista interna, na pista externa ou no elemento girante (DIAS, 2014). Esta elevação ocorre devido à excitação de frequências naturais características do rolamento ou estrutura, devido à falha no rolamento. Em muitos casos, quando não há dados anteriores ou quando a quantidade de energia do sinal de falha é pequena, há uma certa dificuldade em localizar esta faixa. A medida que o defeito progride, um pequeno aumento na energia sobre as regiões de frequências naturais dos rolamentos poderá ser observada. Também em relação aos valores RMS dos deslocamentos pode-se notar que estes apresentam valores elevados em relação às medidas obtidas nos rolamentos novos, ótimos e bons, indicando a presença de desgastes acentuados neste conjunto de rolamentos.

Figura 4.2.5. Espectros de frequência dos rolamentos muito desgastados: (a) Ensaio E20, (b) Ensaio E21, (c) Ensaio E22, (d) Ensaio E23, (e) Ensaio E24, (f) Ensaio E25



A análise dos espectros de frequência dos rolamentos muito desgastados revela picos muito elevados e um volume maior de energia fora desses picos (comparado aos estados anteriores). Assim como nos rolamentos desgastados, os picos estão concentrados em frequências múltiplas de 29,5 Hz. Os picos em 118 Hz e 147 Hz, em geral, dominam o espectro, pois a energia associada a esses picos é elevada. Nestes pontos, conforme já mostrado na Figura 4.1.5 o gasto de energia é considerável. O maior acúmulo de energia está presente na faixa de 50-150 Hz. Fora desse intervalo, a energia é relativamente menor, mas segue crescendo, mostrando a propagação do desgaste e talvez de defeitos localizados. Como o rolamento mostra um elevado desgaste, pode-se afirmar que as folgas internas tendem a aumentar, acelerando ainda mais a

deterioração dos componentes do rolamento. Isto permitirá a ocorrência de mais impactos dentro do rolamento e certamente irá provocar defeitos em elementos específicos do rolamento (esferas, pista, gaiola). O aumento dos impactos acarretará em uma elevação nos valores de energia dos espectros, incluindo picos em frequências diferentes dos múltiplos de 29,5 Hz. Nas Figuras apresentadas acima, os espectros de potência apresentam um comportamento coerente com os valores obtidos nos ensaios e as avaliações que definem seu estado físico. Os picos são claros. As maiores diferenças entre os espectros de rolamentos novos e desgastados ocorrem nos picos que estão na faixa entre 100 e 150 Hz, mais especificamente, no pico em torno de 118 Hz e no pico próximo de 147 Hz. Pode-se observar que os rolamentos classificados como desgastado e muito desgastado são os que provocam valores elevados de energia nos picos de 118 Hz e 147 Hz. Vale observar que a energia dos espectros está associada ao valor de deslocamento RMS do sinal de vibração do motor, que indica em média quanto que a massa está desviada da posição intermediária. Quanto maior esse valor de deslocamento RMS, maior a intensidade da vibração e maior a energia do espectro. Observa-se também que quanto mais evidente a presença de desgaste, maior a amplitude de vibração. Assim, juntamente com a energia, o deslocamento RMS será usado para identificar desgaste em rolamentos, conforme discutido na próxima seção.

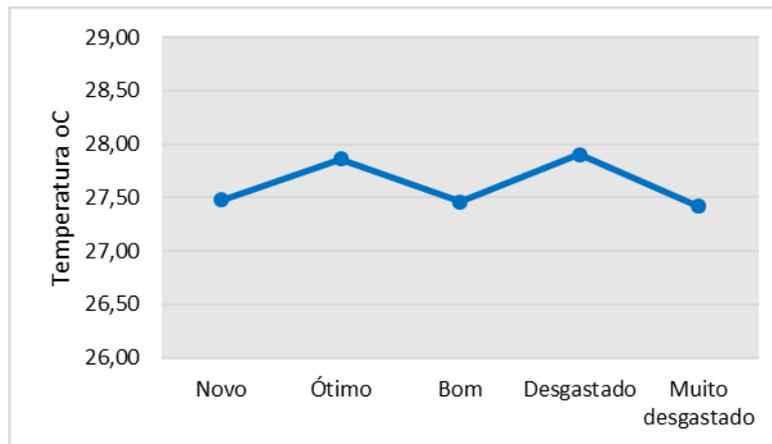
4.3. ANÁLISE DOS INDICADORES MAIS PROMISSORES PARA IDENTIFICAÇÃO DE DESGASTE PREMATURO

4.3.1 Análise dos Resultados

É possível avaliar como ocorreu a evolução dos principais indicadores dos rolamentos através das análises gráficas apresentadas nesta seção. É importante considerar que nas figuras desta seção estão representados rolamentos com diversas características de uso, e variam desde rolamentos novos a rolamentos muito desgastados. Consideram-se como análises relevantes os dados observados nas variáveis que representam a evolução da temperatura, velocidade, nível de pressão sonora e energia nas frequências de 0-50 Hz, 50-100

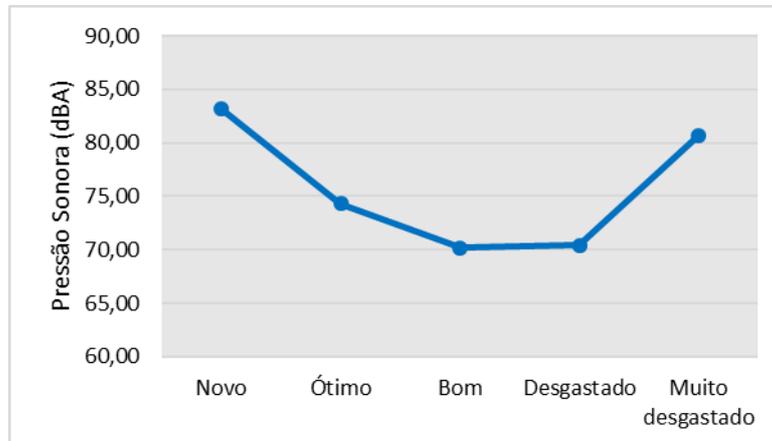
Hz, 100-150 Hz, 150-200 Hz e energia total (0 a 250 Hz), além da energia dissipada nos picos de frequência de 118 e 147Hz e o valor RMS do deslocamento de vibração. Os gráficos com 4.3.1.1 a 4.3.1.11 demonstram a evolução dessas variáveis. Os gráficos abaixo foram elaborados pelo autor.

Figura 4.3.1.1. Avaliação do comportamento da temperatura dos rolamentos



O gráfico apresentado na Figura 4.3.1.1 representa o valor médio de temperatura apresentada pelos rolamentos durante os ensaios, e foi mensurada por um termômetro modelo Pt100 compatível com Arduino, instalado próximo ao rolamento, no lado de saída do eixo do motor. A operação do rolamento em temperaturas acima das especificações do fabricante gera falhas prematuras, por isso nos ensaios a temperatura de operação foi monitorada. Observa-se que a temperatura variou entre 27,5°C para rolamentos novos e 28°C para rolamentos desgastados. Deve-se considerar que, de acordo com o fabricante (NSK), a temperatura operacional permitida para os rolamentos de esferas é estabilizada entre -30°C e 200°C. Como os rolamentos ensaiados não apresentaram variações acentuadas em seus valores mensurados, pode-se afirmar que a instalação da bancada de ensaios não apresentou problemas como instalação imprópria ou desalinhamento no eixo de acoplamento. Além disso, não se observa crescimento de temperatura entre as classes (novo a muito desgastado), o que corrobora a afirmação de que a temperatura não é um parâmetro adequado para avaliar o desgaste do rolamento.

Figura 4.3.1.2. Avaliação do comportamento do nível de pressão sonora do conjunto

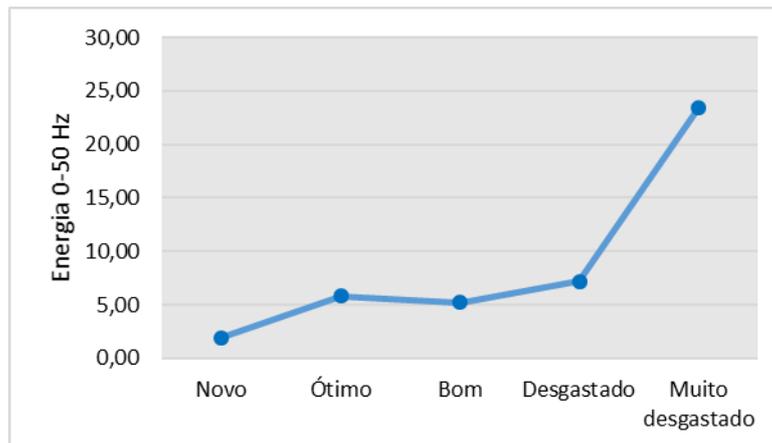


Os níveis de pressão sonora (NPS) estão diretamente ligados às vibrações, ou seja, altos níveis de vibração induzem altos níveis de pressão sonora. A Figura 4.3.1.2 apresenta os níveis de pressão sonora obtidos nos ensaios. Para mensuração do nível do nível de pressão sonora, foi usado um decibelímetro com microfone. Para a análise do comportamento do nível de pressão sonora deve-se considerar o que estabelece a NR 15 que fixa como limite de tolerância para nível de pressão sonora contínuo ou intermitente o valor de 85 dBA. Um nível de pressão sonora excessivo pode ocorrer quando houver uma coincidência entre frequência de excitação e frequência natural (ressonância). Estas vibrações podem produzir desgaste e fadiga nos rolamentos. Além disso, altos níveis de vibração também podem induzir altos níveis de pressão sonora. Pode-se observar na figura 4.3.1.2 que os rolamentos ensaiados não ultrapassaram os níveis de nível de pressão sonora estabelecidos em Norma, apresentando uma variação entre 70 dBA para rolamentos bons e desgastados e 85 dBA para rolamentos novos. O maior valor de nível de pressão sonora apresentado ocorreu nos ensaios dos rolamentos novos. Isso pode ter ocorrido em função de pequeno desalinhamento entre motores, acoplamento com problemas de fixação inter-eixos ou problemas na fixação dos motores em suas bases. Um ensaio de um motor com rolamento de esferas novo ao ser testado antes de entrar em operação nunca deve ser iniciado descarregado e depois acelerado

até altas velocidades, pois existe grande risco de que os corpos rolantes deslizem e danifiquem as pistas ou que a gaiola seja submetida a esforços não permitidos, causando nível de pressão sonora excessivos (CUNHA, 2016). Esse desconhecimento operacional pode ter afetado o rolamento novo e, por isso, o gráfico apresenta um valor elevado para o nível de pressão sonora do rolamento novo. Embora o nível de pressão sonora emitido pelos rolamentos esteja dentro de níveis aceitáveis, ele se manifesta em todos os ensaios. A presença do nível de pressão sonora é função da excentricidade das partes rotativas, que, em um projeto de construção de um motor, pode ter um limite de até 10%. A excentricidade, que pode ser do tipo estática, dinâmica e mista, dá origem a uma força magnética desequilibrada, originando vibrações e pressão sonora acústico. Por excentricidade, entende-se qual o distanciamento das partes girantes em relação ao centro do eixo do motor. A excentricidade do tipo estática ocorre quando o centro de rotação é concêntrico com o eixo do rotor, mas não com o centro geométrico do estator, ao passo que a excentricidade do tipo dinâmica ocorre quando o centro de rotação não é coincidente com o centro do rotor. A excentricidade mista ocorre quando se verifica os dois tipos de excentricidade anteriormente mencionados (SILVESTRE, 2012). Deve-se considerar também que todos os motores elétricos produzem nível de pressão sonora e a energia sonora aumenta conforme o aumento da potência do motor. Quando problemas dessa natureza ocorrem, é importante verificar qual o problema causador do excesso de nível de pressão sonora e/ou vibração e solucionar o problema antes do motor entrar em operação. Uma maneira simples de identificar se uma vibração ou nível de pressão sonora em uma máquina elétrica girante é de origem eletromagnética ou mecânica, é através do desligamento da máquina (ENDO, 2008). Quando a máquina opera sem carga, o rotor continuará a girar, mesmo após o desligamento da máquina, e levará um certo tempo até que desacelere totalmente. Isto ocorrerá principalmente se o rotor possuir uma grande inércia. Assim, em geral, se as vibrações ao desligar a máquina continuarem acontecendo, diminuindo lentamente de amplitude à medida que o rotor desacelera, é sinal que essas vibrações têm uma causa mecânica. Caso contrário, se as vibrações

ou nível de pressão sonora desaparecerem imediatamente ao desligar a máquina, é sinal que as vibrações são de origem magnética (ENDO, 2008). Analisando os dados contidos no gráfico da Figura 4.2.2 é possível verificar que em nenhum dos ensaios realizados ocorreu um nível de pressão sonora que ultrapassasse os valores máximos de nível de pressão sonora estabelecidos em Norma. Além disso, não houve um crescimento do nível de pressão sonora acompanhando o desgaste (a não ser na transição de desgastado para muito desgastado), o que corrobora a afirmação de que o nível de pressão sonora não é um parâmetro indicado para detectar desgaste prematuro em rolamentos.

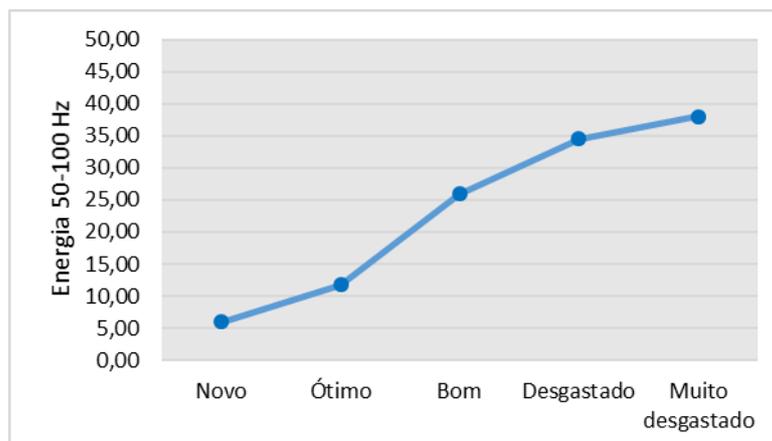
Figura 4.3.1.3. Avaliação do comportamento da energia de vibração do motor na frequência de 0 a 50Hz



O gráfico da Figura 4.3.1.3 demonstra como evolui a energia de vibração do motor na faixa de 0 a 50 Hz em função do desgaste nos rolamentos. Observa-se que os rolamentos novos apresentam energia de vibração muito baixa, como é de se esperar. Evoluindo na análise, observa-se que, na faixa de 0 a 50 Hz, a energia de vibração em montagens com rolamentos classificados como ótimos e bons não sofre alteração significativa, apresentando praticamente o mesmo nível de desgaste (5,0). Embora pareçam contraditórios esses resultados, deve-se observar que os rolamentos classificados como bons não foram substituídos por apresentarem algum tipo de desgaste, mas sim porque ocorreram etapas de manutenção preventiva nas empresas. A aplicação desta

metodologia indica que não haveria necessidade de substituição desses rolamentos, gerando economia ao sistema e minimizando esforços de atividades de manutenção. Os rolamentos usados utilizados nos ensaios infelizmente não possuíam histórico de atividades, como número de horas efetivamente trabalhadas, regime de trabalho e local de instalação, dentre outros. O gráfico, entretanto, permite uma avaliação do estado do rolamento em função da energia de vibração do motor na frequência compreendida entre 0-50Hz. Nessa faixa de frequência os rolamentos novos, ótimos, bons e desgastados apresentam comportamento similar em termos de energia. O acréscimo de energia dispendida aparece apenas nos rolamentos muito desgastados. Isso indica que esta faixa de energia não é a mais apropriada para detectar desgaste prematuro.

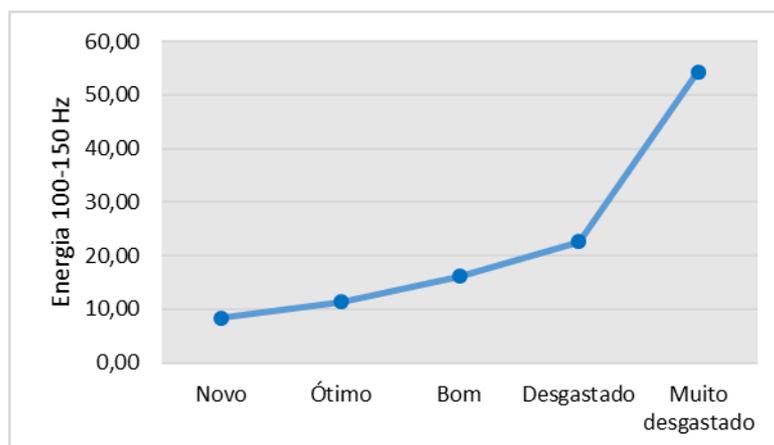
Figura 4.3.1.4. Avaliação do comportamento da energia da energia de vibração do motor nas frequências de 50 a 100Hz



A Figura 4.3.1.4 apresenta a evolução dos dados coletados de Energia de vibração do motor na faixa de 50 – 100 Hz ao passar pelos diferentes estados dos rolamentos de novo para ótimo, bom, desgastado e muito desgastado. Percebe-se que essa evolução apresenta uma tendência crescente, onde quanto mais longe do estado novo está o rolamento, maior é a energia de vibração na faixa de 50 – 100 Hz. Nota-se também que o salto de energia de vibração ao passar do rolamento ótimo para o rolamento bom apresenta um aumento considerável (150%). Percebe-se que as diferenças entre os rolamentos ótimos e

bons começam a ser nitidamente observáveis, em oposição ao que ocorre quando a frequência é menor como pode ser observado no gráfico anterior onde esta diferença ainda é imperceptível. Quando se observa a diferença de energia na faixa entre 50 e 100 Hz entre os rolamentos bons e desgastados percebe-se nitidamente a diferença de comportamento e, dessa forma, a caracterização do estado do rolamento fica bem definida, gerando maior segurança na caracterização e no diagnóstico do estado do rolamento. Os rolamentos caracterizados como muito desgastados provocam, como no caso anterior, um acentuado dispendio de energia, demonstrando assim, que sua substituição deve ser providenciada para que não ocorram danos ao equipamento e ao sistema operacional. A diferença entre os rolamentos caracterizados como desgastados e muito desgastados não é acentuada, mas permite diferenciar os rolamentos entre si. Os valores obtidos para os rolamentos desgastados já indicam a necessidade de substituição. A diferença entre os valores de energia dos rolamentos bons e dos rolamentos muito desgastados é acentuada, caracterizando o desgaste dos rolamentos. Verifica-se, assim, a eficiência de análise e diagnóstico que a metodologia oferece.

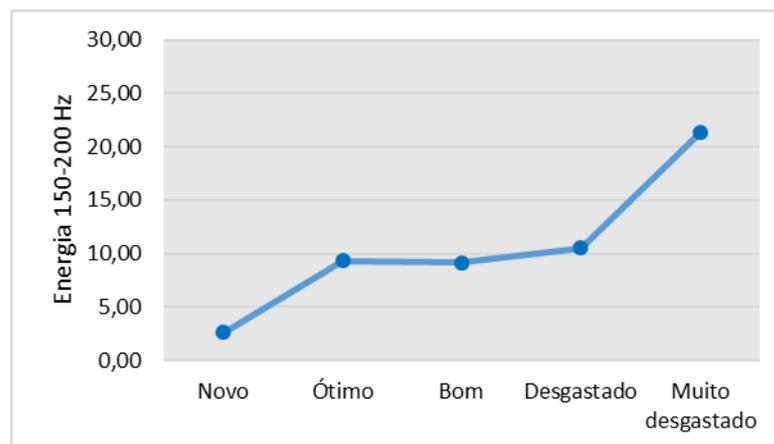
Figura 4.3.1.5. Avaliação do comportamento da energia da energia de vibração do motor nas frequências de 100 a 150 Hz



Avaliando-se os resultados obtidos nos ensaios nas frequências entre 100-150Hz observa-se nitidamente as diferenças existentes entre os estados que caracterizam os rolamentos, tal que não existem valores que caracterizem

comportamentos similares, ou seja, cada rolamento apresenta um estado característico próprio. Observa-se que os valores relativos aos gastos de energia são crescentes e diferenciados entre si. Nesta faixa de 100 a 150 Hz, os rolamentos novos, ótimos e bons apresentam crescimento aproximadamente linear dos valores de energia. É seguro diagnosticar que os rolamentos classificados como desgastados devem ser substituídos, pois a seguir ocorre um aumento acentuado na energia de vibração do motor. A energia concentrada nas frequências de 50 a 100 Hz e 100 a 150 Hz são indicadores apropriados para o monitoramento do desgaste.

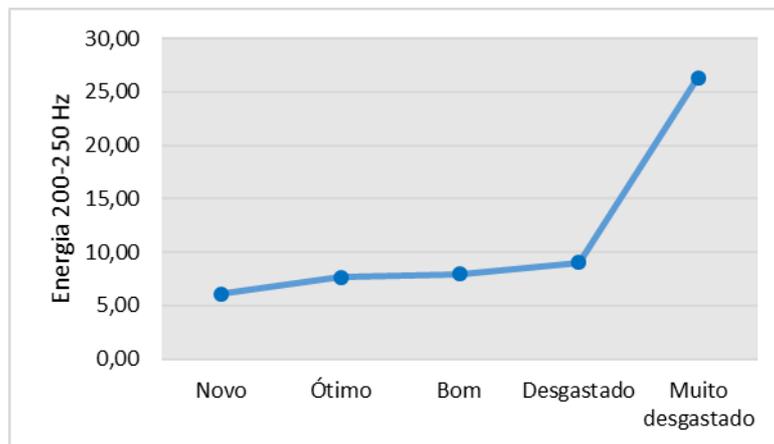
Figura 4.3.1.6. Avaliação do comportamento da energia da energia de vibração do motor nas frequências de 150 a 200Hz



Apresenta-se na Figura 4.31.6 o comportamento da energia de vibração na faixa de frequência entre 150-200 Hz. Em relação ao comportamento desses rolamentos quando em frequências menores, como entre 100-150Hz, observa-se pouca alteração, o que indica que nas frequências entre 100-200Hz os dados coletados não se alteram substancialmente, especialmente entre os rolamentos caracterizados como ótimos, bons e desgastados. Em relação aos rolamentos muito desgastados, ao analisar a energia na faixa de frequência de 150 a 200 Hz, observa-se um crescimento substancial comparado as demais classificações. Conclui-se que é relativamente fácil detectar a mudança de desgastado para muito desgastado, pois ela aparece em todas as faixas de frequência. A

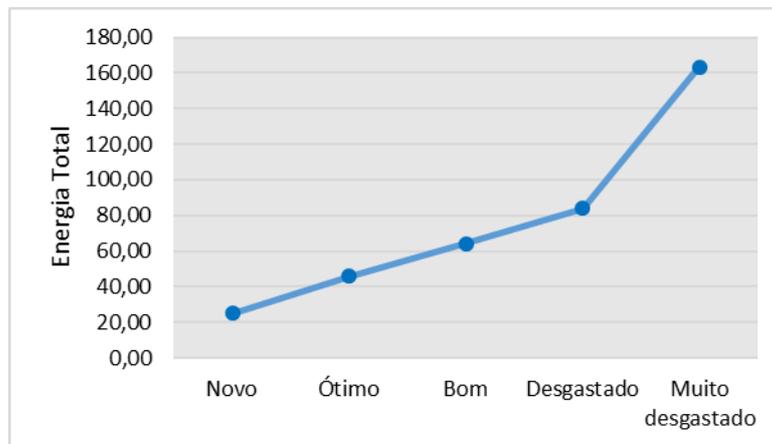
mudança de bom para desgastado, por sua vez, é mais difícil de ser detectada, aparecendo com maior propriedade nas faixas de 50 a 100 Hz e de 100 a 150 Hz.

Figura 4.3.1.7. Avaliação do comportamento da energia de vibração do motor nas frequências entre 200 a 250 Hz



O gráfico da Figura 4.3.1.7 mostra o comportamento dos rolamentos na frequência de 200-250 Hz. Embora os valores que representam a energia sejam crescentes, novamente, as maiores diferenças aparecem apenas na transição de desgastado para muito desgastado. A diferença de energia entre os rolamentos novos, ótimos, bons e desgastados é relativamente pequena. Pode-se observar que o valor mais acentuado de energia de vibração do motor, associado aos rolamentos muito desgastados, está caracterizado em todas as faixas de frequência.

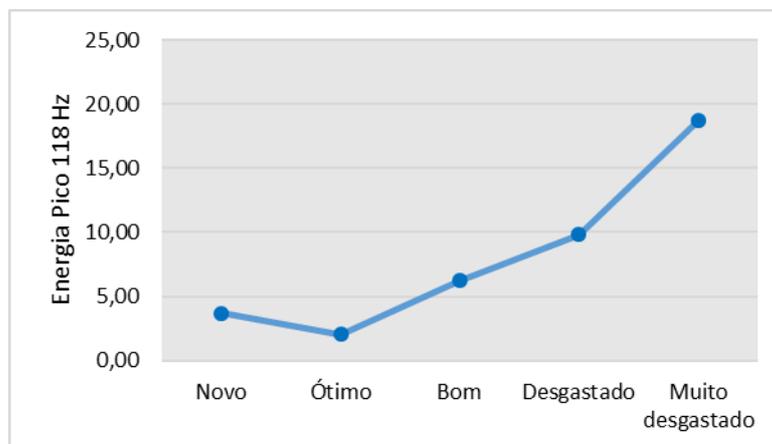
Figura 4.3.1.8. Avaliação do comportamento da energia total de vibração do motor em função do estado dos rolamentos



A figura 4.3.1.8 apresenta os valores médios de energia de vibração do motor na faixa de 0 a 250 Hz provocados pelas diferentes classes de rolamentos. Observa-se que os valores mensurados são crescentes e apresentam valores que indicam os diversos estágios de desgaste. A diferença de valores obtidos entre rolamentos novos, ótimos e bons apresenta um crescimento uniforme e praticamente linear. Como a avaliação da energia total envolve todas as faixas de frequência (entre 0 e 250 Hz, intervalo de interesse), os valores obtidos apresentam valores maiores do que nas avaliações parciais. O valor obtido para a energia de vibração do motor associada a rolamentos novos (em torno de 20,0) indica que ainda não ocorreu desgaste no rolamento, mas que ele apresenta alguma vibração em função das excitações das frequências naturais dos mancais ou da estrutura, da própria instalação do rolamento no eixo do motor e da característica interna do motor, bem como vibrações que podem ocorrer na fixação do motor em sua base ou no tipo de acoplamento entre motores. Os valores obtidos para os rolamentos caracterizados como ótimos já indicam maior energia de vibração do motor (em torno de 40,0), praticamente o dobro do que provocaram os rolamentos novos. Esses valores indicam que pequenos desgastes começam a ser identificadas nos elementos rolantes. Além disso, as vibrações devido às excentricidades dos rolamentos em relação à sua fixação no eixo, vibração devido à fixação do motor na base, possíveis folgas nos acoplamentos e variações de energia no sistema eletromagnético do motor podem

produzir vibrações no motor. Em relação aos valores de energia referentes aos rolamentos classificados como bons, estes estão em torno de 60,0, indicando um aumento crescente e linear em relação aos rolamentos novos e ótimos. Percebe-se a partir deste ponto que a análise das vibrações do motor ao longo de todo o ensaio foi capaz de captar com nitidez os possíveis desgastes que se manifestam nos rolamentos. Para os rolamentos classificados como bons, sem histórico de utilização e substituição, observa-se que estes provocam energia de vibração 50% superiores aos rolamentos classificados como ótimos e 50% abaixo dos rolamentos classificados como desgastados, indicando que estes rolamentos já apresentam desgastes, mas ainda podem ser utilizados. Esses desgastes podem ser causados por problemas já citados e folgas internas causadas pela deterioração dos componentes dos rolamentos. Estes rolamentos podem continuar ainda em operação, mas o monitoramento deve ser intensificado.

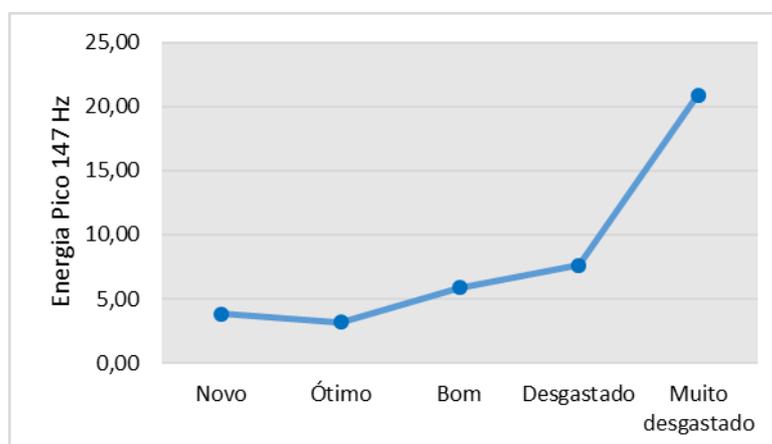
Figura 4.3.1.9 Energia de vibração do motor associada ao pico na frequência de 118 Hz



O gráfico da figura 4.3.1.9 apresenta os valores de energia de vibração do motor associados ao pico na frequência de 118Hz (área sob o espectro na faixa de 118 Hz +/- 3 Hz). Para os rolamentos novos, o nível de energia é muito pequeno. Como observado em gráficos anteriores, em nenhuma faixa de frequência os rolamentos novos provocam valores elevados de energia. Os rolamentos classificados como ótimos também apresentam níveis de energia muito

pequeno, menores inclusive do que ocorre nos rolamentos novos. Pode-se afirmar que não apresentam desgastes perceptíveis (associado a essa frequência) e que podem inclusive apresentar uma acomodação no sistema que ainda não ocorreu nos rolamentos novos. Comparando os valores obtidos nos ensaios, obtém-se uma média de 2,04 para os rolamentos ótimos e 3,66 para os rolamentos novos. Verificando os valores médios de nível de pressão sonora observa-se que os rolamentos classificados como ótimos estavam relacionados a um valor médio de 74,3 dBA e os rolamentos novos a um valor de 83,2 dBA, o que também pode caracterizar alguma acomodação do sistema. Embora esses resultados não afetem diretamente a classificação e a capacidade de trabalho dos rolamentos, a diferença de classificação ocorreu porque os rolamentos novos não haviam sido utilizados até então, mas a falta de histórico não permite que considerações como característica construtiva, uso pouco frequente dos rolamentos classificados como ótimos e outros fatores importantes, como instalação e regime de trabalho sejam identificados como causadores desses resultados. No gráfico apresentado na figura 4.3.9, pode-se observar que ocorre um crescimento linear entre a energia observada em rolamentos ótimos, bons, desgastado e muito desgastado. Logo a energia associada ao pico de 118 Hz também apresenta-se como um bom indicador para indicar a ocorrência de desgastes nessa classe de rolamentos.

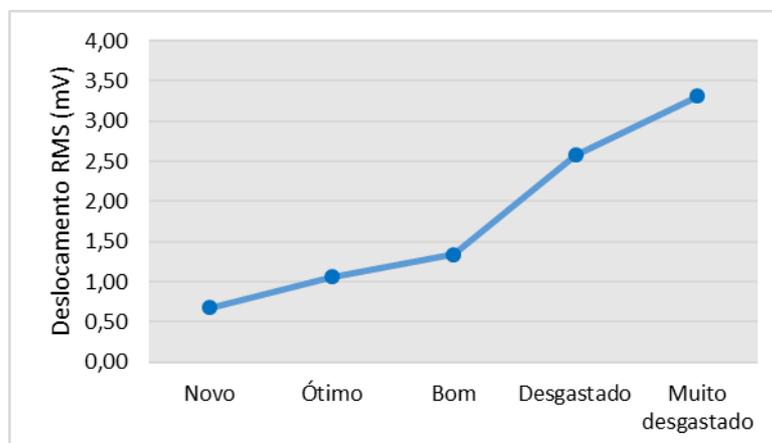
Figura 4.3.1.10 Energia associada ao pico na frequência de 147Hz



O gráfico da figura 4.3.1.10 apresenta os valores de energia associados ao pico na frequência de 147Hz. Os rolamentos denominados como novos,

ótimo e bons estão associados a níveis de energia de vibração do motor relativamente pequenos. Na verdade, como observado em gráficos anteriores, em nenhuma frequência eles apresentaram valores elevados. Os rolamentos classificados como ótimos apresentam valores de energia associados a essa frequência muito pequenos, menores inclusive do que ocorre nos rolamentos novos. Pode-se afirmar que não apresentam desgastes que excitem essa frequência, e que pode estar ocorrendo uma acomodação no sistema que ainda não acontece nos rolamentos novos. Este comportamento também foi detectado na análise dos espectros de frequência dos rolamentos ótimos que também demonstram picos baixos de gasto de energia nesta frequência. Comparando os valores obtidos nos ensaios e considerando os pontos de pico, verifica-se que na frequência de 147 Hz, em média, a energia é maior que na frequência de 118 Hz em 54% e os valores RMS de deslocamento apresentam, na frequência de 147 Hz, um aumento de 58%, indicando que, nessa faixa de frequência, os valores de energia ficam mais aparentes e fáceis de detectar. No gráfico apresentado na figura 4.3.10, no que tange aos valores de energia, pode-se observar que ocorre um crescimento linear associado aos rolamentos classificados como bons, desgastados e muito desgastados. Fica claro que os critérios de análise e substituição dos rolamentos, utilizados como propostos nesta metodologia, facilitam o atendimento dos critérios de segurança e confiabilidade necessários às atividades de manutenção.

Figura 4.3.1.11 Valores médios de deslocamento RMS (em mV) para cada classe de rolamentos



O gráfico da figura 4.3.1.11 indica valores crescentes de deslocamento RMS. Deve-se observar que os valores RMS de deslocamento são relevantes na análise de falhas de rolamentos, porque estão diretamente relacionados à energia dispendida no funcionamento do sistema e, portanto, à capacidade destrutiva causada pela vibração. Todas as máquinas em funcionamento produzem vibrações que, aos poucos, levam-nas a um processo de deteriorização. Essa deteriorização é caracterizada por uma modificação da distribuição de energia vibratória pelo conjunto dos elementos que constituem a máquina. Observando a evolução do nível de tais vibrações, é possível obter informações sobre o estado da máquina. O gráfico demonstra que o aumento do valor RMS do deslocamento caracteriza a intensidade do desgaste e demonstra como o desgaste diferencia os rolamentos entre si. Observa-se que os valores relacionados aos rolamentos novos, ótimos e bons não apresentam muita variação entre si, mas são crescentes. A diferença é acentuada na transição dos rolamentos classificados como bons e rolamentos classificados como desgastados, demonstrando como o desgaste afeta o valor RMS do deslocamento e a energia contida no sinal vibratório. Os rolamentos classificados como muito desgastados, quando comparados com os rolamentos desgastados, estão associados a uma elevação ainda maior dos valores de deslocamento RMS, confirmando dessa forma o desgaste acentuado e a necessidade de substituição do rolamento. A Figura 4.1.5 apresenta os espectros de frequência das curvas dos rolamentos muito desgastados e verifica-se que ocorreram valores muito elevados (média de 3,30). Verifica-se também que a energia associada ao pico de 118 Hz foi de 18,6 e na frequência de 147 Hz apresentou valores médios de 29,9. Todos esses valores são muito mais elevados que aqueles relacionados aos rolamentos em boas condições, indicando a presença de desgaste e a necessidade de substituição dos rolamentos.

Esses desgastes normalmente estão presentes no anel externo, anel interno, gaiola e nos corpos rolantes. Dessa forma, a análise das vibrações mecânicas demonstra ser um método assertivo na detecção prematura de desgaste de operação em virtude de problemas como falta de balanceamento das

partes rotativas, desalinhamento de acoplamentos, rolamentos, excentricidades, ressonância, folgas dentre outros, sendo particularmente útil na monitoração de operação mecânica de máquinas rotativas (ventiladores, compressores, bombas, turbinas, etc.) e na detecção e reconhecimento da deterioração de rolamentos. Este método pode aumentar a confiabilidade na operação de instalações, sinalizando a necessidade de interrupção de uma máquina em tempo hábil para substituição de peças desgastadas. Através da análise dos sinais pode-se avaliar a condição de funcionamento dos rolamentos. A aplicação desta metodologia independe de grandes investimentos iniciais em dispositivos e equipamentos sofisticados de análise. Os dispositivos utilizados são de baixo custo e fácil implementação. Um aspecto importante, contudo, é que a coleta e o tratamento de dados seja confiável e segura. Imprescindível lembrar que os sistemas de aquisição e processamento de dados devem ser robustos para suportar os rigores do trabalho a ser executado, pois o ambiente industrial tem características agressivas em termos de umidade, sujeira, vibração e impactos. A utilização da transformada Rápida de *Fourier*, FFT, facilita a análise e interpretação dos dados mensurados, pois processa a informação digital e constrói o espectro de frequências que revela os picos fundamentais e harmônicos relacionados ao desgaste ou defeitos específicos. Percebe-se que a temperatura média e o nível de pressão sonora não apresentam diferenças características entre as classes. Por outro lado, observou-se que os rolamentos novos, ótimos e bons estão relacionados a valores de energia total e de deslocamento RMS menores do que os rolamentos desgastados e muito desgastados, indicando que essas variáveis fornecem valores que podem distinguir as classes dos rolamentos.

Para explorar melhor esse aspecto, inicialmente, utilizando todas as variáveis medidas, foi criado um macroindicador de desgaste, obtido através da combinação de todas as variáveis medidas, apresentado na tabela 4.3.1. Para isso, as variáveis individuais (temperatura, nível de pressão sonora, valores de energias e deslocamento RMS) foram padronizadas para a escala 0 a 1 e somadas. Os menores valores dessa soma (menores temperaturas, nível de pressão sonora, energia de vibração e amplitude de vibração) constituíam um indicador de menores desgastes e vice-versa. A seguir, foi analisada a correlação

das variáveis individuais com esse macro indicador. Esse procedimento comprovou que os dados de temperatura e nível de pressão sonora não são relevantes para avaliar o estado dos rolamentos, pois a correlação dessas variáveis com o macro indicador estabelecido é baixo ($r = 0,10$ e $r = 0,17$, respectivamente), corroborando com a análise feita anteriormente que mostra que não há variação importante nos valores dessas variáveis entre as classes. Já a energia na faixa de 100 – 150Hz, energia total e deslocamento RMS guardam forte correlação com o macro indicador, constituindo bons indicadores para avaliar o estado dos rolamentos ($r = 0.95$, $r = 0.98$ e $r = 0.84$, respectivamente). Mais adiante, essas variáveis serão usadas para estabelecer os padrões de referência para identificar o estado dos rolamentos.

Tabela 4.3.1. Correlação das variáveis analisadas com o macroindicador de desgaste.

Variáveis	Correlação (r)
Temperatura média (°C)	0,10
Nível de pressão sonora	0,17
Energia 0-50 hz	0,84
Energia 50-100 hz	0,64
Energia 100-150 hz	0,95
Energia 150-200 hz	0,85
Energia 200-250 hz	0,85
Energia total hz	0,98
Energia no pico de 118 hz	0,86
Energia no pico de 147 hz	0,83
Deslocamento RMS	0,84

4.4. CRITÉRIOS PARA IDENTIFICAR OS ESTADOS DOS ROLAMENTOS

Os resultados obtidos nos ensaios dos rolamentos mostraram que as variáveis energia na faixa de 100-150 Hz, energia total e deslocamento RMS são os melhores indicadores para identificar os estados da classe de rolamentos estudados. Assim, a tabela 4.4.1 construída a partir dos resultados dos ensaios, resume os critérios de classificação dos rolamentos da classe estudada segundo cada uma das três variáveis de maior relevância.

Tabela 4.4.1. Critérios para classificação do estado de rolamentos das classes novo, ótimo, bom, desgastado e muito desgastado.

Estado do rolamento					
Variáveis	Novo	Ótimo	Bom	Desgastado	Muito Desgastado
Energia 100-150 Hz	< 10	10 a 15	15 a 20	20 a 30	> 30
Energia Total	< 30	30 a 50	50 a 70	70 a 100	> 100
Deslocamento RMS (mV)	< 0,85	0,85 a 1,30	1,30 a 1,75	1,75 a 2,60	>2,60
Energia 100-150 Hz	Referência	50% sup	100% sup	300% sup	> 300% sup
Energia Total	Referência	67% sup	133% sup	233% sup	> 233% sup
Deslocamento RMS (mV)	Referência	53% sup	106% sup	206% sup	> 206% sup

O critério geral de substituição do rolamento pode ser definido como o momento em que um dos critérios individuais atinge a categoria Desgastado, ou seja, em termos absolutos, conforme a parte superior da Tabela 4.4.1, tem-se: (i) Energia 100-150Hz > 20; ou (ii) Energia total > 70; ou (iii) Deslocamento RMS > 1,75 mm.

Utilizando-se a situação de rolamentos novos como referência, é possível estabelecer critérios relativos, que podem ser válidos para outros tamanhos de rolamentos. Nesse caso, conforme a parte inferior da Tabela 4.4.1, tem-se: (i) Aumento da Energia na faixa de 100-150Hz superior a 100%; ou (ii) Aumento da Energia total superior a 133%; ou (iii) aumento no valor RMS do deslocamento RMS superior a 106%.

Além desses critérios, deve-se considerar também os valores calculados das frequências naturais do rolamento, no caso 10,2 Hz (FTF, gaiola), 41,6 Hz (BSF, elemento rolante), 81,3 Hz (BPFI, pista externa) e 158,7 Hz (BPFO, pista interna). O crescimento de energia nesses valores de frequência sinaliza defeitos específicos nos elementos indicados entre parêntesis.

Determinado os critérios de substituição do rolamento, foi feito o diagnóstico dos rolamentos estudados, de modo a validar seus estados. Assim, o Quadro 4.4.1 a seguir apresenta o resultado do diagnóstico para cada rolamento. Percebe-se que onze rolamentos apresentam indicação de substituição,

pois esses rolamentos não passam nos critérios estabelecidos. Esses rolamentos foram retirados de uso em atividades de manutenção preventiva. Seis deles, no entanto, foram retirados de uso tardiamente, quando já tinham atingido o estado de “Muito desgastado”. Por outro lado, observa-se que nove rolamentos em estado ótimo ou bom foram retirados de uso prematuramente, ainda dentro de sua vida útil.

Quadro 4.4.1 Diagnóstico dos rolamentos estudados

Rolamento	Estado atual	Resultado do Diagnóstico	
E1	Novo	Continuar uso	
E2	Novo	Continuar uso	
E3	Novo	Continuar uso	
E4	Novo	Continuar uso	
E5	Novo	Continuar uso	
E6	Ótimo	Continuar uso	Retirado de uso prematuramente
E7	Ótimo	Continuar uso	Retirado de uso prematuramente
E8	Ótimo	Continuar uso	Retirado de uso prematuramente
E9	Ótimo	Continuar uso	Retirado de uso prematuramente
E10	Ótimo	Continuar uso	Retirado de uso prematuramente
E11	Bom	Continuar uso	Retirado de uso prematuramente
E12	Bom	Continuar uso	Retirado de uso prematuramente
E13	Bom	Continuar uso	Retirado de uso prematuramente
E14	Bom	Continuar uso	Retirado de uso prematuramente
E15	Bom	Substituir	Retirado de uso no momento certo
E16	Desgastado	Substituir	Retirado de uso no momento certo
E17	Desgastado	Substituir	Retirado de uso no momento certo
E18	Desgastado	Substituir	Retirado de uso no momento certo
E19	Desgastado	Substituir	Retirado de uso no momento certo
E20	Muito desgastado	Substituir	Retirado de uso tardiamente
E21	Muito desgastado	Substituir	Retirado de uso tardiamente
E22	Muito desgastado	Substituir	Retirado de uso tardiamente
E23	Muito desgastado	Substituir	Retirado de uso tardiamente
E24	Muito desgastado	Substituir	Retirado de uso tardiamente
E25	Muito desgastado	Substituir	Retirado de uso tardiamente

A retirada de uso prematuramente implica em maiores gastos com peças de reposição. A retirada de uso tardiamente implica em maior risco de parada inesperada e mesmo acidente. Assim, o método utilizado permite um diagnóstico mais preciso do real estado do rolamento, otimizando as atividades de substituição de peças.

4.5. USO DA METODOLOGIA EM EMPRESAS

A proposta deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema automatizado de instrumentação para identificação precoce de desgaste em rolamentos de motores de indução trifásicos, fácil e de baixo custo para monitoramento do estado físico dos rolamentos em motores elétricos, visando facilitar o diagnóstico dos mesmos em atividades rotineiras de manutenção. No passado, estudos do tipo empreendido nesta tese exigiam o uso de equipamentos com custo elevado e pessoal especializado para lidar com tais equipamentos. Atualmente, isso pode ser feito a um custo acessível a empresas de médio ou mesmo pequeno porte.

Para a realização dos estudos apresentados nesta tese, foi usada uma placa de aquisição de sinais modelo Arduino *Uno* e alguns sensores denominados *Shields* para a aquisição de dados de temperatura, amplitude de vibração, energia de vibração, velocidade e nível de pressão sonora, além de um cartão de memória tipo micro SD com capacidade de 8GB que foi instalado no Arduino. Os sensores são instalados no motor. O cartão SD e o Arduino devem ficar próximos aos sensores. A alimentação de energia do Arduino é feita através de um adaptador AC 110-220V/3-5V DC, compatível com qualquer hardware.

Todos esses dispositivos são de baixo custo e de fácil aquisição nas vendas de dispositivos e componentes eletrônicos, disponíveis na Internet. Uma importante vantagem desta metodologia é a possibilidade de monitoramento contínuo, sem interrupção de funcionamento do motor e do sistema produtivo. Outra vantagem é a possibilidade de instalação em diversos ambientes físicos, com fatores climáticos adversos. Para a obtenção dos dados dos sensores, basta retirar o cartão SD e transferir seus dados para um computador para posterior tratamento em planilhas eletrônicas e softwares como o *MatLab*.

Na aplicação desta metodologia em uma empresa, é necessária a aquisição dos dispositivos citados, que são de baixo custo e de fácil utilização.

Além disso, também é necessário existir na área de manutenção da empresa pessoal qualificado para entender os resultados apresentados em planilha eletrônica ou no *MatLab*. A plataforma *MatLab* auxilia na análise dos dados, principalmente na transformação e visualização dos dados no domínio do tempo para o domínio da frequência, porém essa operação também pode ser realizada em planilhas eletrônicas. Para o desenvolvimento deste estudo, foi necessário o domínio de linguagem de programação “C”, que possibilita a programação dos dispositivos de *hardware* como o Arduino e de *softwares* de simulação como o *MatLab*.

De posse desses dispositivos e de pessoal capacitado para entender os resultados, os rolamentos dos motores elétricos existentes em uma empresa podem ser monitorados regularmente. O diagnóstico do estado físico dos rolamentos dependerá da existência de modelos de comparação, como os desenvolvidos nesta tese. Caso seja de interesse da indústria, o modelo aqui desenvolvido poderá ser utilizado para o desenvolvimento de modelos adequados para outros tipos de rolamentos existentes nas empresas interessadas. Esse monitoramento pode ser feito *in-loco* ou no setor de manutenção da empresa, necessitando que lá exista uma bancada para a fixação do motor, estável e sem vibrações, adequadamente fixada à sua base. Nesta bancada, de construção simples (Figura 1.4.1) os motores podem ser instalados. A seguir, com os sensores instalados no motor, próximos à saída do eixo (Figuras 3.4.11 e 3.4.12), pode-se realizar o diagnóstico do estado dos rolamentos. Também nesse caso faz-se necessária a comparação dos dados obtidos com critérios pré-estabelecidos. Estes podem ser obtidos conforme procedimentos indicados nesta tese. Caso a metodologia seja utilizada para a avaliação de um grande conjunto de rolamentos, os procedimentos não sofrem alterações consideráveis. Os motores com especificações idênticas podem ser agrupados em um mesmo bloco. Será feita a avaliação de um motor de cada vez, seus dados serão registados no cartão SD para posterior tratamento. A alteração seria apenas em relação à me-

mória de armazenamento de dados do cartão, que são comercialmente encontrados com as seguintes capacidades de armazenamento: 4, 8, 16, 32, 64, 128 e 256 GB. Porém, se a intenção for a análise dos rolamentos em grupo, pode-se utilizar Arduinos com maior capacidade de entradas e saídas digitais como por exemplo o Arduino AT Mega 2560, que possui 16 entradas analógicas e 54 entradas digitais, o que permitiria o registro de quatro motores em cada operação e com custo levemente alterado.

Com uma equipe capacitada para a realização dos ensaios, e considerando que a troca de motores e de sensores e o breve tempo usado para o ensaio ($t = 10$ seg), esta substituição pode ser realizada em tempo médio de cinco min, sendo possível avaliar 12 motores/hora/homem ou 96 motores em um turno de oito horas por cada técnico responsável. Esse tempo tem por base o tempo mensurado nos ensaios realizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Em resumo, com técnicos capacitados e equipamentos de baixo custo esta metodologia pode ser utilizada no setor de manutenção de uma empresa. Além disso, uma vantagem adicional é que todos os dados ficam armazenados em um banco de dados, facilitando a consulta e a construção de um histórico das manutenções realizadas pelo setor de manutenção.

4.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Os rolamentos caracterizados como ótimos apresentaram um comportamento similar aos novos. Em comparação com os rolamentos novos, observa-se que, além do aumento do gasto de energia total de 24,9 (novos) para 45,9 (ótimos), o valor RMS do deslocamento de vibração também cresce, avançando em média de 0,67 mV (novos) para 1,06 mV (ótimos) caracterizando que a presença inicial de desgaste, possivelmente fuga de esfericidade, já inicia a ocorrer mesmo no início do uso dos rolamentos. A caracterização de pequenos desgastes ou defeitos não oferece riscos à atividade do rolamento, mas alerta o encarregado da manutenção para que intensifique o monitoramento ao longo do tempo. Comparando os seus valores mensurados com os dados relacionados

aos rolamentos novos, percebe-se que, embora possuam valores próximos, dados de variáveis como energia nas frequências de 0-50 Hz, 50-100 Hz, 100-150 Hz, 150-200 Hz, Energia total, além da energia associada aos picos de frequência de 118 e 147 Hz e o valor RMS do deslocamento de vibração apresentaram valores distintos que diferenciam os rolamentos novos dos ótimos.

Os rolamentos caracterizados como bons apresentaram um comportamento com maior variação em seus parâmetros como, por exemplo, o nível de pressão sonora apresenta um leve aumento, aumentando de 74 dBA (ótimos) para 77 dBA (bons) o que já o distingue dos rolamentos considerados ótimos, embora esta diferença seja imperceptível ao ouvido humano. A energia e o valor RMS do deslocamento também apresentaram aumento em seus valores indicando claramente que desgastes já se manifestam. Considerando os parâmetros de deslocamento RMS e energia pode-se concluir que a avaliação da energia nas diversas frequência analisadas e do deslocamento RMS são parâmetros que permitem identificar a passagem do estado “ótimo” para “bom”, o que demonstra a importância da aplicação desta metodologia na análise do estado físico do rolamento. Observando os gráficos das amplitudes de densidade espectral verifica-se visualmente a presença de picos de amplitude próximos às frequências de 118 Hz e 147 Hz, caracterizando a presença de desgaste que se manifestam nos rolamentos. De modo geral todos os indicadores revelam a presença de desgaste, mas ainda dentro de limites aceitáveis para o funcionamento do motor.

Como os rolamentos não possuem dados concretos sobre tempo de uso, uma monitoração periódica deve ser realizada para controle do desgaste dos mesmos. Os rolamentos indicados como desgastados apresentam dados de temperatura e nível de pressão sonora semelhante aos rolamentos bons (27°C e 70dBA, respectivamente). Contudo, ao compararmos os valores de variáveis como energia de vibração na frequência entre 100 Hz e 150 Hz, energia total e deslocamento RMS com os valores máximos determinados para a substituição de rolamentos verificou-se que esses rolamentos apresentaram desgastes que impõe a sua substituição. Percebe-se que Energia de vibração do motor

e Deslocamento RMS podem ser considerados bons indicadores para a detecção de desgaste, em conformidade com a análise realizada na tabela 4.3.1. Os rolamentos classificados como desgastados apresentaram, também, picos pronunciados quando foram analisados os gráficos dos espectros de frequência, indicando elevado dispêndio de energia em frequências que correspondem às frequências naturais do motor. Além disso, é visível a distinção entre os rolamentos classificados como novos, ótimos, bons e desgastados em função da análise realizada por esta metodologia. Os rolamentos descritos como muito desgastados apresentaram temperatura e nível de pressão sonora próximos aos valores obtidos nos demais ensaios. Ao analisar os valores médios de energia na frequência entre 100-150 Hz, energia total e deslocamento RMS verificou-se que apresentaram valores muito superiores aos estabelecidos para substituição de rolamentos. Esses valores caracterizam a presença de desgastes acentuados que podem provocar danos ao sistema, em função de vibração excessiva do motor. Essas últimas observações indicam que Energia e Amplitude de vibração constituem os melhores indicadores para a detecção de desgaste.

Observa-se que a indicação de defeitos em rolamentos está intrinsecamente relacionada com a análise dos valores mensurados e a necessidade da existência de critérios de referência, o que caracteriza a importância da utilização deste método para estas análises. Após a identificação dos critérios relacionados a rolamentos novos e em boas condições, é possível uma comparação entre a curva do rolamento em estudo e os critérios estabelecidos, que permitirá a classificação do rolamento em teste através de uma análise rápida, simples e precisa.

O desenvolvimento da bancada de testes e os resultados obtidos nos ensaios corresponderam às expectativas que motivaram esta tese, pois permitiram desenvolver uma metodologia eficiente, confiável, de baixo custo e fácil de implementar para realizar um diagnóstico precoce de desgaste em rolamentos utilizados em motores trifásicos. Os resultados obtidos nos ensaios possibilitaram a criação de perfis de comportamento dos rolamentos em função da amplitude e frequência de vibração do motor.

Esses resultados podem ser usados por empresas de diversos segmentos para otimizar suas atividades de manutenção. Em especial, eles contribuem para a identificação do momento apropriado para a troca de rolamentos. O desenvolvimento desta tese focou em um tamanho de rolamentos, mas, seguindo os mesmos procedimentos adotados nesta tese, eles podem ser facilmente replicados para outros tamanhos de rolamentos.

O próximo capítulo irá apresentar as conclusões finais, as limitações deste estudo e as propostas para a realização de trabalhos futuros, que possam contribuir para o aprimoramento desta metodologia.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um método de baixo custo para diagnóstico do estado de rolamentos em motores trifásicos, de forma a detectar prematuramente a presença de desgaste, utilizando o monitoramento dos sinais de vibração no mancal que suporta os rolamentos em avaliação.

Para desenvolver essa metodologia, uma bancada de ensaios foi construída e vinte e cinco rolamentos foram testados nessa bancada. Os testes foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos, pertencente à Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica, do IFES. Os rolamentos ensaiados foram nomeados de E1 a E25 e foram agrupados em cinco categorias de acordo com seu estado visual de degradação. Cada rolamento, em função de seus valores mensurados e das análises realizadas, foi classificado como novo, ótimo, bom, desgastado e muito desgastado. Os dados obtidos foram coletados em um dispositivo microprocessado denominado Arduino, que os transferia a um computador para armazenamento e análise. Através de *softwares* como *MatLab*, esses dados foram analisados e geraram parâmetros sobre amplitude de vibração e espectros de potência, obtidos através da aplicação da Transformada Rápida de *Fourier* (FFT). O uso da FFT permitiu definir a faixa de frequência que contém as frequências naturais de vibração do sistema e a forma como a energia nessas frequências é afetada pelo desgaste dos rolamentos. Um banco de dados contendo as informações dos rolamentos ensaiados serviu de base para o desenvolvimento do método de avaliação do estado dos rolamentos. Com os dados armazenados, foi possível estabelecer critérios para o diagnóstico do estado do rolamento.

A bancada não teve influência na medição de vibração, pois sua rigidez era muito superior ao conjunto em teste. Além disso, a bancada mostrou-se versátil e prática de se operar, proporcionando agilidade nos testes e facilidade para realizar a retirada e posterior reinstalação dos rolamentos instalados no motor.

Observou-se que a análise das curvas de espectro de potência das vibrações dos sinais auxiliou na verificação do desgaste nos rolamentos através da análise dos picos de frequência associados à vibração do motor. Picos importantes, relacionados ao motor em teste e excitados pelo desgaste dessa classe de rolamentos, ocorreram nas frequências próximas a 118 Hz e 147 Hz.

Inicialmente, foi analisada a evolução da temperatura, velocidade, nível de pressão sonora, amplitude e energia nas frequências de 0-50 Hz, 50-100 Hz, 100-150 Hz, 150-200 Hz e energia total, além da energia associada aos picos de frequência de 118 e 147 Hz, bem como o valor RMS dos deslocamentos de vibração. Posteriormente, em função das informações oferecidas por essas variáveis, foram identificadas aquelas que melhor traduziam o início do desgaste dos rolamentos, no caso: energia na faixa de 100 a 150 Hz, Energia total e valor RMS dos deslocamentos de vibração.

Assim, para essa classe de rolamentos, e considerando o conjunto de motor testado, considerou-se como critério de decisão que a substituição do rolamento deve ocorrer quando um dos critérios individuais atingir a categoria Desgastado, ou seja, (i) Energia na faixa 100-150 Hz > 20; ou (ii) Energia total > 70; ou (iii) Deslocamento RMS > 1,75 mV. Naturalmente, esses valores absolutos são válidos apenas para o conjunto testado. Além desses valores absolutos, para obter uma maior generalidade no diagnóstico, também foram definidos os respectivos valores relativos. Assim, considerando a condição de rolamentos novos como referência, tem-se que os critérios de substituição são: (i) Aumento da Energia na faixa de 100-150 Hz > 100%; ou (ii) Aumento da Energia total > 133%; ou (iii) aumento no valor RMS do deslocamento RMS > 106%.

Além desses critérios, neste trabalho também foram calculadas as chamadas frequências naturais da classe de rolamento em estudo, no caso: 10,2 Hz (FTF, gaiola), 41,6 Hz (BSF, elemento rolante), 81,3 Hz (BPFI, pista externa)

e 158,7 Hz (BPFO, pista interna). O surgimento de picos de energia nesses valores de frequência sinaliza defeitos específicos nos elementos indicados e deve ser monitorado através da análise da densidade espectral de frequência.

Determinado os critérios de substituição do rolamento, foi possível realizar o diagnóstico dos rolamentos estudados, de modo a validar seus estados. Em relação aos critérios acima definidos, verificou-se que os cinco rolamentos caracterizados como novos efetivamente atendiam essa condição, sem apresentar nenhum indício de desgaste. A análise dos espectros de frequência da vibração do motor com rolamentos novos revelou picos baixos, o que indica que a vibração excitada por esses rolamentos é reduzida.

Os demais vinte rolamentos haviam sido coletados em empresas da região, tendo sido retirados de uso em atividades de manutenção preventiva. Os critérios de detecção de desgaste definidos nesta tese permitiram identificar que entre esses rolamentos, nove (09) foram retirados de uso prematuramente, cinco (05) foram retirados de uso no momento certo, apresentando desgaste compatível com os critérios de substituição, e seis (06) foram retirados de uso tardiamente, pois apresentavam desgaste muito superior ao critério de substituição, colocando o equipamento em risco de uma falha mais grave.

É importante observar que a retirada de uso prematuramente implica em maiores gastos com peças de reposição. A retirada de uso tardiamente, por sua vez, implica em maior risco de parada inesperada e mesmo acidente. Assim, o método utilizado, apoiado nas vibrações do motor, permite um diagnóstico mais preciso do real estado do rolamento, otimizando as atividades de substituição de peças.

A metodologia desenvolvida permitiu a avaliação dos rolamentos, embasada na análise espectral das vibrações do motor. Associado ao desgaste acumulado nos rolamentos, verificou-se um crescimento contínuo da energia espectral referente a vibração do motor. A análise espectral associada à análise do valor RMS dos deslocamentos demonstrou ser eficiente para indicar o nível de desgaste dos rolamentos. Conclui-se que o sistema de diagnóstico prematuro de desgaste de rolamentos, desenvolvido ao longo deste trabalho, apresenta eficiência, baixo custo, simplicidade e segurança.

Uma limitação deste trabalho que deve ser mencionada é que o mesmo é voltado a um único modelo de rolamento (ZZ 6201), mas os passos metodológicos aqui definidos para estabelecer os critérios de substituição de rolamentos podem ser usados em outros modelos de rolamentos, sem alterações de procedimentos.

Um ponto importante que merece destaque foi a construção da bancada de testes que propiciou o desenvolvimento desta metodologia que já está sendo utilizada em aulas práticas de laboratório do Instituto Federal do Espírito Santo nos cursos técnico de Eletrotécnica e Mecânica bem como nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, contribuindo para qualificar o ensino de engenharia no Instituto Federal do Espírito Santo como foi proposto nos objetivos da tese. Os alunos desses cursos saem qualificados para utilizar esta metodologia, podendo atuar nas empresas como executores ou até mesmo como empreendedores.

Outro aspecto que merece destaque é que a metodologia desenvolvida pode ser utilizada em pequenas e médias empresas. Deve-se ressaltar que a instrumentação e a aquisição de dados dos rolamentos dos motores pode ser adquirida no local onde o motor está instalado, onde os sensores encaminharão os dados coletados ao Arduino e este os registrará em um cartão de memória sem interromper a operação do motor. Estes dados serão posteriormente tratados em softwares como *Matlab*. Com isso é possível criar um banco de dados das variáveis coletadas no motor. Quando estas variáveis coletadas são comparadas com os parâmetros estabelecidos para rolamentos novos, pode-se avaliar o estado físico dos rolamentos em uso.

Duas situações são muito comuns em empresas de pequeno e médio porte. Uma delas ocorre quando a empresa tem um sistema de manutenção implementado. Nesse caso pode-se capacitar a equipe de manutenção para que faça uso correto e contínuo desta metodologia. Essa capacitação pode ser realizada pelos profissionais que já conhecem a metodologia, por exemplo, egressos dos cursos acima citados.

A outra situação ocorre quando a empresa não tem um sistema de manutenção estruturado. Por não possuírem equipes de manutenção dedicadas,

somente conseguem detectar problemas em rolamentos quando sinais extremos de desgaste se manifestam, seja pela elevação de temperatura, excesso de nível de pressão sonora ou vibrações acentuadas. Por serem empresas de pequeno porte, custos adicionais como estoques de peças sobressalentes, altos custos de trabalho extra ou elevado tempo de paralisação da máquina devem ser evitados. Nestas empresas, é necessária uma preparação mais aprofundada, visando reunir informações a respeito da manutenção das máquinas, o tipo de falha mais frequente, a causa desta falha, o responsável pela manutenção, a forma de manutenção, entre outras.

Empresas de pequeno porte como marcenarias, serralherias, gráficas, retíficas e empresas do setor alimentício, dentre outras, se enquadram neste perfil, estabelecendo um amplo mercado de trabalho para técnicos e engenheiros que dominam métodos de análise de vibração. Como a metodologia desenvolvida é simples de operar e de baixo custo, facilita a sua utilização em pequenas e médias empresas. Outra vantagem que esta metodologia apresenta é a possibilidade de monitoramento contínuo, sem interrupção de funcionamento do motor e do sistema produtivo, além de instalação em diversos ambientes físicos, com fatores climáticos adversos.

Para empresas que já possuem um quadro de técnicos responsáveis pelo setor de manutenção, o uso desta metodologia necessita da aquisição dos dispositivos eletroeletrônicos como inversores de frequência, sensores e transdutores, placa de aquisição de sinais (Arduino) e um computador para aquisição, registro e tratamento dos sinais através de softwares específicos, que são de baixo custo e de fácil utilização. Além disso, é necessário o domínio de planilhas eletrônicas e capacidade de interpretação de sinais no domínio dos tempos e da frequência.

Importante frisar que, após o encerramento da rotina de manutenção corretiva ou preventiva de cada equipamento, é importante que haja um documento que faça um resumo do serviço executado e das peças que foram substituídas. Esse resumo ou histórico do equipamento serve como informação tanto para os técnicos do grupo de manutenção no início de cada serviço como para que o responsável pelo grupo possa gerenciar o andamento da manutenção de

cada equipamento sob sua responsabilidade. Esse documento deve conter toda a história do equipamento de modo bastante resumido, desde sua chegada ao local de serviço até a desativação. Ele deve conter as seguintes informações: (i) número e tipo de falhas ocorridas no equipamento; (ii) análise das falhas relatadas pelo grupo de manutenção; (iii) tipo e número de peças que foram substituídas no equipamento, (iv) datas de realização de cada serviço; (v) formulário para registro do histórico do equipamento.

O desenvolvimento desta tese focou em um modelo de rolamento, mas, seguindo os mesmos procedimentos adotados nesta tese, eles podem ser replicados para outros tamanhos de rolamentos. A construção da bancada de testes e os resultados obtidos nos ensaios corresponderam às expectativas que motivaram esta tese, pois permitiram desenvolver uma metodologia para realizar o diagnóstico precoce de desgastes em rolamentos utilizados em máquinas elétricas rotativas. Os resultados obtidos nos ensaios possibilitaram a criação de perfis de comportamento dos rolamentos em função da amplitude e frequência de vibração do motor. Esses resultados podem ser usados por empresas de diversos segmentos para otimizar suas atividades de manutenção. Em especial, eles contribuem para a identificação do momento apropriado para a troca de rolamentos.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento desta tese permitiu identificar oportunidades de estudos futuros, conforme apresentado a seguir:

1. Inserir defeitos nos elementos que constituem os rolamentos e avaliar como esta metodologia detecta a presença desses distúrbios;
2. Utilizar nesta metodologia a placa de aquisição de sinais MyRio fabricada pela *National Instruments* e que faz uso do software *LabView*, e comparar os resultados obtidos;

3. Inserir na bancada utilizada cargas acopladas distintas e verificar o comportamento dos rolamentos quando as cargas variam;
4. Estimar o tempo de vida dos rolamentos utilizados através desta metodologia, ou seja, relacionar os dados de espectro de frequência às horas de uso dos rolamentos;
5. Utilizar rolamentos com diferentes diâmetros e motores com dimensões e potências maiores, expandindo a definição de critérios de substituição para outros modelos de rolamentos;
6. Utilizar esta metodologia para rolamentos com características construtivas diferentes das utilizadas neste trabalho como rolamentos de rolos cilíndricos, rolamentos de rolos cônicos rolamentos axiais e de agulhas;
7. Utilizar esta metodologia em atividades industriais, para verificar dificuldades que podem surgir em campo e desenvolver soluções para essas dificuldades.

BIBLIOGRAFIA

AGOSTINHO, J. A. C. Diagnóstico de Avarias nos Rolamentos de um MIT. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra. 2013,

AMAR, M. Vibration Spectrum imaging: A novel bearing fault classification approach. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 2015

ANZANELLO, M. J. et al. Multicriteria wavenumber selection in cocaine classification. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, v. 115, p. 562–569, 2015

ARAÚJO, F.E. Controle de Nível de pressão sonora em Motores de Indução Trifásicos de Médio e Grande Porte. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008

ARAUJO, R.G.C. Desenvolvimento de um Sistema de Diagnóstico de Falhas em Motores Elétricos de Indução. *13º CNM (Congresso Nacional de Manutenção da APMI)*.

AUGIE, HAND. Motores Elétricos: Manutenção e Solução de problemas. Série Tekne, 2ª Ed., Bookman Editora, São Paulo, Brasil, 2015

AVILLA, G.G., RAMALHO, G. L. B. Avaliação do Nível de pressão sonora em Ambientes Industriais através de Modelos Computacionais. IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, Belém – PA – 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5383-1: Parte I: Motores de Indução Trifásicos – Ensaio. Rio de Janeiro, 2002

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10082: Ensaio não destrutivo — Análise de vibrações — Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 rpm a 15 000 rpm. 14/10/2011 ed. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.

BONNET, A. H. "Cause and analysis of bearing failures in electrical motors", Petroleum and Chemical Industry Conference, San Antonio, TX , pp. 87-95, September 2015.

CATÁLOGO NO. E1102J, NSK, Rolling Bearings, Japan, 2011. [Online]. Available: <http://www.jp.nsk.com/app01/en/ctr/index.cgi?rm=pdfView&pno=e1102k>.

BASTOS, R. J., JUNIOR, R. B. Previsão de falhas em Rolamentos Utilizando a Demodulação de Sinais de Vibração. Vol.13. no.17. 2010

BLODT, M., Granjon, P., Raison, B., & Rostaing, G. (2008). Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring. *IEEE transactions on industrial electronics*, 55(4), 1813-1822.

CAMCI, F., Kamal Medjaher, Nouredine Zerhouni, Patrick Nectoux. Feature Evaluation for Effective Bearing Prognostics.. *Quality and Reliability Engineering International*, Wiley, 2012, pp.1-15. ff10.1002/qre.1396ff. fffhal-00798464f.

CASSIMIRO, J.G. et al. identification of failures in electric machines. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2015.

CERVO, Amado Luiz; BERVIAN, Pedro Alcino; DA SILVA, Roberto. Metodologia científica. 6ª. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2007

CHAUDHARY, M. (2015). Vibration monitoring of induction motor by using accelerometers. *International Journal of scientific Research Engineering & Technology*. Vol.4, issue 8, August, 2015.

COSTA, F. F., et. al. (2014). Improving the signal data acquisition in condition monitoring of electrical machines. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, p. 1015-1019, n. 4, august 2014.

CUNHA, M. R. *Análise e Diagnóstico de Equipamentos*. Aditec. São Paulo. S.P. 2017

DELGADO et al. Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. *Mechanical Systems and signal Processing*. ELSERVIER. Vol. 83, 15 jan 2017, pages 568-589. 2017.

DEVANEY, M. J., EREN, L. "Detecting motor bearing faults", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 7, pp. 30-50, December 2014.

DIAS, A.S. RODRIGUES, J.C. Detecção de Falhas em Rolamentos Através da *Análise de Vibração*. 2012.

DÓRIA, R. "Manutenção de rolamentos". *Manutenção*, vol. 112, PP. 70, 72, 74-76, 78, 79, 1º TRIMESTRE 2015

ESTUPÑAN, E. and Saavedra, P., 2016. "Tecnicas de Diagnostico para el Analisis de Vibraciones de Rodamientos", 9º Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica, Universidade de Concepción, Chile.

FREIBERGER, S. R. *Manutenção de Equipamentos Elétricos*. Biblioteca Fundação escola técnica liberato salzano vieira da cunha. RS. 2011

FILIPPETTI, F., Franceschini, G., Tassoni, C., e Vas, P. (2015). Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using all techniques. *Industrial Electronics. IEEE Transactions*, 47(5):994–1004, Oct. 2015.

FOGLIATTO, S. F., RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. 11^a Ed, Elsevier Editora, São Paulo, SP, Brasil, 2009

FUCHS, G. J. (2016). Bancada experimental para monitoramento de falhas em rolamentos. *1º Simpósio Brasileiro de Metrologia em Acústica e Vibrações*, pp 5- 8, Rio de Janeiro, Dezembro, 2016.

FUJIMOTO, R.Y. Automatic diagnosis bearing faults based in fuzzy logic. *Mechanical Engineering of Design and Manufacture Magazine*. 2006.

GEORGOULAS et al. Asynchronous Machine Rotor Fault Diagnosis Technique Using Complex Waveless. *Browse Journal and Magazines. IEEE Transactions on Energy*. Vol.23, Issue 2, 2015.

GONÇALVES, J.M. et al. (2015). Diagnosis of bearing faults in induction motors by vibration signals-Comparison of multiple signal processing approaches. *IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics*.

GONÇALVES, M.J.M. (2015). Application of principal component analysis (PCA) in the diagnosis of defects through the electric signature of induction motors. *Industrial Electronics (ISIE), 2015 IEEE 24th International Symposium*.

GONGORA, W.S. Uma abordagem neural no diagnóstico de falhas em rolamentos de motores de indução trifásico. *Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná*. 2013

GOYAL, D., et al. (2018). Condition monitoring of rotating machines: A review. *Word Scientific News. An International Scientific Journal*.

GOUNDAR, S. S., Real time condition monitoring system for industrial motors. *Computer Science and Engineering (APWC on CSE). 2nd Asia-Pacific World Congress*. 2015.

HAIR, J. F. et al. *Análise Multivariada de Dados*. Tradução Adonai Schlup Sant'Anna. [s.l: s.n.]

HENAO, H. et al. Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 31–42. doi:10.1109/mie.2013.2287651

IMMOVILLI, F., Bellini, A., Rubini, R., & Tassoni, C. (2010). Diagnosis of bearing faults in induction machines by vibration or current signals: A critical comparison. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(4), 1350-1359.

LIN, C.H., et al. (2016). Bearing vibration detection and analysis using enhanced FFT algorithm. *Journal of Advances in Mechanical Engineering*.

MARUTHI, G.S., HEDGE, V. (2014). Preliminary investigation on bearing fault motor. *IEEE International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEECC)*.

MESQUITA et al. Detecção de falhas em rolamentos usando transformadas tempo-frequência – comparação com análise de envelope. *Mecânica Computacional*, Vol.XXI, pp.1938-1954, Santa Fé-Argentina, Outubro 2016

PAZOUKI, E., CHOR, S. (2015). Fault diagnosis and condition monitoring using multisensory approach based fuzzy-logic clustering. *4th International Conference on Electrical and Electronics*.

NSK. *Manual de Rolamentos*. 2016.

PLANT, T., et al. (2017). Faults detection and failures prediction using vibration analysis. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*.

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

RENCHER, A. C. *Methods of Multivariate Analysis*. Second ed. [s.l.] Wiley-Interscience, 2002. v. 136

RIBERA, M.P., VASCONCELOS, N. Técnicas de análise de defeito em rolamentos. Técnica tradicional, nova tecnologia e perspectivas de uso na Açominas. 2016.

RIERA-GUASP, ANTONINO-DAVIU, J. Advances in Electrical Machine, Power Electronic, and Drive Condition Monitoring and Fault Detection: State of the Art. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Volume: 62, Issue: 3. March 2015.

SADARANGI, C. *Electrical Machines-Design and Analysis of Induction and Permanent Magnet Motors*, vol. 1, KTH-Sweden, 2016.

SANTOS, E. G. D. The use of the Fourier Transform for vibration analysis in electric machines. *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*.

SANTOS, R.S. Bearing fault detection in rotating machines using signal processing techniques. *IEEE Transactions on Power Electric*. Volume: 14 Issue: 1. 2017

SHIROISHI, J. et al., 1997, "Bearing Condition Diagnostics via Vibration and Acoustic Emission Measurements". *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 5, p. 693-705.

SILVA, A. A., 1999, "Detecção e Análise Dinâmica de Falhas em Rolamentos", Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, s586d.

SILVA, H. P. Diagnóstico de Problemas em Máquinas Elétricas Girantes Através de Medição e Análise do Espectro de Vibração Mecânica. Depto de P&D do Produto. WEG Motores. Jaraguá do Sul, SC. 2012

SILVA, J.F. (2014). Diagnosis and vibration analysis of electrical machines. *International Journal of Quality & Reliability management*.

SKEIRIK, Robert. "Innovative Digital Technique for Detection of Bearing Faults on Critical and Slow Speed Machines" – 3º Congresso de Gerenciamento de Manutenção Preditiva- Belo Horizonte, MG. 2016.

THOMSON, W., CULERT, I. Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Cage Induction Motors: Industrial Application and Case Histories. Eilley *IEEE Press, 2017*

TRAJIN, B. REGNIER, J., FAUCHER, J. "Bearing fault indicator in induction machine using stator current spectral analysis", in 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2016. PEMD 2016, Toulouse, France, pp. 592-596, April 2016

TSYPKIN, M. (2015). Electric machines fault detection and diagnosis using vibration analysis. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*.

VARANIS, M., et al. (2016). Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform. *Revista Brasileira de Ensino de Física 38 (1)*.

VASCONCELOS, N. Técnicas de análise de defeito em rolamentos. Técnica tradicional, nova tecnologia e perspectivas de uso na açosinas. Congresso Brasileiro de Tecnologia em aço. Belo Horizonte, M.G., 2016.

WEI, Z., HABELTLER, T. G., HARLEY, R. G. "Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines: A General Review", IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives 2017, Cracow, pp. 3-6, 6-8 Spt. 2017.

WONG, T.-T. Performance evaluation of classification algorithms by k-fold and leave-one-out cross validation. *Pattern Recognition*, v. 48, n. 9, p. 2839–2846, 2015.

XU, CHEN. A new fault diagnosis method for power transformer winding deformation based on vibration. *Automation of Electric Power Systems*. IEEE. 2013.

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, 2013.