



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DO DESGASTE EM MANCAIS RADIAIS DE
MOTORES USANDO INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO
CUSTO

JOAO DEHON DA ROCHA JUNIOR
NATAL- RN, 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DO DESGASTE EM MANCAIS RADIAIS DE MOTORES USANDO INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO

JOAO DEHON DA ROCHA JUNIOR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**, orientado pelo Prof. Dr. José Josemar de Oliveira Junior.

NATAL - RN
2020

ANÁLISE DO DESGASTE EM MANCAIS RADIAIS DE MOTORES USANDO INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO

JOAO DEHON DA ROCHA JUNIOR

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Banca Examinadora da Dissertação

Prof. Dr. José Josemar de Oliveira Junior _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Orientador

Prof. Dr. Wallace Moreira Bessa _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Interno

Prof. Dr. José Álvaro De Paiva _____

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - Avaliador Externo

NATAL, 27 de janeiro de 2020.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Rocha Junior, João Dehon da.

Análise do desgaste em mancais radiais de motores usando instrumentação de baixo custo / João Dehon da Rocha Junior. - 2020.

86f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Natal, 2020.

Orientador: Dr. José Josemar de Oliveira Junior.

1. Poços artesianos - Dissertação. 2. Bombas submersas - Dissertação. 3. Mancal radial - Dissertação. 4. Arduino - Dissertação. I. Oliveira Junior, José Josemar de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.112.23

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas as quais presto minha homenagem:

À Luiz Guilherme Meira de Souza e João Telésforo Nobrega de Medeiros por me acolherem de forma extremamente receptiva durante o primeiro contato com a UFRN.

À Wallace Moreira Bessa, Paulo Gilberto de Paula Toro e Adilson José de Oliveira por me auxiliarem durante suas disciplinas do programa da pós-graduação e contribuírem para o desenvolvimento da minha pesquisa.

À José Josemar de Oliveira Junior por me orientar durante o desenvolvimento dessa dissertação e estar sempre disponível para contribuir.

À Salete Martins Alves e Luiz Henrique P. G. de Amorim por me ajudarem nos procedimentos burocráticos do programa.

Ao laboratório e a empresa onde desenvolvi a minha pesquisa, o GET e a JD Motores®, e seus os alunos e colaboradores.

Aos meus pais João Dehon da Rocha e Maria Vânia Morais da Rocha, a minha irmã Camila Morais da Rocha, minha tia Vera Lúcia de Morais, minha esposa Shyrlei da Silva Oliveira e aos meus filhos João Guilherme de Oliveira Rocha e Pedro Lucas de Oliveira Rocha que me deram todo o apoio nos momentos mais difíceis.

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos.”

Marcel Proust

Rocha Junior, João Dehon. **Análise do desgaste em mancais radiais de motores usando instrumentação de baixo custo.** 2020. 86 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2020.

Resumo

A utilização de bombas instaladas em poços artesianos para a extração de água do subsolo é uma técnica amplamente utilizada no Brasil, em especial no Nordeste, em locais onde a seca é predominante durante o ano. Em algumas regiões, essa extração corresponde a 70% do abastecimento de água para a população. Estudos comprovam que 50% das falhas em motores elétricos iniciam nos mancais e estes representam apenas 30% do valor total de uma manutenção corretiva. Diante do exposto, o presente trabalho realizou um estudo nos mancais radiais de deslizamentos dos motores utilizados nos poços artesianos. Foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados de baixo custo através do Arduino e o sensor MPU6050 para a captação de sinais de vibração do sistema. O sensor foi posicionado próximo ao mancal radial. Foram analisadas quatro situações diferentes no mancal. A primeira, com ajuste de fábrica de 0,1 mm de folga entre o eixo e a bucha no mancal, a segunda, terceira e quarta condições de funcionamento foram de 0,2, 0,5 e 1,0 de folga, respectivamente. Para cada situação, o ensaio se repetiu seis vezes por três minutos cada. Os dados obtidos no Arduino foram estudados através de análises no domínio do tempo e da frequência. Para cada condição de funcionamento foi possível identificar um padrão de funcionamento. Com base nisso foi elaborada uma metodologia de diagnóstico para o motor alvo do estudo que foi colocada a prova em um estudo de caso.

Palavras-chave: Arduino, análise de sinais de vibração, bombas submersas, sistema de baixo custo.

Rocha Junior, João Dehon. **Wear analysis on radial motor bearings using low cost instrumentation.** 2020. 86 p. Master's Dissertation in Mechanical Engineering - Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2020.

Abstract

The use of pumps installed in artesian wells for underground water extraction is a technique widely used in Brazil, especially in the Northeast, in places where drought is predominant during the year. In some regions, this extraction accounts for 70% of the population's water supply. Studies show that 50% of failures in electric motors start at the bearings and these represent only 30% of the total value of corrective maintenance. The present work carried out a study on the radial bearings of the motors used in artesian wells. A low cost Arduino data acquisition system and MPU6050 sensor for capturing system vibration signals have been developed. The sensor was positioned close to the radial bearing. Four different bearing situations were analyzed. The first, with factory setting of 0.1 mm clearance between the shaft and bushing in the bearing, the second, third and fourth operating conditions were 0.2, 0.5 and 1.0 mm time off respectively. For each situation, the test was repeated six times for three minutes each. The data obtained in Arduino were studied through time and frequency domain analysis. For each operating condition it was possible to identify an operating pattern. Based on this, a diagnostic methodology for the study target engine was developed and put to the test in a case study.

Keywords: Arduino, vibration signal analysis, submerged pumps, low cost system.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Motor submerso.	16
Figura 2 - Funcionamento de bombas alternativas.	17
Figura 3 – Funcionamento das turbomáquinas.	18
Figura 4 – Bomba submersa EBARA modelo BHS 411-8.	19
Figura 5 – Comparativo do funcionamento do mancal a seco e o hidrodinâmico.	22
Figura 6 – Curva velocidade relativa versus atrito das superfícies.	23
Figura 7 – Curva velocidade relativa versus atrito das superfícies.	27
Figura 8 – Curva velocidade relativa versus atrito das superfícies.	31
Figura 9 – Aumento do fator de curtose.	33
Figura 10 – Diferença entre a análise de sinal para o domínio do tempo e da frequência.	35
Figura 11 – Arduino Mega 2560.	38
Figura 12 – Fluxograma do módulo experimental.	40
Figura 13 – Esquema de ligação do procedimento experimental.	41
Figura 14 – Elementos do motor.	42
Figura 15 – Posicionamento do sensor MPU6050 no mancal axial do motor.	44
Figura 16 – Representação da folga radial induzida no mancal radial.	45
Figura 17 – Esquema elétrico da ligação do Arduino com o sensor.	46
Figura 18 – Equipamentos utilizados na validação.	47
Figura 19 – Fixação dos sensores para a comparação.	48
Figura 20 – Comparativos dos espectros de frequência da validação.	50
Figura 21 – Valor médio eficaz, RMS, mancal 01.	52

Figura 22 – Valor médio eficaz, RMS, mancal 02.	52
Figura 23 – Valor médio eficaz, RMS, mancal 03.	53
Figura 24 – Valor médio eficaz, RMS, mancal 04.	54
Figura 25 – Evolução do valor RMS em função do aumento da folga radial do mancal.	54
Figura 26 – Valor de pico, mancal 01.....	56
Figura 27 – Valor de pico, mancal 02.....	57
Figura 28 – Valor de pico, mancal 03.....	57
Figura 29 – Valor de pico, mancal 04.....	58
Figura 30 – Evolução do valor de pico em função do aumento da folga radial do mancal.....	59
Figura 31 – Fator de crista, mancal 01.....	60
Figura 32 – Fator de crista, mancal 02.....	61
Figura 33 – Fator de crista, mancal 03.....	62
Figura 34 – Fator de crista, mancal 04.....	62
Figura 35 – Evolução do valor do fator de crista em função do aumento da folga radial do mancal.....	63
Figura 36 – Fator de curtose, mancal 01.....	64
Figura 37 – Fator de curtose, mancal 02.....	65
Figura 38 – Fator de curtose, mancal 03.....	65
Figura 39 – Fator de curtose, mancal 04.....	66
Figura 40 – Evolução do valor do fator de curtose em função do aumento da folga radial do mancal.	67
Figura 41 – Espectro de frequência, mancal 01.....	68

Figura 42 – Espectro de frequência, mancal 02.....	69
Figura 43 – Espectro de frequência, mancal 03.....	70
Figura 44 – Espectro de frequência, mancal 04.....	71
Figura 45 – Espectro de frequência para as condições de funcionamento de 01 a 04.	72
Figura 46 – Espectro de frequência do estudo de caso.....	75

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tabela de diagnose.....	73
Tabela 2 – Valores obtidos no estudo de caso.....	74

Sumário

1	Introdução	14
2	Referencial teórico	16
2.1	Conjuntos motobombas submersas	16
2.2	Mancais de deslizamento com lubrificação hidrodinâmica	21
2.3	Aquisição e análise de sinais de vibração	24
2.3.1	Manutenção preditiva	24
2.3.2	Análise de vibração no domínio do tempo	26
2.3.3	Análise de vibração no domínio da frequência	33
2.4	Arduino	37
3	Metodologia	40
4	Resultados e discussões	49
4.1	Resultados da comparação	49
4.2	Resultados do experimento com o motor	51
4.3	Algoritmo de diagnóstico	73
4.4	Estudo de caso	74
5	Conclusões	77
6	Referências	79

1 Introdução

O sistema atual de abastecimento de água da cidade de Mossoró-RN conta com duas fontes de obtenção de água, uma subterrânea e outra superficial, sendo a subterrânea a mais utilizada devido à maior abundância e qualidade da água. As águas de manancial superficial chegam até a cidade através da adutora Jerônimo Rosado e, segundo a Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte-CAERN, é responsável por cerca de 30% de toda a água consumida no município. Os outros 70% ficam a cargo de águas subterrâneas provindas do Aquífero Açú, que é um aquífero praticamente confinado, sendo uma riqueza natural da região. O aquífero é explorado através de poços tubulares profundos distribuídos em pontos estratégicos da cidade com 15 unidades em funcionamento (CAERN, 2018).

A extração de água desse aquífero é feita exclusivamente com conjuntos motobombas submersas que utilizam mancais em diversos locais com o intuito de minimizar o nível de atrito, aumentando assim a eficiência do equipamento. Em geral, para conjuntos de elevada potência (potência maior que 10 hp), todos os mancais são do tipo deslizamento (baseia-se no deslizamento dos elementos envolvidos) com ou sem lubrificação.

Os principais defeitos que os conjuntos motobombas submersas apresentam estão nos mancais, em função de seu desgaste. Estes, contribuem, em média, com 30% do custo total da manutenção dos conjuntos motobombas submersas. Um estudo do Centro Técnico de Indústrias Mecânicas da França (*Centre Technique des Industries Mécaniques*) realizado em 1987, mostrou que 50% das falhas em motores elétricos são causadas pelos mancais (BIGRET, 2001).

Nessa perspectiva, o estudo visa desenvolver um método de análise de desgaste, de baixo custo, baseado na verificação dos sinais de vibração do motor do conjunto motobomba submersa.

Com a utilização de ferramentas consolidadas de análise de sinais implementadas em hardware de baixo custo pode-se obter padrões de funcionamento dos conjuntos motobombas submersas de modo a desenvolver uma lógica de manutenção preditiva. Esta técnica possibilitará uma maior vida útil ao equipamento e um custo de manutenção menor se comparado com a manutenção corretiva.

O objetivo geral dessa dissertação é avaliar o comportamento do motor de um conjunto motobomba submersa, sujeito à vários níveis de desgaste em seus mancais radiais, por meio da aquisição e tratamento dos sinais de vibração obtidos por hardware de baixo custo. Para isso foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um método de análise de vibração de baixo custo;
- Validar o método de análise com outros sistemas de aquisição de dados;
- Verificar o comportamento vibracional do motor em função dos desgastes induzidos;
- Realizar uma avaliação dos dados e desenvolver a técnica de manutenção preditiva por meio da verificação do nível vibracional do equipamento;
- Colocar o sistema desenvolvido a prova através de um estudo de caso.

Para o melhor entendimento, este trabalho foi dividido em capítulos, *a priori* foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o escopo da pesquisa. Em seguida, é descrita a metodologia aplicada no estudo que mostrou como foi realizado o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para aquisição e tratamento de sinais, sua validação, desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico e verificação de sua eficácia em um estudo de caso. Posterior à metodologia constam os resultados e discussões e conclusões finais do trabalho.

2 Referencial teórico

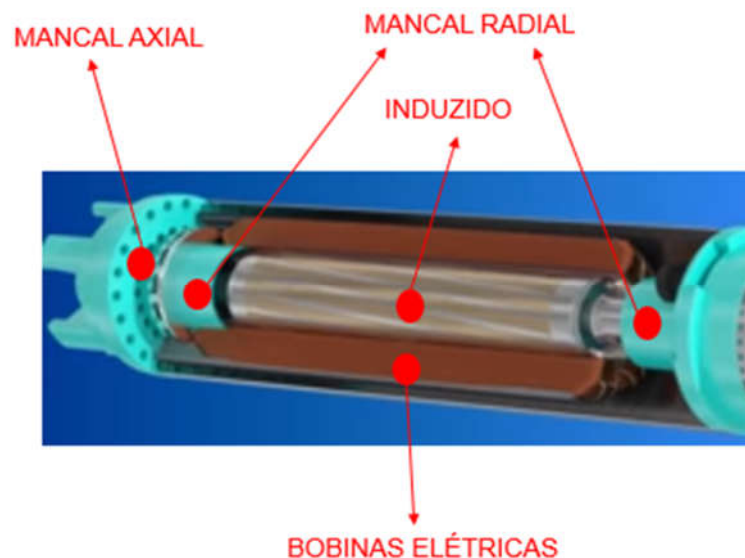
Este trabalho propôs a utilização de um *hardware* de baixo custo para a aplicação de manutenção preditiva em conjuntos motobombas submersas. O embasamento teórico incorpora os assuntos fundamentais para o melhor entendimento do estudo que foram divididos em quatro pontos principais, a saber:

- Conjuntos motobombas submersas;
- Mancais de deslizamento com lubrificação hidrodinâmica;
- Aquisição e análise de sinais de vibração;
- Arduino.

2.1 Conjuntos motobombas submersas

O objeto do estudo dessa dissertação é o motor do conjunto motobomba submersa, apresentado na Figura 1, composto, principalmente, pelos seguintes elementos: induzido, bobinas elétricas e mancais radiais e axial.

Figura 1 – Motor submerso.



Fonte: Adaptado de EBARA (2018).

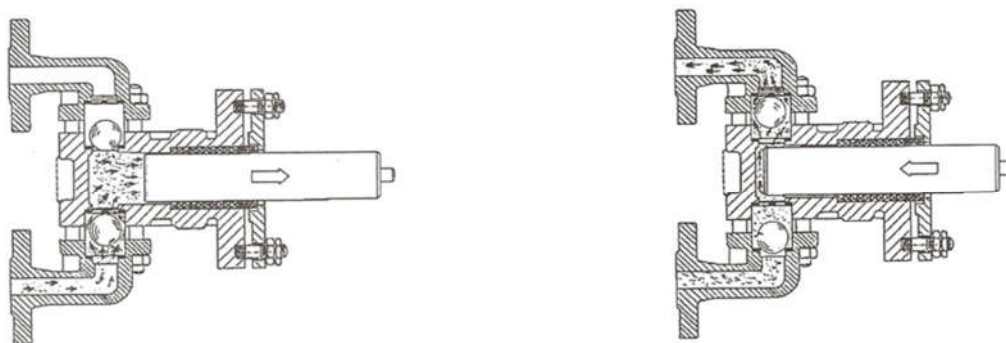
As bobinas elétricas são instaladas em um material ferromagnético denominado de estator. Quando a energia elétrica circula pelas bobinas, é formado um campo magnético que induz uma corrente elétrica no induzido que,

consequentemente, forma um outro campo magnético e através do fenômeno da repulsão este componente é forçado a girar. Os mancais são do tipo deslizantes hidrodinâmicos. Os radiais permitem a centralização do induzido e o axial é responsável por suportar toda a carga axial gerada no funcionamento do conjunto motobomba submersa.

A bomba submersa é uma invenção russa, patenteada em 1918 por Artunoff. Foi originalmente projetada para bombeamento de petróleo por meio de uma coluna de recalque (LEÃO, 2002).

De acordo com Fox (2006), uma bomba é uma máquina de fluxo, um dispositivo que realiza trabalho sobre um fluido. Podem ser classificadas como de deslocamento positivo ou dinâmicas. Nas máquinas de deslocamento positivo, a transferência de energia é feita por variações de volume que ocorrem devido ao movimento da fronteira na qual o fluido está confinado, conforme Figura 2.

Figura 2 - Funcionamento de bombas alternativas.

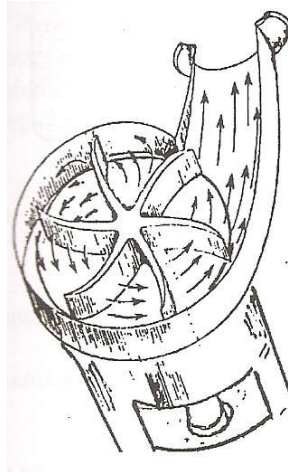


Fonte: Lima (2003).

A esquerda é possível verificar o avanço do pistão no sentido da seta indicativa. Durante esse movimento o fluido é succionado para dentro da câmara. Após encher completamente, o pistão retorna para a posição inicial empurrando o fluido. O controle do sentido do fluido é dado por válvulas direcionais.

Alguns dos dispositivos classificados como dinâmicos podem também ser chamados de turbomáquinas que, por sua vez, direcionam o fluxo de fluido com lâminas ou pás fixadas em um elemento rotativo, de acordo com o apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Funcionamento das turbomáquinas.



Fonte: Lima (2003).

A figura apresenta um rotor radial onde o fluido adentra no estágio de bombeio de forma perpendicular ao rotor, e após passar por ele, sai de forma radial. Conforme as setas indicativas.

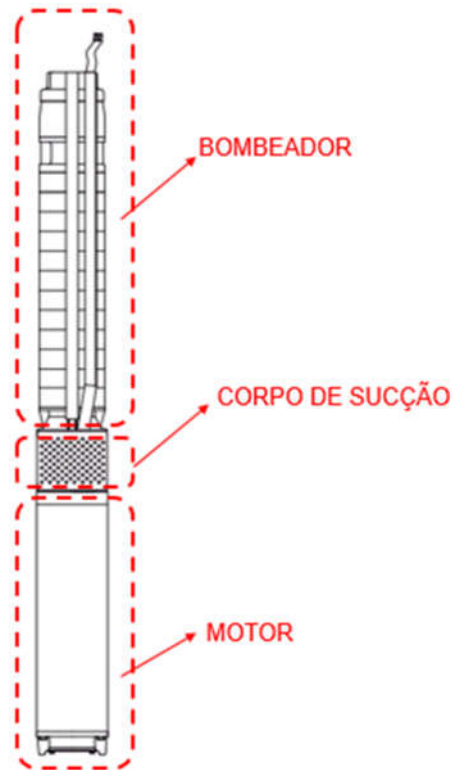
Uma subdivisão adicional entre os tipos de turbomáquinas é com base na geometria do percurso do fluido. Nas máquinas de fluxo radial (eventualmente denominadas de centrífugas), a trajetória do fluido é essencialmente radial, com mudanças significativas no raio, da entrada para a saída. Já nas máquinas de fluxo axial, a trajetória do fluido é aproximadamente paralela à linha de centro da máquina. Também existem as máquinas de fluxo misto, que por sua vez possuem características tanto das máquinas de fluxo axial quanto de fluxo radial (Fox, 2006).

Os conjuntos motobombas submersas ou bombas submersas são bombas centrífugas multiestágios com rotores radiais ou mistos desenhadas de forma que seus motores elétricos submersos funcionem debaixo d'água. Os rolamentos do motor são lubrificados com a água que preenche a parte interna do motor elétrico e a operação de resfriamento para os rolamentos ocorre por meio da água do poço que está flutuando ao redor do corpo do motor. As bombas submersas são usadas para bombear água que é um fluido não muito corrosivo (WILO, 2013).

A Figura 4 representa um conjunto motobomba submersa da marca EBARA modelo BHS 411-8 com motor de 4 hp que dispõe de rotores do tipo radial. A parte inferior representa o motor elétrico, a superior o bombeador ou bomba e no meio é

apresentado o corpo de sucção, local onde o fluido é forçado a entrar na bomba para, posteriormente, percorrer todos os estágios compostos por um rotor e um difusor e, para cada estágio, a energia no fluido é aumentada.

Figura 4 – Bomba submersa EBARA modelo BHS 411-8.



Fonte: Adaptado de EBARA (2018).

De acordo com a EBARA (2018) as bombas submersas podem ser utilizadas para diversos fins: residencial, industrial, agrícola, abastecimento público e para o rebaixamento do lençol freático para ser utilizado em construção civil e exploração mineral.

Dentre as vantagens de utilização do conjunto motobomba submersa, Leão (2002) elenca as principais:

- Maior economia, devido ao seu alto rendimento e conseqüentemente baixo consumo de energia associado a um baixo custo de aquisição;

- Não possui eixo prolongado, eliminando mancais intermediários, suas vibrações e consequentes desgastes;
- Alcança grandes profundidades de instalação;
- É mais silenciosa no funcionamento.

Segundo Lima (2003), as bombas hidráulicas, subdivisão na qual as bombas submersas estão inseridas, desempenham um papel importantíssimo. Sob o ponto de vista industrial, apenas os motores elétricos estão à frente no quesito importância.

A aplicação desses equipamentos no segmento petrolífero continua sendo alvo de estudos, Zhang *et al.* (2017) também avaliaram os conjuntos motobombas de forma computacional, utilizando redes neurais para a aplicação de manutenção preditiva de forma mais eficaz em sistemas de bombeio em plataformas *offshore* de exploração de petróleo. Já Huamani (2017) estudou uma análise modal operacional de uma bomba centrífuga submersa utilizando a decomposição melhorada no domínio da frequência para a aplicação em poços de exploração de petróleo. Seu estudo visou o desenvolvimento de um algoritmo e ao final o comparou com o comercial. Obteve bons resultados e propôs a continuação do estudo.

Longhi (2017) verificou a aplicação de bombas submersas centrífugas para o escoamento multifásico através de simulação numérica computacional. Ao final do estudo propôs a utilização de estágios intercalados de rotor centrífugo e rotor hélico-axial. Desse modo as equações de perda de carga e os projetos de bombeio poderiam ser utilizados.

Cubas (2017) também estudou o desempenho de bombas centrífugas em escoamento bifásico, mas dessa vez o escoamento foi de água e ar, diferentemente de Longhi (2017) que estudou o escoamento entre óleo e gases provenientes do poço de petróleo. Cubas (2017) identificou diferentes padrões de escoamento dentro do rotor em diferentes condições operacionais. Stan *et al.* (2018) confirmaram em seus estudos que o rendimento, pressão e vazão de uma bomba centrífuga decaem com o aumento do percentual de ar no sistema de bombeio.

Para a aplicação dos conjuntos motobombas na extração de água, os trabalhos em andamento estão voltados para o aumento da eficiência do sistema. Sun e Wei (2017) verificaram a influência de diferentes larguras de entrada de fluido nos

difusores das bombas através de uma análise de simulação numérica computacional. Os difusores são elementos que atuam em conjunto com os rotores e possuem a função de converter a energia cinética de rotação em energia de pressão (MACINTYRE, 1997). Com o incremento de 10 mm na entrada do difusor em um equipamento cujo ponto de operação é vazão = 125m³/h e pressão = 16 m, foi notado um aumento de 7,8% na eficiência.

Zhou *et al.* (2018) também trabalharam na variação dos difusores de forma computacional em um sistema de bombeio de simples estágio, mas dessa vez foi na quantidade de elementos. Como resultado verificou um incremento de eficiência com o aumento da quantidade de entradas de 6 para 8.

Já Ferreira Filho (2017) estudou a aplicação de um sistema fotovoltaico com controlador digital de tensão aplicado em sistema de bombeio de água. Essa é uma tendência do mercado e da academia em relação a conjuntos motobombas submersas. Empresas como a Franklin Electric® já apostam em sistemas de bombeio que funcionam exclusivamente com energia solar.

Diante do estudo realizado foram encontrados poucos trabalhos relativos ao monitoramento dos motores das motobombas. A complexidade desse estudo e os poucos trabalhos encontrados se dão pelo fato de os equipamentos serem instalados nos poços artesianos a vários metros de profundidade.

2.2 Mancais de deslizamento com lubrificação hidrodinâmica

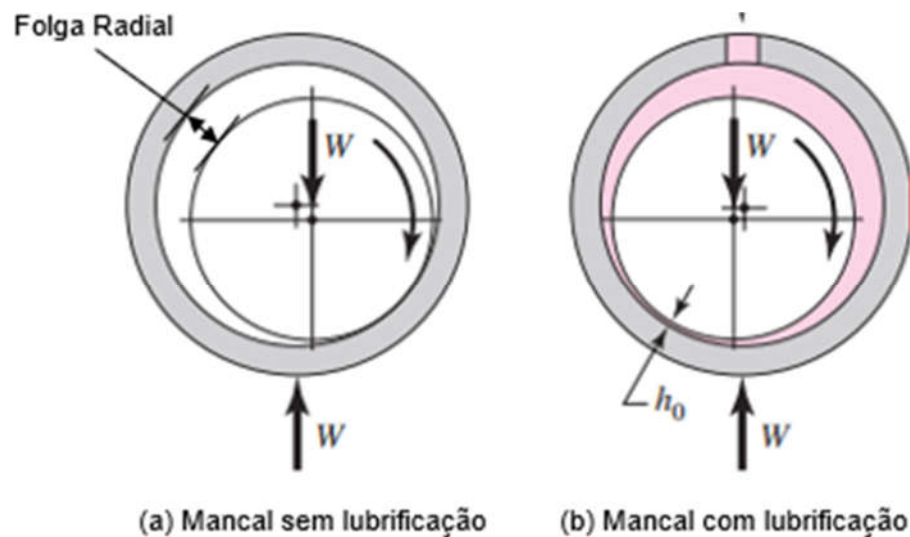
O uso de mancais hidrodinâmicos se deve à sua confiabilidade elevada e periodicidade de manutenção mais longa, devido ao uso contínuo de lubrificação, preservando assim as suas partes por mais tempo (MEDEIROS, 2017). Esse tipo de mancal possui uma película de fluido lubrificante na interface deslizante, a velocidade relativa entre as superfícies bombeia o lubrificante para dentro do espaço entre elas separando as superfícies por um filme dinâmico de fluido (NORTON, 2013).

Medeiros (2017) afirma que o funcionamento de um mancal hidrodinâmico acontece em três etapas básicas. A primeira é quando o rotor (elemento girante) está estático e o mancal recebe o apoio direto do peso do rotor. A segunda acontece com o início da rotação do rotor, onde o filme de óleo é forçado a se movimentar entre as superfícies do mancal e do eixo. A terceira e última etapa é quando a condição de

operação permanente é atingida, quando o eixo se encontra em uma posição de equilíbrio, excêntrica, em que o filme de óleo exerce uma força decorrente da distribuição de pressão, sustentando assim o eixo do rotor na operação.

A Figura 5 ilustra o funcionamento de um mancal trabalhando a seco (a), e outro com lubrificação hidrodinâmica (b). É percebido que as posições de equilíbrio são diferentes, em (b) a pressão gerada pela dinâmica do fluido força o eixo para a posição oposta se comparado com (a). Na figura, h_0 representa a espessura mínima de fluido que é atingida durante o funcionamento do mancal e W é a representação da força exercida. Esse tipo de funcionamento do mancal promove diferentes pressões em torno de sua superfície, de modo que o desgaste nessa situação passa a não ser uniforme (NORTON, 2013).

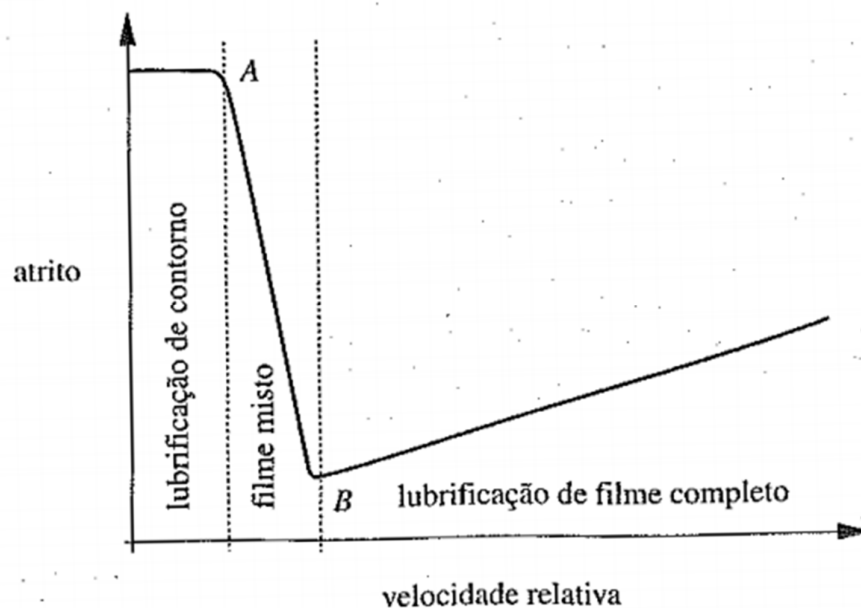
Figura 5 – Comparativo do funcionamento do mancal a seco e o hidrodinâmico.



Fonte: Budynas (2011).

Norton (2013) apresenta uma curva que relaciona o atrito e a velocidade de deslocamento relativo em um mancal (Figura 6). Em baixas velocidades, a lubrificação presente é a denominada de contorno onde as superfícies do mancal possuem contato físico.

Figura 6 – Curva velocidade relativa versus atrito das superfícies.



Fonte: Norton (2013).

Durante o desenvolvimento da velocidade, um filme de óleo começa a se formar, sendo um filme misto onde o contato físico é diminuído e conseqüentemente o atrito também. Quando o mancal atinge a velocidade de regime permanente, próximo ao ponto *B*, o filme de óleo completo é formado e o atrito atinge seu mínimo. Após esse ponto, se a velocidade for aumentada, o atrito também aumentará.

Feng *et al.* (2018) verificaram as características de um mancal hidrodinâmico com lubrificação a água. Constataram que a turbulência no escoamento impacta diretamente no desempenho do mancal, sendo que, quanto maior a turbulência e velocidade relativa das interfaces do mancal, maiores são as perdas por fricção.

Um problema que pode acontecer nos mancais hidrodinâmicos é a instabilidade. Medeiros (2017) afirma que dentre os efeitos na região de instabilidade, as vibrações destrutivas mais comuns em mancais hidrodinâmicos são as conhecidas como "*Oil Whirl*" ou giro do óleo, "*Oil Whip*" ou chicoteio do óleo e o "*Dry-Whirl*" ou giro seco. Para melhorar esses efeitos de instabilidade nos mancais, ranhuras e entalhes podem ser feitos nas buchas (elemento de desgaste do mancal) para que o fluxo do fluido lubrificante aconteça de forma mais eficaz.

O uso de mais entalhes e ranhuras na superfície do mancal tende a reduzir os efeitos de rotação do fluido, melhorando assim os fenômenos de instabilidade. No entanto essa quantidade tem um valor limite, pois com a adição de mais entalhes, menor será a área do mancal para suporte de carga, havendo um aumento de temperatura e uma diminuição dos valores de amortecimento (MEDEIROS, 2017).

Shinde *et al.* (2018) realizaram um comparativo de três diferentes texturas de ranhuras em mancais hidrodinâmicos, com perfil retangular, triangular e circular. Notou que as ranhuras com perfil retangular obtiveram o desenvolvimento mínimo de pressão no filme de lubrificante e a menor perda de potência em comparativo com os demais perfis.

Simões (2017) verificou o desempenho de um mancal hidrodinâmico lubrificado a gás com três lóbulos ao invés de ranhuras através da utilização de elementos finitos. Percebeu que os mancais radiais de três lóbulos representam uma possível solução ao problema de instabilidade recorrente nos mancais lubrificadas a gás.

2.3 Aquisição e análise de sinais de vibração

A descoberta de falhas e a estimativa da vida útil remanescente de mancais de elementos rolantes tem sido um grande desafio para os pesquisadores, a fim de minimizar as perdas econômicas que ocorrem nas indústrias devido à falha de máquinas rotativas. No entanto, um diagnóstico e prognóstico dos mancais exige o tratamento eficaz dos sinais gerados por eles (RAI e UPADHYAY, 2016).

Mancais desempenham um papel crucial no funcionamento de máquinas rotativas (RAI e UPADHYAY, 2016). A utilização de sinais de vibração em técnicas de manutenção preditiva é algo crescente na indústria, muito utilizado para avaliação desses elementos.

2.3.1 Manutenção preditiva

Existem dois tipos principais de manutenção, a corretiva e a preventiva. A primeira é acionada quando o equipamento vem a falhar, a segunda de acordo com um tempo médio da vida útil do equipamento, mesmo se este não vier a apresentar falhas.

A manutenção preditiva baseia-se em realizar um monitoramento regular das condições de operação do equipamento, e, quando houver necessidade, ocorrerá a manutenção. Ela não elimina a manutenção corretiva e preventiva, mas é possível minimizá-las através do monitoramento dos parâmetros de operação.

O conceito de manutenção preditiva está relacionado com o monitoramento frequente do desempenho de uma máquina ou de seus elementos a fim de evitar sua quebra e prolongar o período entre reparos (SOARES *et al.*, 2015). Dessa forma é possível aumentar a vida útil do equipamento e reduzir os custos de manutenção.

A manutenção preditiva também pode ser entendida como um tipo especial de manutenção preventiva na qual a manutenção é realizada continuamente ou em intervalos de acordo com os requisitos para diagnosticar e monitorar uma condição ou sistema (COSTA, 2012).

De acordo com Soares et al (2015), em mancais, as principais fontes de vibrações são geradas por desalinhamentos, folgas, desbalanceamentos, cargas excessivas, sujeiras e desgastes. Esses e outros defeitos alteram os níveis normais e aceitáveis de vibração.

Gombé *et al.* (2017) verificaram a aplicação da comunicação *wireless* em conjunto com um sensor que não necessita de bateria para ser aplicado na manutenção preditiva. Já Wang *et al.* (2017) utilizaram a tecnologia de nuvem para o compartilhamento das informações e definiram essa técnica como manutenção preditiva inteligente. Florin *et al.* (2016) aplicaram a lógica difusa na manutenção preditiva aplicada a equipamentos têxteis e verificaram um bom desempenho do sistema, recomendando-o para esses casos.

Cabral (2017) utilizou a técnica de termografia para a detecção de falhas em rolamentos. Constatou que essa técnica pode ser utilizada em alguns tipos de falhas como as de sulco na pista de rolagem interna e externa do rolamento.

Quando um equipamento dinâmico sofre desgaste em suas conexões, a frequência natural do sistema é alterada. Em seu artigo, Rai e Upadhyay (2016) citam algumas das ferramentas de monitoramento de rolamentos que estão sendo usadas pela indústria, elas se baseiam, principalmente, na análise da emissão acústica, vibração, detritos de óleo, eletrostática e ultrassom.

Em uma análise de mancais de rolamento, a natureza da resposta de vibração muda com a presença de defeitos em vários elementos de suporte. Os defeitos de rolamento incluem *cracks*, *pits* e *spalls* causados principalmente devido à fadiga nas superfícies de rolamento. Quando tal defeito atinge sua superfície de acoplamento, um pulso de curta duração é gerado, o que excita a vibração do sistema de rolamento do rotor (CHOUDHURY E TANDON, 2016). Feng (2013) e Mohammed (2014) investigaram o aparecimento de trincas através da análise do espectro de frequência em engrenagens.

A medição da vibração no domínio do tempo e no domínio da frequência tem sido utilizada para o monitoramento de condições de rolamentos. A mais utilizada é a abordagem no domínio da frequência, que essencialmente significa a análise espectral do sinal de vibração (CHOUDHURY E TANDON, 2016). Segundo Soares *et al.* (2015) existe uma terceira maneira de analisar o sinal, no domínio do tempo-frequência.

2.3.2 Análise de vibração no domínio do tempo

A análise em função do tempo é, geralmente, feita através de um gráfico tempo versus amplitude do sinal por meio de diversas técnicas. Vitoria (2016) define 4 tipos principais de análise do sinal no domínio do tempo: método de análise pelo valor de pico; método da quantificação do nível de vibração (Root Mean Square – RMS); fator de crista; e, método da curtose.

Os sinais analisados em aplicações que envolvem vibração podem ser sinais analógicos (contínuos) ou digitais (discretos), porém, as definições de características a serem analisadas na onda são as mesmas (ALSALAET, 2012). As principais características de uma onda no domínio do tempo são:

- Valor de pico ou Amplitude máxima (V_{pk});
- Valor de pico a pico (V_{pp});
- Frequência (f);
- Fase;
- Valor RMS (“root mean square”);
- Valor Médio (V_m);
- Fator de crista;

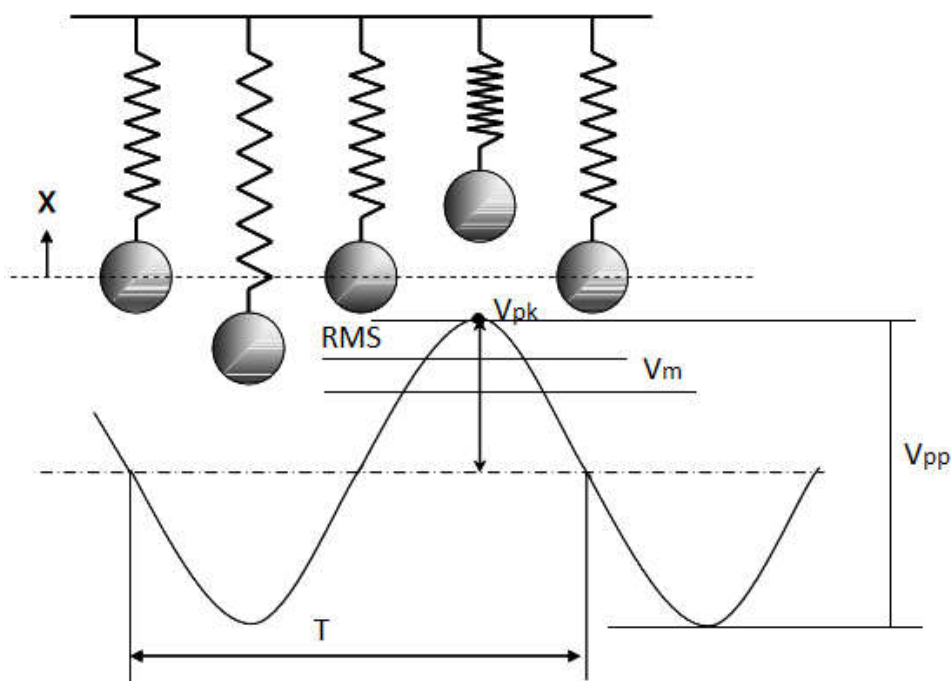
- Fator de curtose.

Na Figura 7 é mostrado o esquema de um sinal decorrente de um movimento oscilatório periódico e harmônico simples, ilustrando algumas dessas características. Nesta foi apresentado um sinal oscilatório do movimento de um peso preso a uma mola após a aplicação de uma forma inicial de movimento. Para o sinal senoidal, o eixo vertical representa a posição do peso e o eixo horizontal o tempo.

Cada característica é importante para o entendimento das falhas em componentes mecânicos. Segundo Meola (2005), o valor de pico é o valor máximo de amplitude atingida na curva, e, possibilita definir quando um componente atinge valores críticos, indicando assim máximas cargas e folgas.

O valor de pico a pico é a medida do pico máximo ao pico mínimo e fornece uma ideia do grau de vibração do sistema (TEKTRONIX, 2009).

Figura 7 – Curva velocidade relativa versus atrito das superfícies.



Fonte: Adaptado de Alsalaet (2012).

O valor de pico a pico é importante para determinar quando um elemento de máquina atinge valores críticos. É muito útil para identificar choques mecânicos e é obtido através da diferença entre o pico e o vale do sinal (VITORIA, 2016).

Urbanek *et al.* (2013) estudaram a vibração em aerogeradores e utilizaram os valores de pico a pico para diferentes velocidades de rotação do gerador como ferramenta para detectar falhas mecânicas.

De acordo com Alsalaet (2012), o valor de pico pode ser definido como a diferença entre o valor médio do sinal e sua máxima amplitude. Ele é utilizado para a identificação de diversos tipos de defeitos, Souto (2016) identificou um aumento no valor de pico com o aumento do desgaste em ferramentas de corte utilizadas no fresamento. Quanto maior o desgaste, maior foi a resposta de pico captada na ferramenta de corte.

Igba *et al.* (2016) utilizaram o valor de pico para determinar fraturas nos dentes das engrenagens. Para esse estudo, aplicaram a teoria dos valores extremos, acompanharam os valores de pico e quando atingiram valores acima daqueles considerados normais pelas literaturas, foi verificada a situação do componente e constatada a falha.

A frequência é a quantidade de ciclos completos de uma onda em um segundo (BIRD, 2010). A frequência pode ser expressa pela Equação 1.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Onde T é o período de oscilação em segundos e f é dado em hertz (Hz).

De acordo com Alsalaet (2012), o nível do sinal é relacionado algumas vezes com a magnitude ou valor de amplitude. Com respeito a vibração, o nível pode ser detectado em termos de valor RMS (*Root Mean Squares*), valor de pico, valor de pico a pico ou valor médio. Essas características são usadas principalmente na determinação da severidade da vibração para condições de monitoramento de máquinas.

Almeida (2016) afirma que a medição dos níveis globais RMS fornece valores que aumentam somente nos estágios finais, existindo assim, um *delay* do diagnóstico.

O Valor RMS fornece uma indicação para a quantidade de potência no sinal, ou em outras palavras, do valor efetivo. Portanto, o RMS quantifica a energia que está ligada ao sinal estudado e pode ser utilizado para estabelecer e comparar os níveis de vibração. Esse parâmetro é bastante utilizado na detecção de falhas durante avaliações em manutenção preditiva (ALSALAET, 2012; VITÓRIA, 2016; MEOLA, 2005).

O RMS para um sinal discreto é definido pela Equação 2.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2)$$

em que N é o número de pontos obtidos e x_i é o conjunto de valores do sinal discreto.

O Valor médio (V_m) é feito pela média dos pontos na metade de um ciclo, porém esse parâmetro limita bastante a análise de sistemas vibratórios, sendo o RMS uma opção mais viável quando se deseja estimar a magnitude de um sinal vibratório (ALSALAET, 2012).

Poddar e Tandon (2019) estudaram a resposta dos mancais de deslizamento com a presença de particulados. Com o valor RMS conseguiram identificar padrões em relação a quantidade de particulado presente e sua granulometria. Observaram que quanto maior a granulometria e a quantidade de particulado maiores foram os valores de energia efetiva média detectados.

Liang *et al.* (2016) empregaram o valor RMS de uma forma diferente. Avaliaram a vibração gerada por cada dente da engrenagem e com base nisso conseguiu identificar qual dente apresentava algum defeito.

Skrimpas *et al.* (2017) verificaram quais ferramentas estatísticas se adequavam melhor para medir os valores obtidos dos gráficos e constataram que a distribuição gaussiana poderia ser utilizada para defeitos pontuais e que o valor *RMS* foi eficaz para detectar falhas distribuídas.

Igba *et al.* (2016) estudaram o comportamento de caixas de engrenagens em aerogeradores. Confirmaram que o valor *RMS* foi eficaz para determinar falhas

progressivas, como desgastes em rolamentos e trincas em eixos, com até um mês de antecedência.

Zimroz *et al.* (2014) utilizaram as duas técnicas supracitadas, as distribuições de pico a pico e o valor médio eficaz, *RMS*, para o monitoramento de rolamentos de aerogeradores associando essas variáveis à potência do gerador eólico. Realizaram uma regressão linear para a previsão de falhas ao longo do tempo.

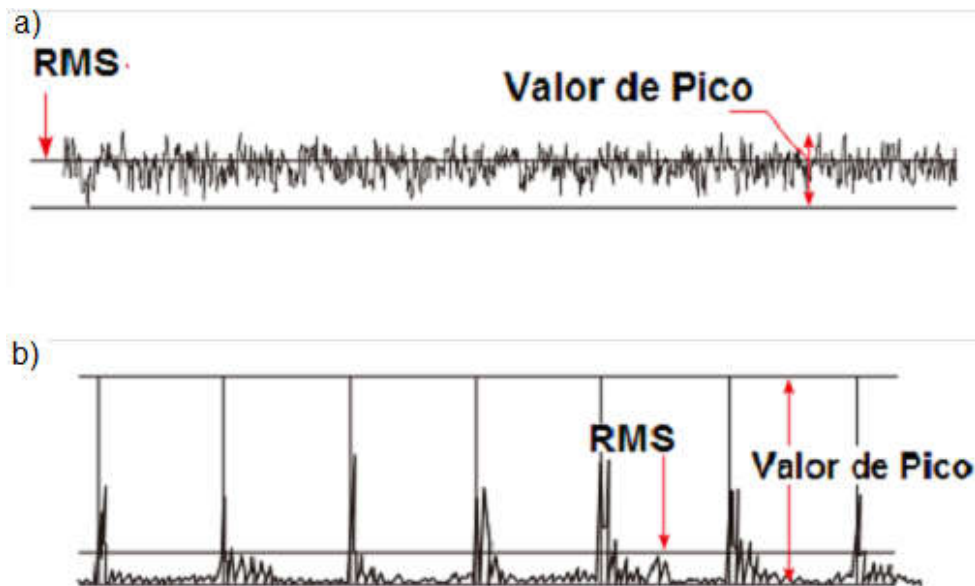
Soares *et al.* (2015) afirma que o fator de crista é determinado como a razão entre o pico da amplitude e o RMS, e com ele é possível detectar as falhas nos mancais em estágios iniciais.

A determinação do valor de pico e RMS é de suma importância para a obtenção do fator de crista (FC), já que este é determinado pela razão entre valor de pico e RMS. O fator de crista fornece uma indicação dos impactos característicos de uma forma de onda. Altos valores de fator de crista indicam impactos mais fortes no sistema, ou seja, esse parâmetro fornece uma ideia da homogeneidade do sinal. Portanto, pode-se afirmar que quanto mais picos acentuados e distribuídos de forma dispersa no sinal, maior o fator de crista (CUNHA, 2005; MRC, 2019). O fator de crista é expresso pela Equação 3.

$$\text{Fator de Crista} = \frac{V_{pk}}{RMS} \quad (3)$$

O fator de crista é utilizado para detectar estágios iniciais de defeitos em mancais e rolamentos (MRC, 2019). A Figura 8 mostra de forma esquemática a comparação de duas curvas de vibração obtidas de um rolamento normal (Figura 8 (a)) e um defeituoso (Figura 8 (b)). O eixo vertical representa a amplitude do sinal e o horizontal o tempo.

Figura 8 – Curva velocidade relativa versus atrito das superfícies.



Fonte: Adaptado de MRC (2019).

A partir da análise da Equação 3 é possível verificar que altos valores de RMS e valor de pico não demonstram, necessariamente, impactos mais fortes em determinados momentos da vibração. Se o valor de pico aumenta e o RMS também, este se aproximando do valor de pico, significa que o sinal se encontra em um grau altíssimo de defeito, ou seja, o estágio de defeitos é severo (MEOLA, 2005). Segundo Lepine e Rouillard (2018), o fator de crista é importante na análise do surgimento de choques no sistema, portanto, ao se verificar esse parâmetro é necessário também avaliar o valor de pico, RMS e o sinal de forma gráfica, com o intuito de verificar se o fator de crista está associado a choques.

Os sinais decorrentes de vibração em casos práticos são em grande parte aleatórios. Com base nisso, os parâmetros já mencionados fornecem uma boa ideia do comportamento do sinal quanto ao surgimento de falhas. No entanto, é necessário assim implementar mais ferramentas matemáticas para que a análise se dê de maneira mais completa.

Estudado e implementado por diversos autores (GEORGIADIS *et al.*, 2018; ALMEIDA *et al.*, 2002; MEOLA, 2005; VITORIA, 2016), o fator de curtose se mostra

um excelente parâmetro que descreve a forma de uma curva de distribuição de dados. É convencional defini-lo como o grau de “achatamento” de uma distribuição.

O fator de curtose pode ser utilizado como um método para comparar as ‘caudas’ de uma curva de distribuição de densidade de probabilidade. Essa comparação é realizada mediante a análise do grau de achatamento da curva, ou seja, o peso combinado das caudas em relação ao resto de uma distribuição (ALMEIDA *et al.*, 2002; KAMARAS e DIMITRAKOPOULOS, 2016). O fator de curtose é matematicamente expresso pela Equação 4:

$$k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \bar{X})^4}{\sigma^4} \quad (4)$$

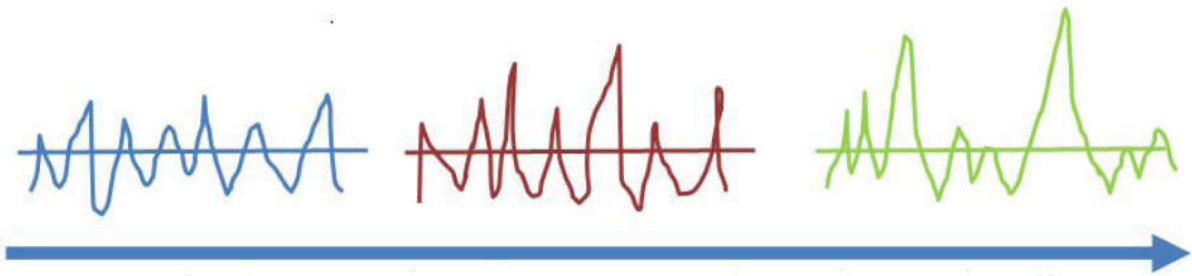
em que X_i é a amplitude medida do sinal, \bar{X} é a média das amplitudes, σ é o desvio padrão e N é o tamanho amostral.

O fator de curtose varia de acordo com a dispersão dos dados. Esse parâmetro pode ser analisado em torno de um valor, o número 3, que é o valor da curtose para uma distribuição normal (Gaussiana). Valor de curtose menor do que 3 indica que a curva é mais achatada do que uma curva de distribuição normal. Quando a curtose é maior do que 3, essa curva mostra seu pico mais acentuado (MEOLA, 2005).

Como um parâmetro para diagnóstico de falhas em componentes, o fator de curtose aumenta com o aumento dos defeitos. O aumento de defeitos causa o surgimento de picos acentuados no sinal, estes aparecem geralmente, de forma aleatória (ALMEIDA *et al.*, 2002; M+P INTERNACIONAL, 2019). A Figura 9 ilustra esse fenômeno.

O eixo vertical representa a amplitude do sinal e o eixo horizontal o tempo. no primeiro momento o sinal possui homogeneidade com relação aos picos, no segundo momento começam a surgir picos de maiores amplitudes que continuam a crescer no terceiro momento.

Figura 9 – Aumento do fator de curtose.



Fonte: Adaptado de Alsalaet (2012).

Entretanto, o surgimento de mais picos no sinal, se distribuindo de forma mais uniforme, acarreta a diminuição do fator de curtose. Sendo assim, o fator de curtose é mais eficaz quando deseja-se verificar se há o surgimento de informações transientes no sinal (LIU *et al.*, 2011).

A curtose é uma variável estatística baseada no quarto momento de um sinal, sendo próximo de zero para o ruído Gaussiano e outros sinais estacionários, mas grande para sinais de impulso contendo uma série de picos curtos, como é o caso dos sinais emitidos pelas falhas nos mancais. Esses emitem uma série de impulsos de curta duração, e a curtose é útil para determinar as faixas de frequências dos sinais das falhas (VITORIA, 2016).

2.3.3 Análise de vibração no domínio da frequência

Outro domínio estudado é o da frequência, que envolve uma transformação matemática. O conhecimento da distribuição da intensidade do sinal ou potência sobre diferentes componentes de frequência é uma análise essencial para a engenharia.

Os sinais decorrentes de sistemas vibratórios são obtidos através de aparatos eletrônicos, sendo compostos por transdutores, amplificadores, componentes de armazenamento e disponibilização do sinal. O resultado é um sinal no domínio do tempo. O gráfico é plotado com o eixo vertical sendo a amplitude e o horizontal o tempo.

Muitas vezes o domínio do tempo não fornece informações suficientes para a análise do sinal, sendo difícil identificar regiões de impulsividade, sobretudo em sinais aleatórios. Isso é um problema, de modo que, a análise no domínio do tempo traz informação incompleta sobre o sinal. A partir disto, Jean Baptiste Fourier desenvolveu

um estudo que chegou à conclusão de que qualquer sinal de onda real pode ser gerado pelo somatório de ondas senoidais (WANG *et al.*, 2017).

A partir das séries e integrais de Fourier, que são ferramentas matemáticas usadas para representar sinais no domínio da frequência, é possível deduzir a Equação 7. Essa equação representa a transformada de Fourier para sinais discretos (KREYSZIG, 2011; WANG *et al.*, 2017).

Considere um sinal não-periódico digital $x(n)$, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, onde N é a quantidade das amostras. A equação exponencial complexa de Euler define que:

$$\exp\left(-j\frac{2\pi k}{N}\right) = \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - j\sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right), k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (5)$$

Para cada frequência k , a Equação 5 contém duas funções sinusoidais em que uma parte é real e a outra é imaginária, respectivamente, com diferença de fase $\pi/2$. As frequências das funções são os valores k . Quando $k = 1$, a função sinusoidal é chamada de fundamental. As funções sinusoidais de mais altas ordens são chamadas de harmônicas.

Seja a frequência

$$\Omega = \frac{2\pi k}{N} \quad (6)$$

onde k varia de 1 até $N-1$, como na Equação 5, e Ω de 0 a 2π .

A Transformada de Fourier para um sinal digital não periódico pode ser expressa como sendo

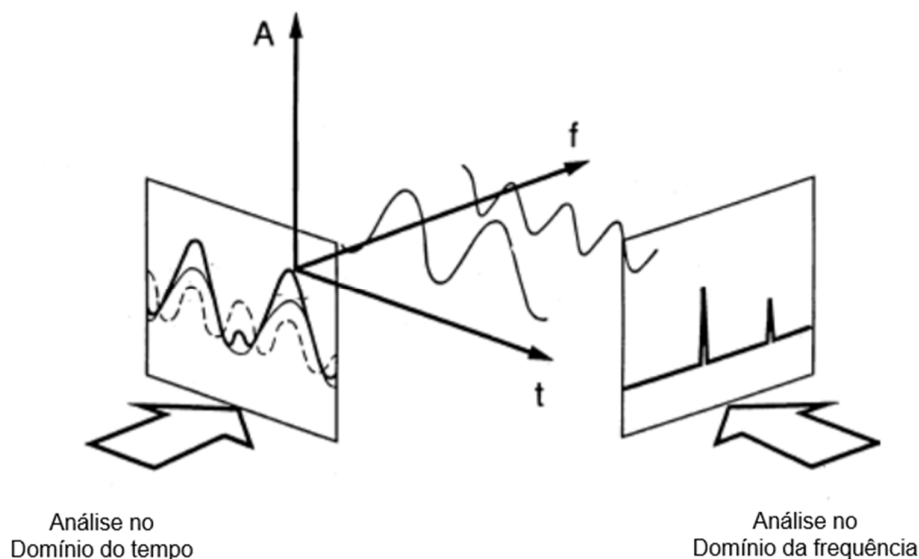
$$X(\Omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]\exp(-j\Omega n) \quad (7)$$

onde $X(\Omega)$ é o espectro de Fourier.

De acordo com Soares *et al.* (2015), diferentemente do domínio do tempo em que os métodos de análise apenas alertam sobre o surgimento e evolução dos problemas, a análise no domínio da frequência é capaz de fazer um diagnóstico mais preciso, indicando o local exato onde está ocorrendo a falha. Além disso, no domínio da frequência o sinal é representado apenas pelos seus parâmetros, estando implícita

a função temporal. No domínio temporal, pelo contrário, é necessário definir tanto os parâmetros quanto a função. A Figura 10 ilustra a diferença entre os dois tipos de análise.

Figura 10 – Diferença entre a análise de sinal para o domínio do tempo e da frequência.



Fonte: Adaptado de Soares *et al.* (2015).

São análises diferentes, porém possui uma relação entre elas, são duas perspectivas diferentes de se avaliar a mesma situação e uma pode ser obtida através da outra. Com a análise do domínio da frequência é possível isolar algumas informações que podem ser de difícil visualização no domínio do tempo. Desse modo, essas duas técnicas podem se complementar no estudo de sinais.

Os espectros de vibração e ruído produzidos pelas máquinas são originados por engrenagens, rolamentos, motores e assim por diante. A amplitude do sinal se relaciona com o estado técnico da máquina ou das peças de transmissão e podem ser identificados, logo, a análise espectral é uma ferramenta muito útil para diagnósticos de máquinas (TUMA, 2014). Cada mancal possui uma frequência característica de trabalho, e quando alterada é possível identificar a falha, mesmo antes da quebra do componente.

As técnicas de identificação de frequência possibilitam verificar o surgimento e a localização das falhas nos mancais, diferentemente das técnicas de identificação

do domínio de tempo, que só verificam se há falhas. Contudo, nem toda técnica que utiliza o domínio de frequência possibilita identificar o tipo de falha (ALMEIDA, 2016).

A utilização da técnica de análise de mancais através da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT) é empregada há muitos anos (RAI e UPADHYAY, 2016), ela pertence aos 10 principais algoritmos com a maior influência no desenvolvimento e prática da ciência e engenharia no século XX (TUMA, 2014).

A FFT possui menor complexidade matemática, de modo que utiliza um menor esforço computacional quando comparada com a transformada de Fourier (ALMEIDA, 2016). Ela mudou completamente a natureza do processamento de sinal e a maneira de trabalho (ALLEN e MILLS, 2004).

O estudo do espectro de frequência pode vir a complementar uma análise no domínio do tempo. Jesus e Cavalcante (2011) verificaram que para pequenos desalinhamentos o valor *RMS* não apresentou grandes modificações. Isso ocorre devido as folgas internas dos mancais de deslizamento que acabam compensando o desalinhamento mínimo. Esse valor então só passa a crescer quando o desalinhamento aumenta consideravelmente. O espectro de frequência por sua vez pode ser utilizado para caracterizar o tipo de desalinhamento, já os valores de pico (amplitudes máximas) se mostraram bons indicadores para a situação estudada. Picos acentuados nas direções radiais foram percebidos mesmo com o nível de desalinhamento baixo.

Melo (2017) verificou a resposta através do espectro de frequência para rotores desalinhados. Para cada nível de desalinhamento foi observado um espectro de frequência característico, com valores de picos aumentando conforme foi aumentado o desalinhamento.

Em máquinas rotativas, a frequência característica de uma falha é um recurso amplamente utilizado durante o acompanhamento e diagnóstico de falha em máquinas rotativas, isso por que a vibração gerada se repete periodicamente, uma vez que a rotação é um valor constante (DALPIAZ, 2000).

2.4 Arduino

Iniciado em 2005 na Itália, o projeto Arduino foi impulsionado pela pesquisa do professor Massimo Banzi para solucionar a necessidade de seus alunos em trabalhar com tecnologia de forma simples e de baixo custo. Banzi em conjunto com sua equipe decidiu então criar um microcontrolador que custasse ao estudante o equivalente ao valor de um bom jantar. Mais tarde, o dispositivo foi batizado de Arduino (SOUZA, 2016).

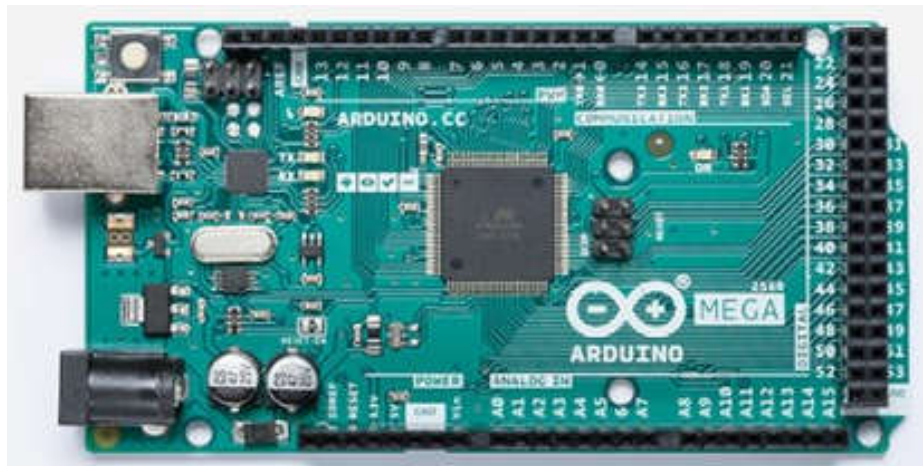
As plataformas de *hardware* livres, como o Arduino, caracterizados pelo preço baixo, versatilidade, facilidade de programação e o volume de material disponibilizado de forma gratuita vem se tornando ferramentas fundamentais para o ensino e desenvolvimento da engenharia. O controlador lógico possui uma infinidade de aplicações que podem ser programadas rapidamente e com um custo bem acessível (CANDELAS, 2015). No Brasil, alguns modelos de microcontroladores mais usados foram o basic step, o PIC e recentemente o Arduino (PEREIRA, 2017).

O baixo custo, a facilidade e a quantidade de informações aberta ao público e sua plataforma livre para programação permitem que o equipamento possa ser aplicado tanto na indústria quanto na academia.

Com o passar dos anos, os microcontroladores estão ficando cada vez mais populares. No passado tinham um custo muito elevado, mas com o advento da tecnologia essa questão vem sendo solucionada. Sua utilização não se restringe apenas a executar um serviço, mas também em elevar a eficiência do sistema (PEREIRA, 2017).

Em termos práticos, o Arduino é um pequeno computador que pode ser programado para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele (SOUZA, 2016). O microcontrolador possui diversos modelos, a Figura 11 mostra o Arduino Mega 2560. Ele pode ser conectado a LEDs, displays (mostradores), botões, interruptores, motores, sensores de temperatura, sensores de pressão, sensores de distância, receptores GPS, módulos Ethernet ou qualquer outro dispositivo que emita dados ou possa ser controlado (MCROBERTS, 2011).

Figura 11 – Arduino Mega 2560.



Fonte: Arduino (2018).

Devido ao seu baixo custo e a facilidade de obtenção de material de forma aberta, ele vem sendo aplicado cada vez mais em pesquisas como alternativa de trabalho em meio às dificuldades de obtenção de recursos para fins acadêmicos. Pereira (2017) estudou a aplicação do Arduino no controle de sistemas de bombeio de água para irrigação, com a utilização do modo automatizado, verificou uma economia de até 40% no consumo energético se comparado com o modo manual convencional.

Patricio (2017) utilizou o Arduino Uno em conjunto com extensômetros elétricos resistivos para a confecção de um equipamento para medir deformações e fornecer a curva tensão deformação dos materiais. Obteve um desempenho similar ao equipamento comercial e com uma enorme vantagem no quesito custo, o sistema desenvolvido por ele apresentou um custo de mais de cinquenta vezes inferior ao encontrado no mercado.

As áreas de pesquisas que utilizam o Arduino são as mais diversas. Chagury (2017) propôs um protótipo para correção de fator de potência em baixa tensão, Salles (2017) desenvolveu um dispositivo de medição de ruído com base no sistema OpenWrt do Linux, Francisco (2017) simulou o controle de processos industriais com o auxílio do microcontrolador. Estes são apenas alguns exemplos de trabalhos que estão sendo desenvolvidos com o auxílio do microcontrolador. As aplicações vão bem além, na robótica, biologia, química, saúde, engenharia, ou seja, qualquer área que seja necessário, o dispositivo poderá ser utilizado.

Para este trabalho foi utilizado o Arduino Mega 2560 em função da sua capacidade de processamento e número de portas analógicas e digitais que são superiores quando comparado com os demais modelos.

Em síntese, esse capítulo tratou de informações básicas que serão necessárias na metodologia e discussões. O estudo se desenvolveu em um equipamento que trabalha com o bombeio de água em poços artesianos, cujo nome é conjunto motobomba submersa, formado pela junção de uma bomba e um motor elétrico, alvo do estudo.

O motor elétrico possui mancais de deslizamento hidrodinâmico. Vários estudos acerca de materiais e perfis de contato estão sendo desenvolvidos nesses componentes.

Para a avaliação de desgaste por meio do estudo de sinais de vibração foi utilizado o Arduino que é uma plataforma de hardware livre que possui uma infinidade de aplicações com baixos custos. Através dele e o sensor MPU 6050 é possível desenvolver um sistema de aquisição de dados de baixo custo para formular uma metodologia de manutenção preditiva. Este tipo de manutenção pode ser aplicada para a redução de custos e aumento da produtividade dos equipamentos.

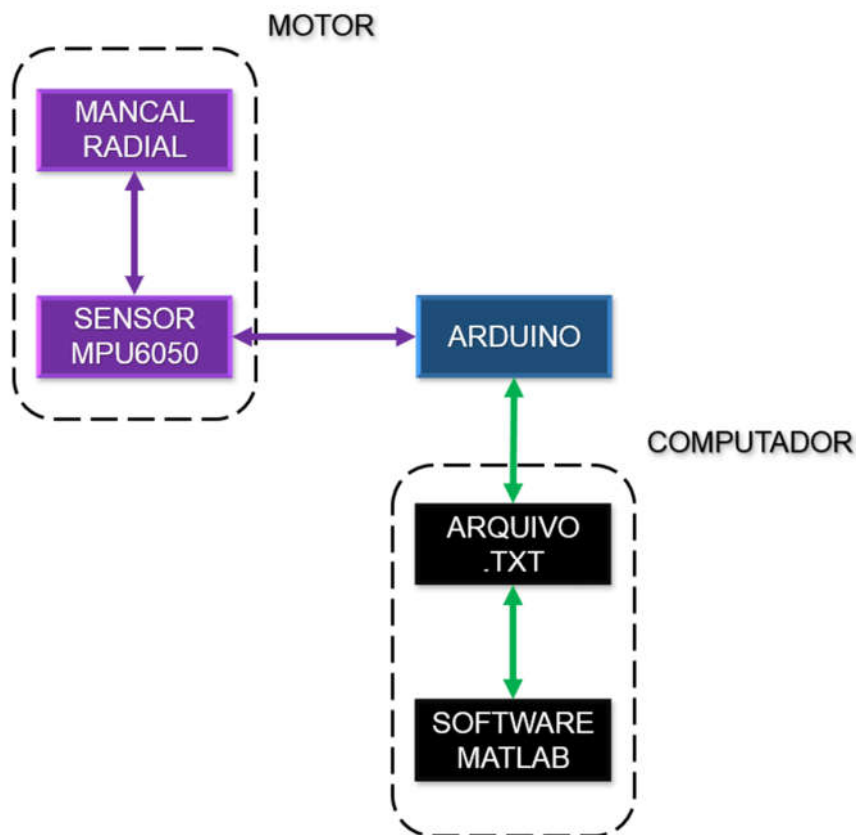
Essa metodologia pode ser desenvolvida com o auxílio de ferramentas matemáticas para o tratamento dos sinais oriundos do sistema de aquisição. As mais usuais são as do domínio do tempo e da frequência.

3 Metodologia

O motor do conjunto motobomba submersa utilizado nos ensaios trabalha submerso em água. Porém, o estudo foi desenvolvido com o motor fora da água. Para isso foi necessário retirar o equipamento de seu meio de trabalho, realizar o desacoplamento do motor e bombeador e posteriormente seguir o estudo com o motor. O tipo de análise proposta por esse trabalho pode ser feita na prática durante procedimentos de manobra de equipamentos. O motor então foi posto para ensaio conforme os procedimentos de verificação de qualidade realizados na fábrica da EBARA.

O trabalho foi desenvolvido com base no fluxograma do módulo experimental apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma do módulo experimental.



Fonte: Autoria própria.

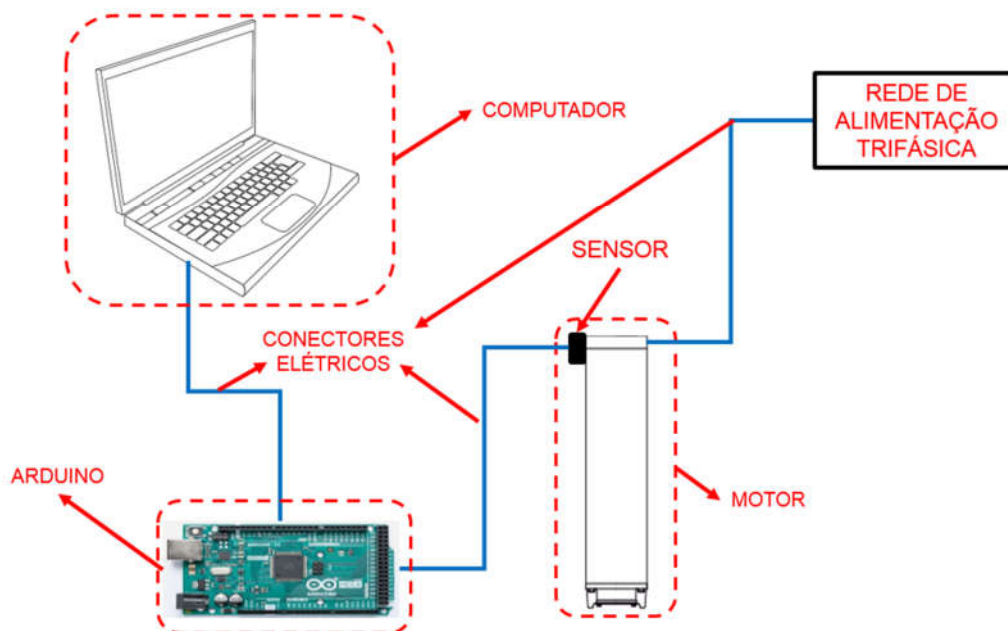
O fluxograma da Figura 12 apresenta um sistema de aquisição e tratamento de sinais vibracionais. Consiste em três módulos básicos: o primeiro é o motor que

possui o acelerômetro MPU6050 anexado ao seu mancal radial superior, o segundo é o Arduino que possui ligação elétrica com o sensor e com o computador, que é o terceiro módulo.

Em síntese, o sensor capta os sinais vibracionais do motor, envia para o Arduino, que por sua vez, comunica-se com o computador através de uma porta USB e as informações podem ser obtidas com auxílio do *software* do Arduino e armazenadas em um bloco de notas de extensão .txt. Este bloco pode ser introduzido no *software* Matlab® e as informações trabalhadas para a obtenção dos padrões vibracionais.

O esquema das ligações feitas no procedimento experimental é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Esquema de ligação do procedimento experimental.



Fonte: Autoria própria.

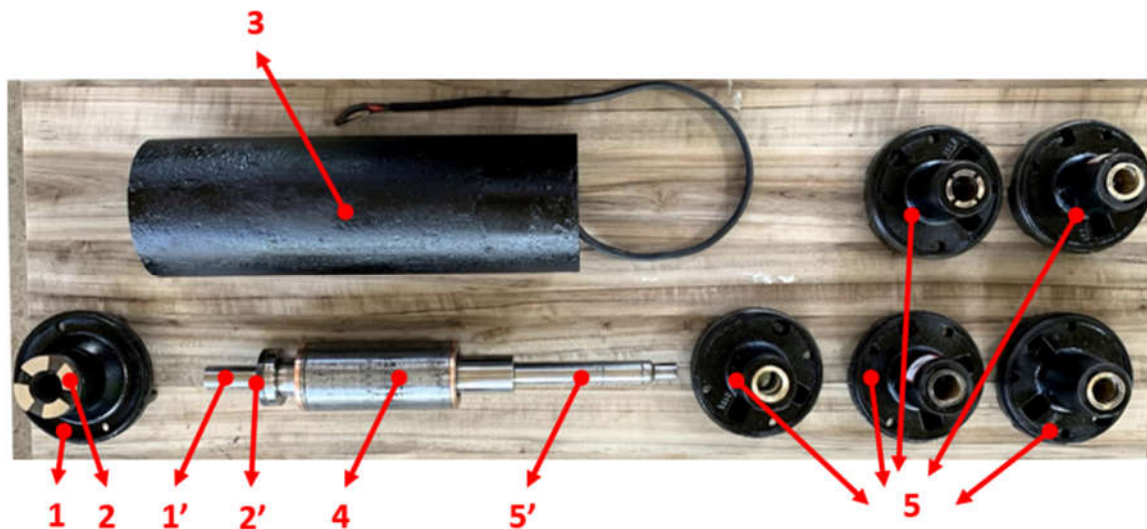
O computador é conectado ao Arduino através da comunicação USB. O Arduino é conectado ao sensor MPU6050 por meio de uma ligação de quatro fios ilustrados na Figura 17 e que são representados por um único conector na Figura 13. O sensor, por sua vez, é conectado ao mancal radial superior do motor por meio de

abraçadeiras com isolamento elétrico. O motor, então, é ligado na rede elétrica trifásica.

Com relação ao motor, os pares tribológicos mais utilizados nos mancais radiais são: Liga com grafite (não metálico) e aço inoxidável SAE 410 e liga de Bronze SAE 64 com aço inoxidável SAE 410. O fluido utilizado para realizar a lubrificação é uma mistura de água e óleo polipropileno glicol em 15%.

O motor escolhido para o experimento foi o modelo M6P com 510 mm de comprimento, de 4 hp, trifásico, tensão 380 V, de 2 pólos com rotação nominal de 3450 rpm, rendimento de 79% formado por uma carcaça de aço carbono, eixo de aço inoxidável SAE 410 e mancais de deslizamento em Bronze SAE 64. O conjunto de elementos que integram o motor são apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Elementos do motor.



- 1 – Mancal radial inferior;
- 1' – Local de trabalho do mancal radial inferior (eixo de aço SAE 410);
- 2 – Mancal axial;
- 2' – Local de trabalho do mancal axial (mancal de grafite lapidado);
- 3 – Estator;
- 4 – Induzido;
- 5 – Mancal radial superior, objeto do estudo;
- 5' – local de trabalho do mancal radial superior (eixo de aço SAE 410).

Fonte: Autoria própria.

O mancal radial inferior é composto por uma carcaça em ferro fundido e em seu interior existe um material de desgaste em Bronze SAE 64 que trabalha em conjunto com o eixo do induzido (item 1' da Figura 14).

O mancal axial é formado pelo par tribológico SAE 410, item 2, e grafite lapidado, item 2'. O induzido é composto por uma gaiola de material condutor de eletricidade inserida dentro de um material ferromagnético. Ele trabalha dentro do estator, que por sua vez possui bobinas condutoras de eletricidade inseridas, também em um material ferromagnético.

O mancal alvo do estudo foi o radial superior do motor do conjunto motobomba submersa, apresentado no item 5 da Figura 14. Ele é constituído pelo mesmo material do mancal radial inferior.

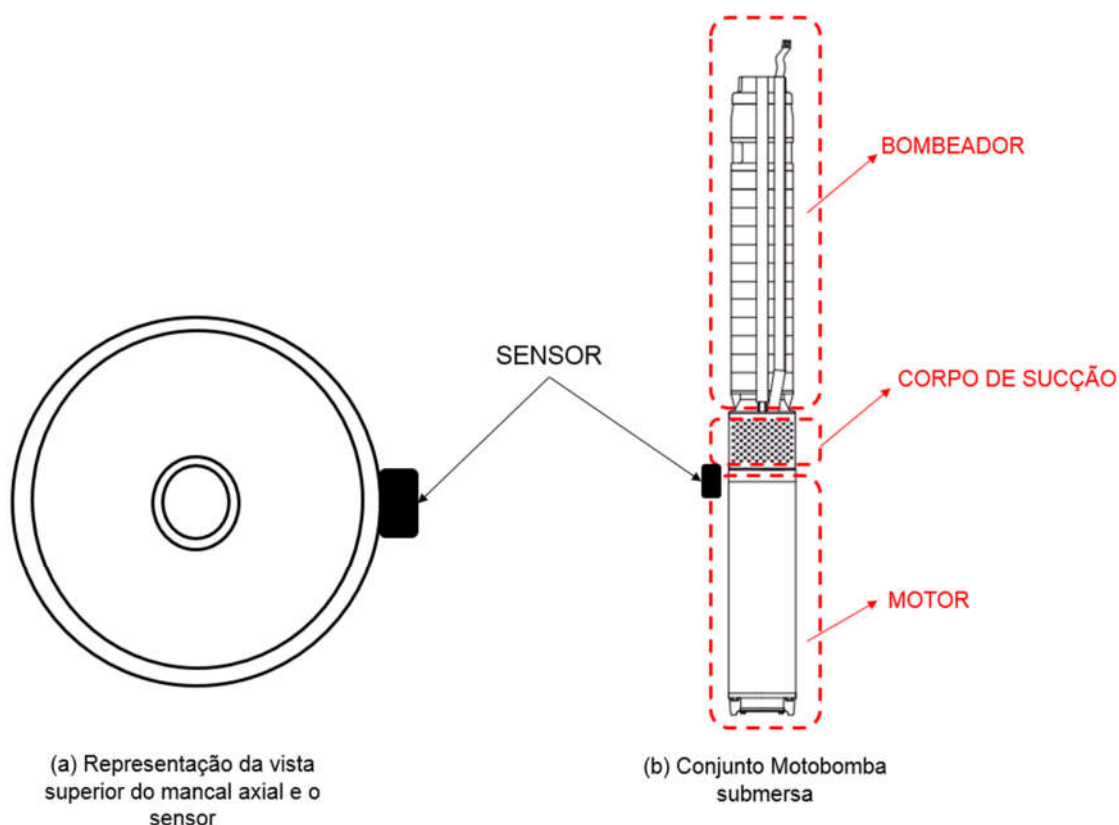
Com relação ao Arduino, o modelo utilizado no experimento e representado esquematicamente na Figura 13, é do tipo Mega 2560. Ele é uma placa de microcontrolador desenvolvida para projetos complexos, possui 54 pinos de entrada / saída digital, onde 15 destes podem ser usados como saída PWM, 16 entradas analógicas, 4 UARTs (portas seriais de hardware), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão USB, uma tomada de força e um botão de reinicialização (ARDUINO, 2018). A placa Mega 2560 pode ser programada com o software do Arduino.

O acelerômetro utilizado no experimento MPU6050 é um dispositivo que permite a verificação das acelerações e o giro nos três eixos e, ainda, a aquisição da temperatura. Chan e Huang (2017) definem o sensor MPU6050 como um circuito integrado que contém um acelerômetro triaxial e um giroscópio triaxial. O circuito integrado do acelerômetro é do tipo *MEMS (Micro Electro Mechanical Systems - sistemas microeletromecânicos)* e possui o sensor inercial GY-521, que é pequeno (cerca de 1 cm³) e leve (aproximadamente 18 gramas).

O circuito integrado MPU6050 possui um conversor analógico-digital (ADC) integrado de 16 bits que codifica sinais analógicos em 2¹⁶ níveis de saída discreta de -32768 a +32768. Enquanto o número de níveis de saída é constante, quatro faixas de medição (± 2 g, ± 4 g, ± 8 g e ± 16 g) estão disponíveis. A resolução da medição é diminuída se a faixa de medição aumentar (CHAN e HUANG, 2017).

Este sensor foi anexado ao mancal radial superior conforme a ilustração apresentada na Figura 15. Esse posicionamento foi definido com base na facilidade de acesso ao local. A fixação foi realizada com o auxílio de fios de cobre para garantir a rigidez necessárias para o experimento.

Figura 15 – Posicionamento do sensor MPU6050 no mancal axial do motor.



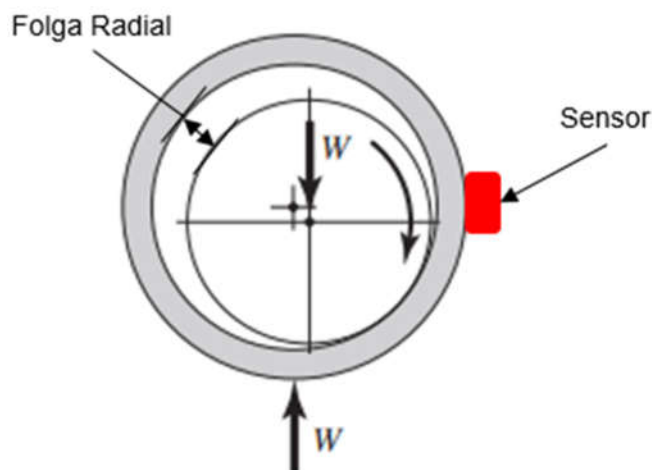
Fonte: Adaptado de EBARA (2018).

Para o estudo foram utilizados quatro mancais radiais usinados em um torno mecânico para a obtenção de quatro espaçamentos distintos entre as interfaces deslizantes (folga). Foram usados os espaçamentos de: 0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm e 1.0 mm. O valor de 0.1 mm é o definido por fábrica para que o conjunto funcione adequadamente. Os espaçamentos de 0.2 mm, 0.5 mm e 1.0 mm são valores que simulam o desgaste natural dos mancais. A Figura 16 representa a folga/espaçamento dos mancais e o posicionamento do sensor no mancal.

É importante destacar que esses desgastes simulados são representativos, uma vez que, segundo Norton (2013), de acordo com a distribuição de pressão nos mancais de deslizamento hidrodinâmico, os desgastes nesses dispositivos não

ocorrem de forma uniforme. A verificação da aplicabilidade desse modelo representativo de desgaste foi avaliada no estudo de caso realizado.

Figura 16 – Representação da folga radial induzida no mancal radial.



Fonte: Adaptado de Budynas (2011).

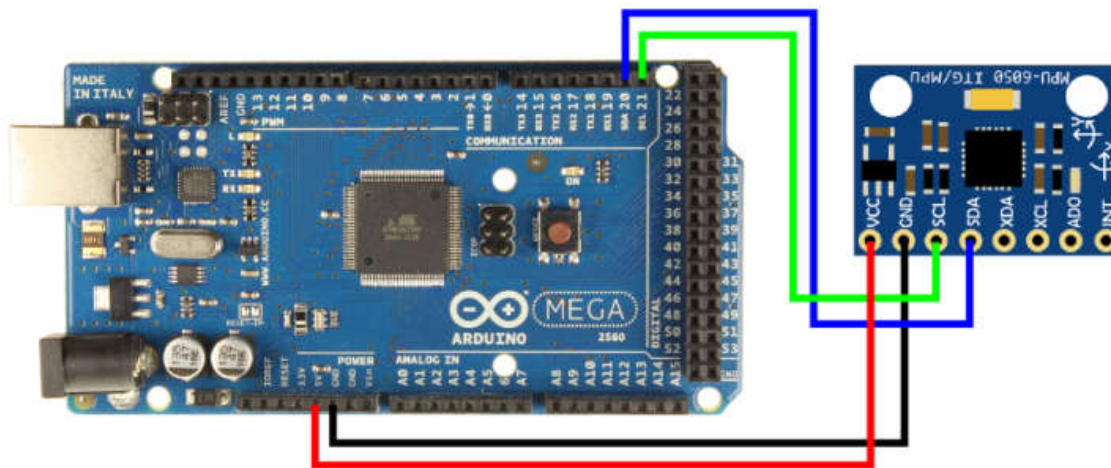
Para cada situação o conjunto foi ensaiado 6 vezes durante 3 minutos. Desse modo, a duração de ensaio para cada caso foi de 18 minutos e 90 minutos efetivos de ensaio para os cinco mancais. Entre os ensaios foi necessário um intervalo de 20 minutos para que o motor resfriasse e permitisse uma nova partida elétrica.

O tempo de ensaio foi definido através de testes com os dispositivos. Foi verificado que durante a partida do motor havia um tempo de acomodação e estabilização do sinal e se o motor funcionasse por mais do que o tempo estabelecido ele aquecia de forma significativa implicando na qualidade do sinal captado. O tempo entre as partidas dos motores foram estimados seguindo a mesma metodologia. A orientação do fabricante é que não sejam realizadas partidas consecutivas em um período menor que 10 minutos. Porém, para garantir a mesma temperatura dos ensaios foi utilizado o intervalo de 20 minutos.

Oliveira *et al.* (2016) conseguiram uma configuração do Arduino em conjunto com o sensor MPU6050 que foi capaz de obter uma taxa máxima de aquisição de 130 amostras por segundo. No estudo em questão a programação foi simplificada. Utilizou-se o mínimo necessário de blocos de programação e a verificação dos valores

obtidos pelo sensor foi feita em conexão direta com o computador a partir da porta USB, com isso foi possível aumentar a taxa de amostragem para 380 amostras por segundo. A conexão elétrica do Arduino com o acelerômetro é mostrada na Figura 17.

Figura 17 – Esquema elétrico da ligação do Arduino com o sensor.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 17 mostra a conexão USB que é realizada através do *Slot* posicionado no canto superior esquerdo do Arduino. De acordo com Oliveira *et al.* (2016), esse tipo de comunicação é o que limita a comunicação do Arduino com o computador e conseqüentemente limita a taxa de aquisição.

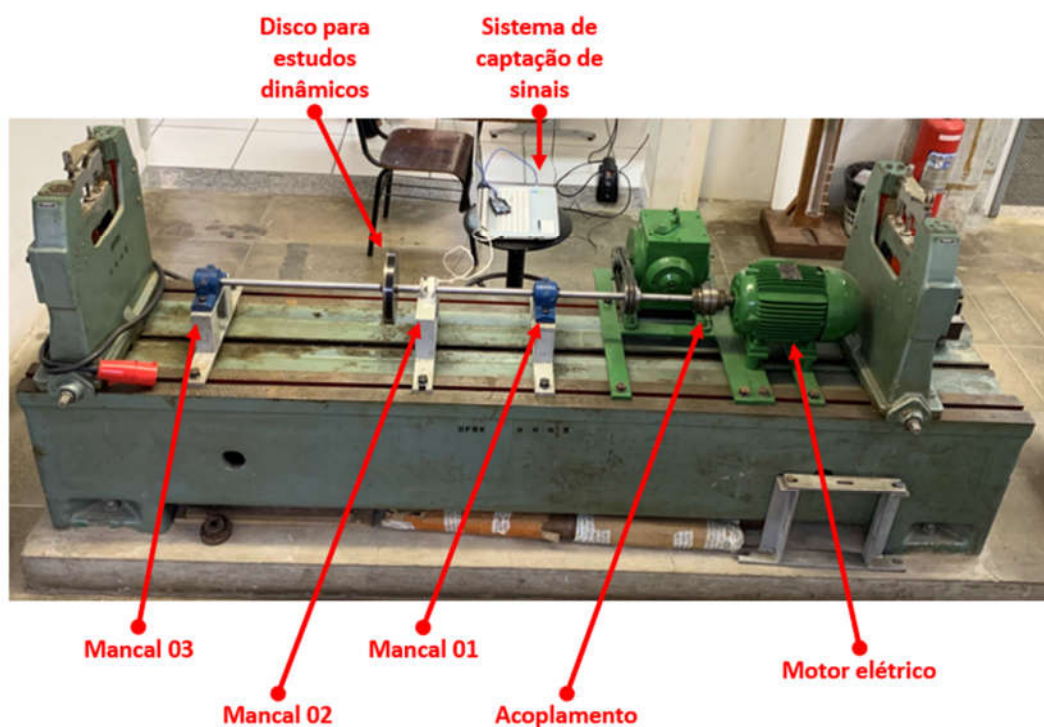
São necessários 4 cabos para a sua conexão à placa, o cabo vermelho está fornecendo energia para a placa, conectando a saída de 5V do Arduino ao pino VCC do sensor. O cabo preto é responsável pela ligação do ponto comum, conectando os dois terminais GND presentes na placa do Arduino e no sensor. Os cabos verde e azul são responsáveis por conduzir a comunicação através do protocolo I2C entre a placa do Arduino e o sensor. O cabo azul conecta os pinos SDA presentes na placa e no sensor enquanto o cabo verde conecta os pinos SCL. SDA e SCL significam Dados Seriais e Relógio Serial. O pino SDA efetivamente transfere dados e o SCL serve para temporizar os dispositivos.

Os resultados foram plotados por meio do monitor serial do *software* do Arduino, em seguida, exportados para um arquivo de formato .txt. Posteriormente utilizados no *software* Matlab® em forma de vetores para então serem processados e

fornecerem os valores de RMS, pico, fator de crista, fator de curtose e o espectro de frequência.

O sistema de aquisição foi verificado nas dependências do Laboratório de Tribologia da UFRN. O objetivo desse procedimento foi identificar padrões semelhantes entre o dispositivo utilizado para a execução desse trabalho e um já calibrado por meio da comparação dos gráficos dos sinais. A Figura 18 apresenta como os equipamentos foram montados.

Figura 18 – Equipamentos utilizados na validação.



Fonte: Autoria própria.

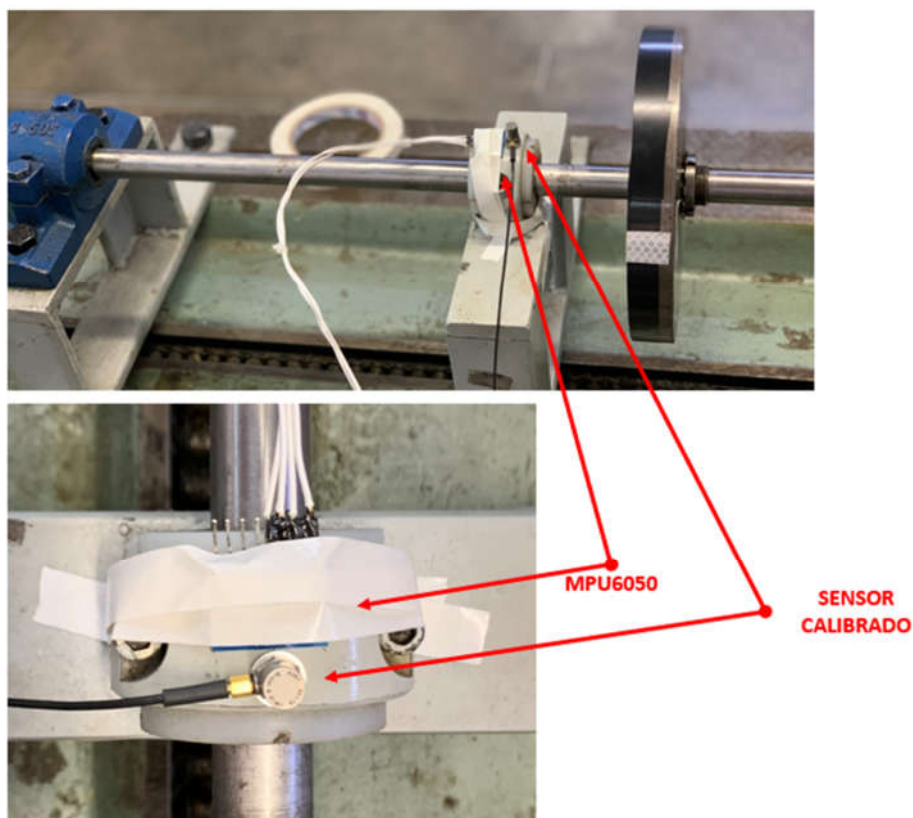
Foi utilizada uma bancada dotada de 03 mancais, um disco para estudos dinâmicos, um eixo e um motor elétrico controlado por um inversor de frequência. No disco para estudo dinâmico foi induzido um desbalanceamento com uma massa de 50g.

O sistema de aquisição desenvolvido nesse estudo foi fixado ao lado de um sensor calibrado pertencente ao laboratório. Este sensor é o acelerômetro DeltaTron®

do tipo 4397. Ele é do tipo piezoelétrico, uniaxial, pesa 2,4 g, possui amplitude de faixa de frequência de 1 Hz a 25 kHz e frequência de ressonância de 66 kHz.

A fixação do sistema e o posicionamento dos sensores são mostrados na Figura 19. O sensor do laboratório foi ligado ao computador do laboratório que possui o *software* adequado para ele. O sensor MPU 6050 e Arduino foram ligados a um outro computador que possui o *software* do Arduino.

Figura 19 – Fixação dos sensores para a comparação.



Fonte: Autoria própria.

Os dois sistemas de aquisição foram ajustados para uma taxa de aquisição de 380 Hz. O motor foi colocado para funcionar em uma rotação de 20 Hz. Os dados foram coletados durante 20 segundos e ambos passaram pelo mesmo sistema de tratamento de sinais já mencionado. Eles foram exportados para uma planilha no formato *.txt* e utilizados no *software* Matlab® para a obtenção do espectro de frequência. Os dois sistemas de aquisição foram então comparados e os resultados serão apresentados no próximo capítulo.

4 Resultados e discussões

A primeira parte dos resultados tratará da comparação dos resultados obtidos no laboratório do GET e do dispositivo desenvolvido para esse estudo. Este é um importante passo para aumentar a confiabilidade dos dados coletados.

Posteriormente, os resultados e discussões desse estudo propriamente dito serão apresentados. *A priori* todos os resultados de forma individual, para cada condição de funcionamento. Em seguida, esses valores serão debatidos na seção de discussão e na sequência será elaborada uma metodologia de diagnóstico.

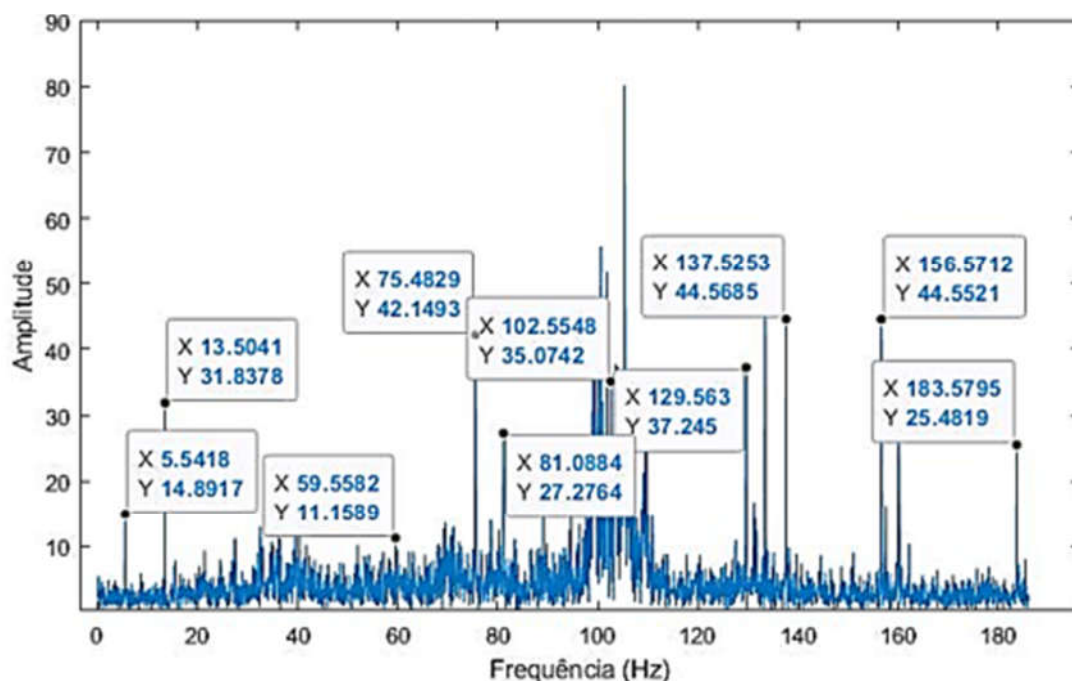
É importante destacar que para cada condição de funcionamento foram realizados 6 experimentos e isso que provocou a variação nos resultados. Todos os valores de amplitude estão em unidades próprias do Arduino, (LSB/g). Os valores médios, mínimos e máximos apresentados foram calculados com base em um intervalo de confiança de 95%. Com relação ao espectro de frequência, para cada condição de funcionamento foi escolhido um gráfico representativo.

4.1 Resultados da comparação

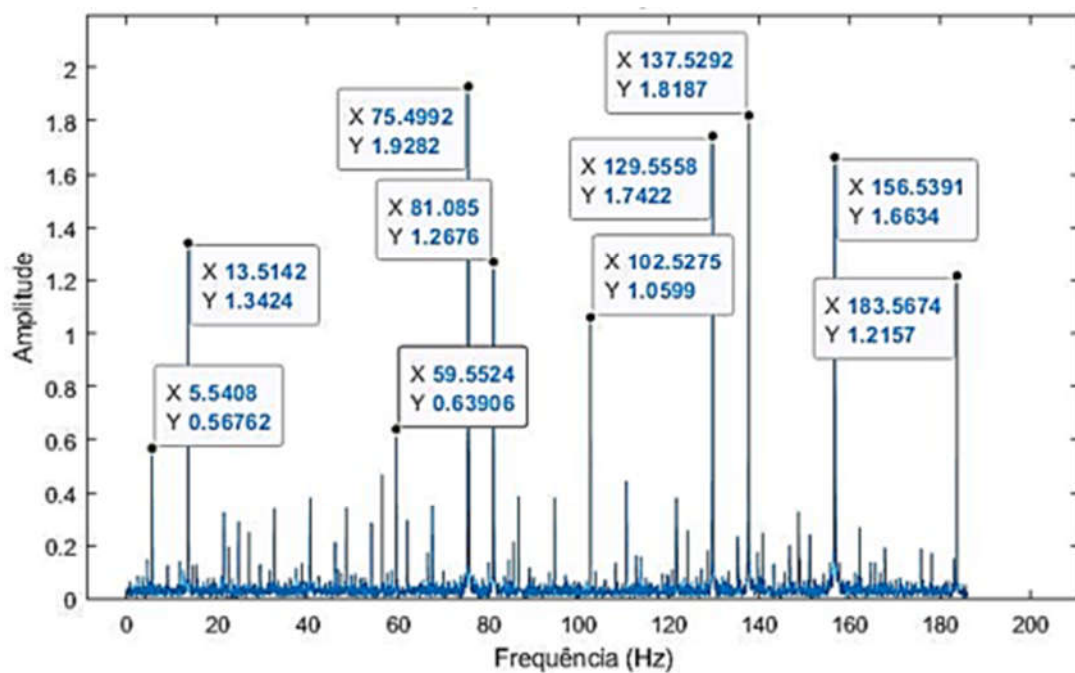
Os dois espectros de frequência obtidos foram comparados na Figura 20. Vale ressaltar que os dois gráficos possuem diferentes unidades de amplitude, o sistema de aquisição do laboratório é em gravidade e o sistema baseado em Arduino é em bits menos significativos por gravidade (LSB/g). A comparação foi feita com base nas principais frequências obtidas do sinal. O gráfico “a” foi gerado por meio dos sinais obtidos pelo MPU6050 e o gráfico “b” pelo sensor do laboratório. Foi possível identificar várias semelhanças entre os dois gráficos.

Para as 10 maiores amplitudes notadas no gráfico “a”, 8 delas foram identificadas com facilidade no gráfico “b”. São elas: 5, 13, 75, 81, 102, 137, 156 e 183 Hz. Esses valores podem ser verificados através dos quadros com as coordenadas contidos nos gráficos, em que “X” representa a frequência e “Y” a amplitude. As amplitudes nas frequências de 59 e 129 Hz foram identificadas com dificuldade no gráfico “b”. A primeira não teve notória diferença de amplitude em relação as adjacentes e a segunda está situada em uma faixa com vários picos adjacentes, dificultando assim sua identificação.

Figura 20 – Comparativos dos espectros de frequência da validação.



(a) Espectro de frequência obtido através do Arduino e o sensor MPU 6050



(b) Espectro de frequência obtido através do sistema de aquisição do laboratório de Tribologia da UFRN

Fonte: Autoria própria.

Logo, considerando as 10 maiores amplitudes fornecidas pelo gráfico “b”, foi constatado que o sistema de aquisição de baixo custo obteve 80% de compatibilidade com o sistema calibrado e aferido do laboratório de Tribologia da UFRN.

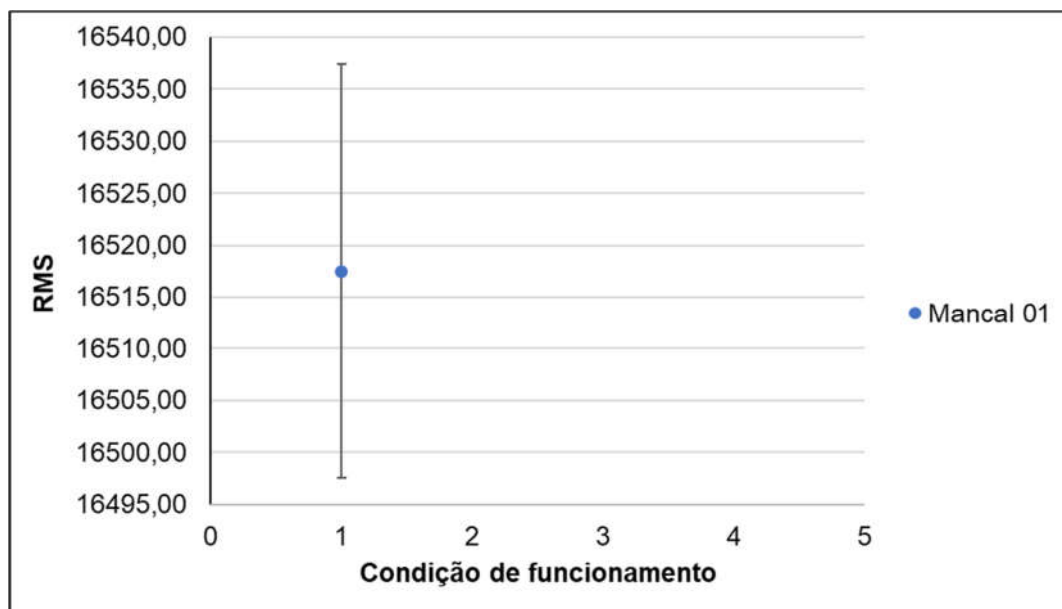
Duas diferenças bem notórias entre os gráficos são o ruído em toda extensão e um comportamento bem disperso em torno de 100 Hz observado no gráfico da esquerda. Essas discrepâncias foram atribuídas a dois principais motivos: o primeiro é com relação a fixação do sensor no mancal, realizado por fitas. O sensor do laboratório possui uma base magnética que permite uma fixação bem melhor do que a utilizada para o sensor MPU6050 e o segundo motivo está relacionado à estrutura física do sensor MPU6050, sendo ela bem menos rígida do que a do sensor do laboratório.

Com base nos valores obtidos no gráfico da Figura 20, o sensor MPU6050 se mostrou eficaz, conseguindo reproduzir um espectro de frequência semelhante ao do sensor calibrado do laboratório da UFRN. Desse modo, a comparação mostrou que o dispositivo desenvolvido nesse trabalho possui resultados satisfatórios.

4.2 Resultados do experimento com o motor

A seguir serão apresentados os resultados da análise RMS dos mancais. A Figura 21 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao valor RMS do mancal 01.

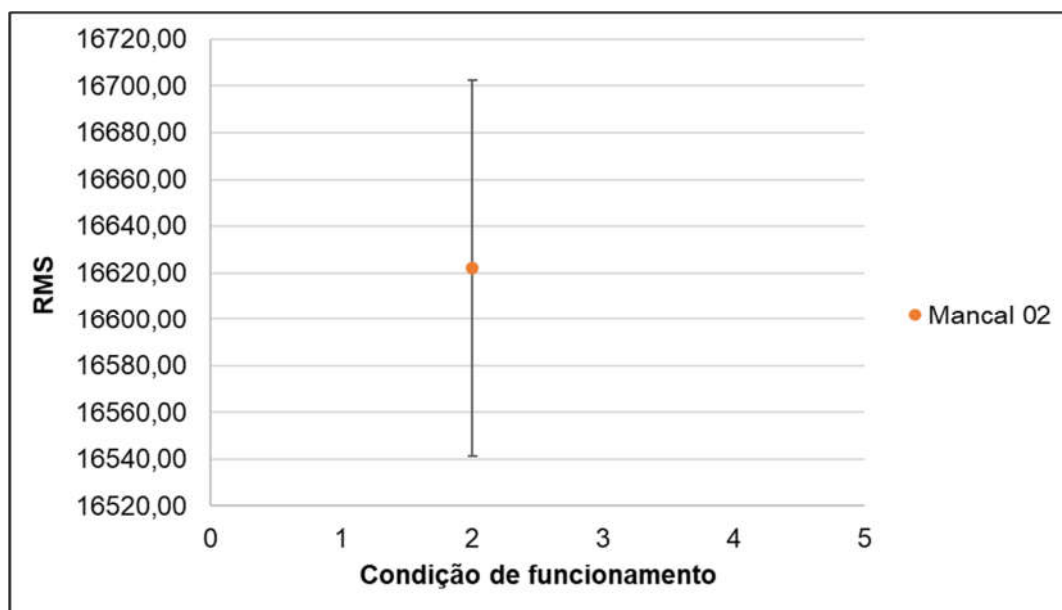
Figura 21 – Valor médio eficaz, RMS, mancal 01.



Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 16517,50 LSB/g, 16497,6 LSB/g para mínimo e 16537,4 LSB/g para máximo. A Figura 22 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao valor RMS do mancal 02.

Figura 22 – Valor médio eficaz, RMS, mancal 02.

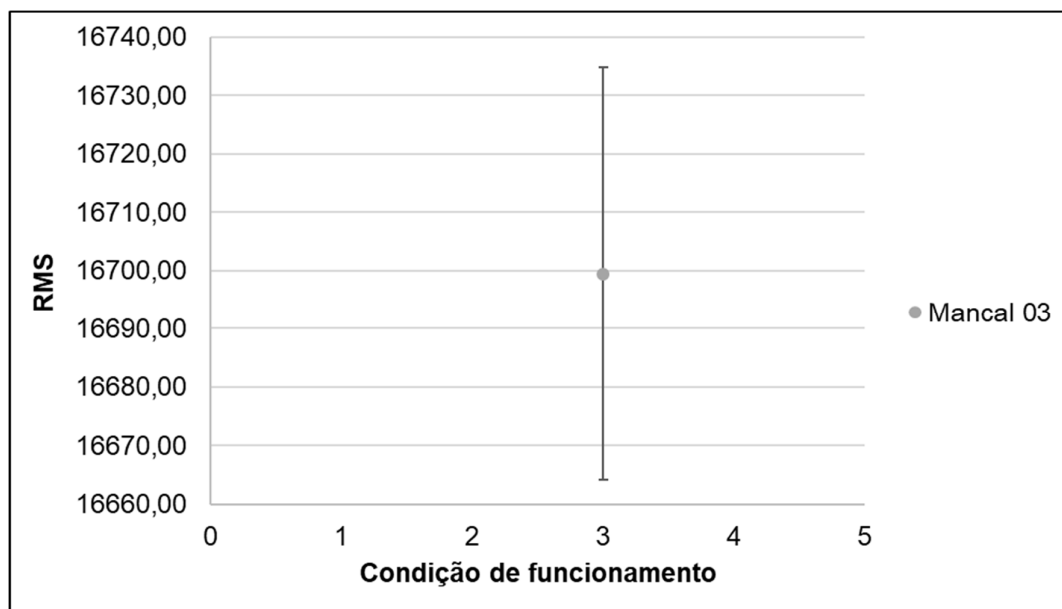


Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 16622,1 LSB/g, 16541,5 LSB/g para mínimo e 16702,7 LSB/g para máximo.

A Figura 23 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao valor RMS do mancal 03.

Figura 23 – Valor médio eficaz, RMS, mancal 03.

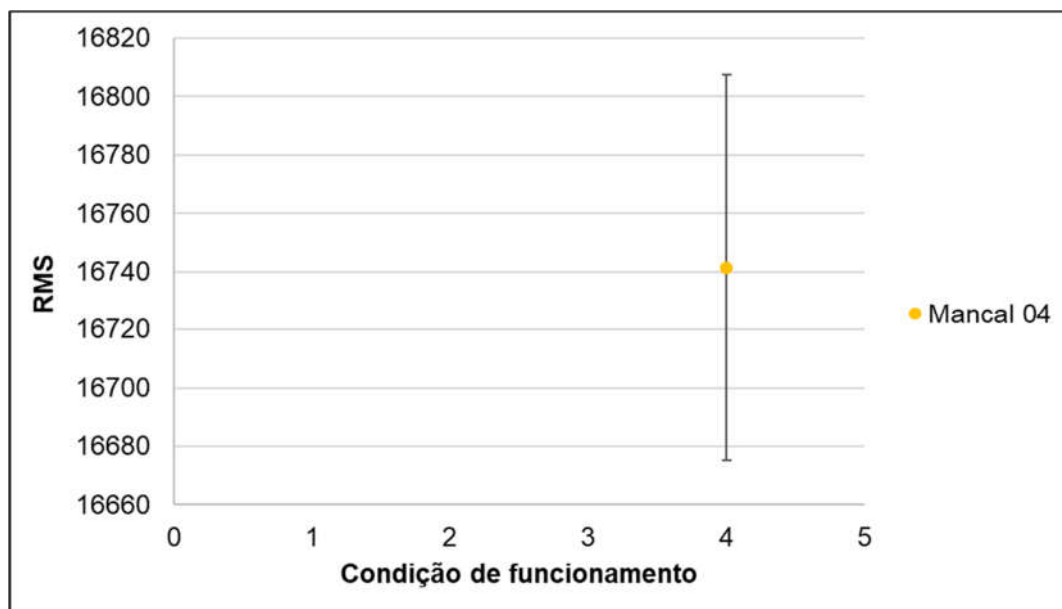


Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 16699,5 LSB/g, 16664,1 LSB/g para mínimo e 16734,9 LSB/g para máximo.

A Figura 24 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao valor RMS do mancal 04. O valor médio obtido foi de 16741,33 LSB/g, 16675,36 LSB/g para mínimo e 16807,3 LSB/g para máximo.

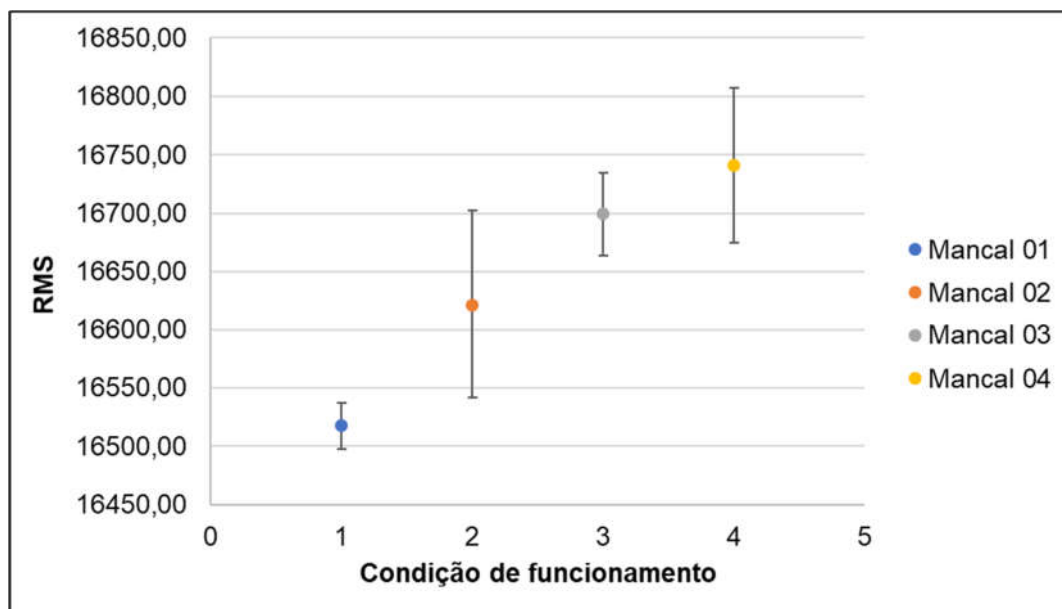
Figura 24 – Valor médio eficaz, RMS, mancal 04.



Fonte: Autoria própria.

A partir dos gráficos apresentados foram detectados alguns padrões que concordam com a literatura com relação ao valor RMS que é crescente em função do aumento do desgaste. A Figura 25 apresenta um gráfico comparativo das quatro condições de funcionamento estudadas nesse trabalho.

Figura 25 – Evolução do valor RMS em função do aumento da folga radial do mancal.



Fonte: Autoria própria.

Percebe-se um incremento do valor RMS com o aumento do desgaste induzido (folga). Tratando-se de valores médios, da condição 01 para a condição 02 o aumento foi de 104 LSB/g, da condição 03 em relação a 01 foi de 182 LSB/g e da condição 04 em relação a 01 foi de 223 LSB/g.

Esses valores mostram que quanto maior o nível de folga dos mancais, maior é a energia dissipada em forma de vibração. Esse aumento da energia perdida reflete na diminuição da eficiência do motor. Como reflexo dessa situação, o sistema termina aumentando o nível da corrente elétrica que percorre as bobinas do motor na tentativa de compensar o valor perdido.

Os valores obtidos nesse trabalho são similares com estudos de diversos outros autores sobre a vibração dos sistemas, como Poddar e Tandon (2019) que estudaram a resposta do Valor RMS em mancais com a presença de particulados. Verificaram que quanto maior o particulado e maior a quantidade presente nos mancais de deslizamento, maiores são os valores RMS e menor é a eficiência do sistema.

Liang *et al.* (2016) estudaram a resposta do valor RMS com relação a defeitos em dentes de engrenagens que a depender do dente avariado, possuía um valor distinto. Já Skrimpas *et al.* (2017) verificaram que esse valor é eficaz para a identificação de falhas distribuídas.

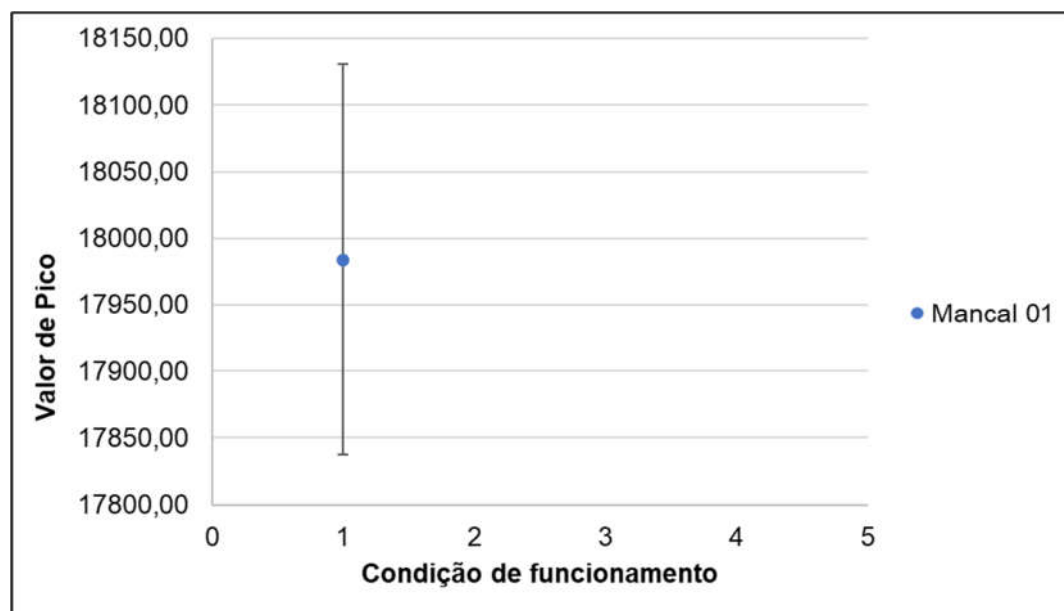
Igba *et al.* (2016) foram além, conseguiram identificar falhas em aerogeradores com até um mês de antecedência, apenas identificando o incremento do valor RMS em tempo real. Traçaram linhas de tendências e conseguiram prever falhas com bastante antecedência. Zimroz *et al.* (2014) trabalharam na mesma linha de Igba *et al.* (2016), aplicaram regressões lineares para a previsão de falhas em rolamentos de aerogeradores.

Já foi comprovado que o valor RMS pode ser utilizado para a verificação de falhas em mancais, a ressalva desse trabalho é com relação ao erro que ditam os valores mínimos e máximos apresentados no gráfico da Figura 25. É possível perceber zonas que coexistem, como por exemplo, valores que estão entre as condições 02 e 03.

Em uma hipótese, o valor identificado no equipamento analisado é 16680 LSB/g. Nesse caso não é possível utilizar o gráfico para predizer qual a condição de folga, mas pode-se verificar que ele não está mais operando em condições de ajustes de fábrica. Ou seja, nesse caso, a análise do valor RMS informa que já há um nível de desgaste, mas não consegue informar qual nível é esse. Logo, o estudo de outras grandezas estatísticas se mostra importante.

A seguir serão apresentados os resultados da análise de valor de pico dos mancais. A Figura 26 apresenta um gráfico contendo os resultados dessa análise para o mancal 01.

Figura 26 – Valor de pico, mancal 01.

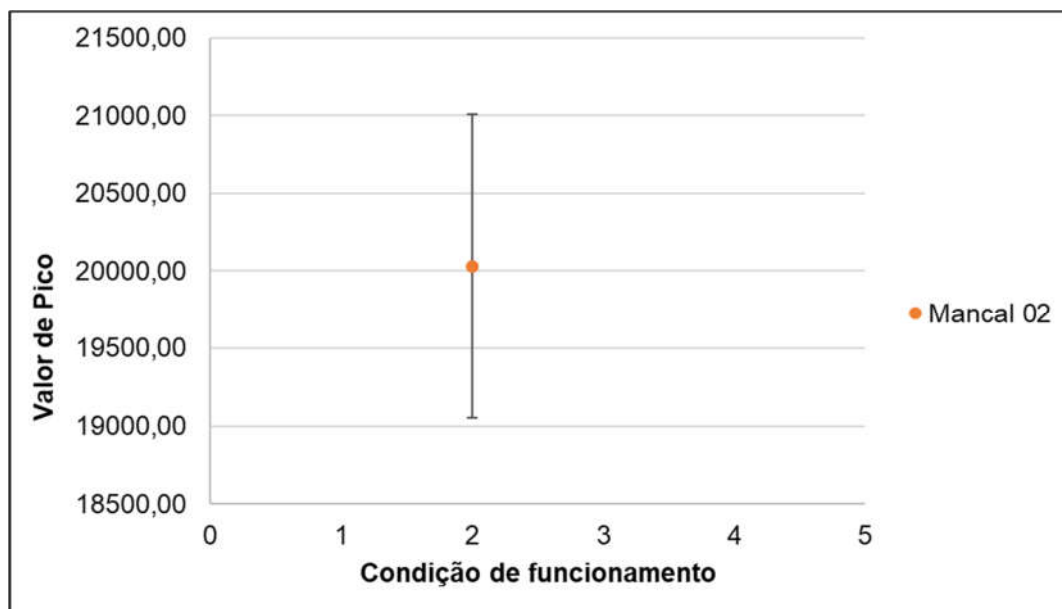


Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 17984 LSB/g, 17837,6 LSB/g para mínimo e 18130,4 LSB/g para máximo.

A Figura 27 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao valor de pico para o mancal 02.

Figura 27 – Valor de pico, mancal 02.

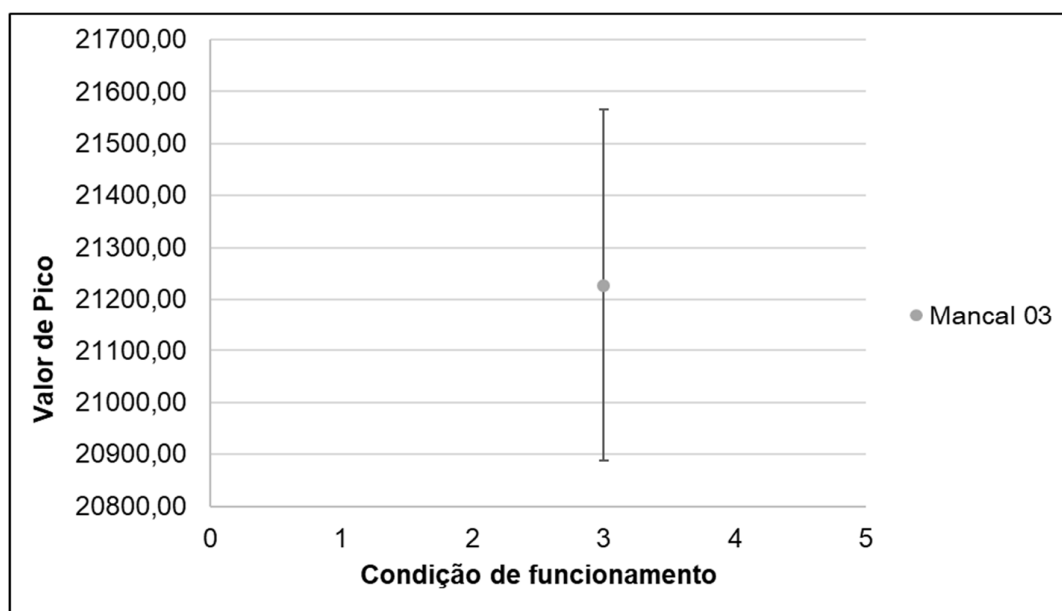


Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 20029,6 LSB/g, 19054 LSB/g para mínimo e 21005,2 LSB/g para máximo.

A Figura 28 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao valor de pico para o mancal 03.

Figura 28 – Valor de pico, mancal 03.

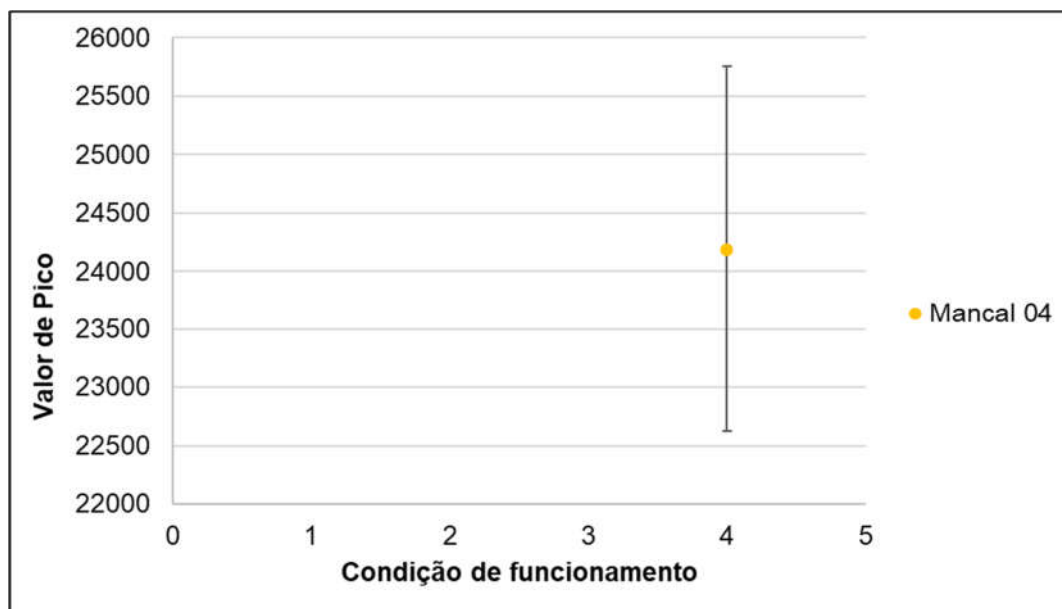


Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 21227,1 LSB/g, 20887,8 LSB/g para mínimo e 21566,4 LSB/g para máximo.

A Figura 29 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao valor de pico para o mancal 04.

Figura 29 – Valor de pico, mancal 04.

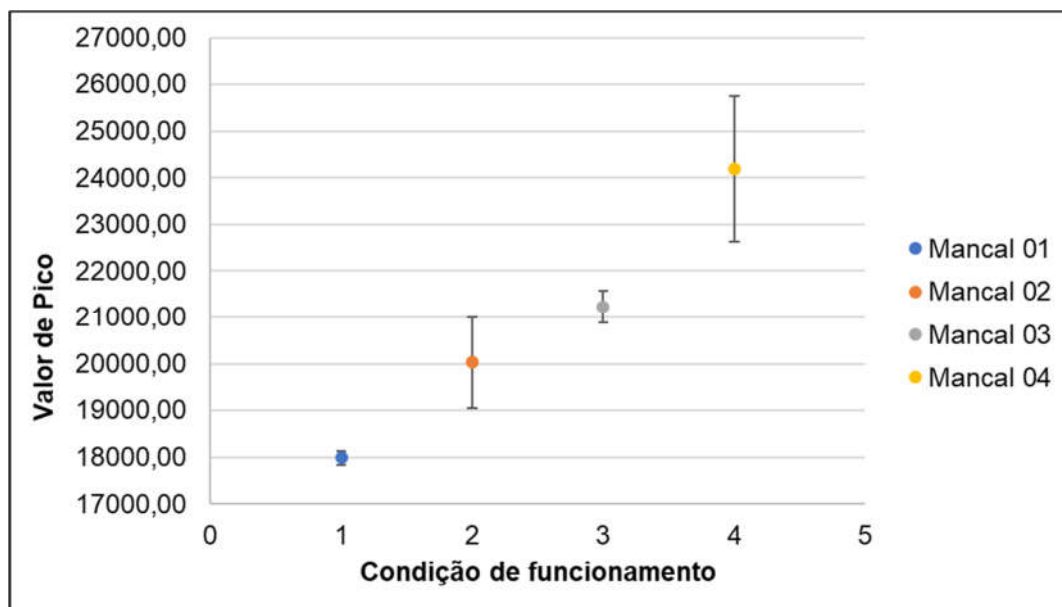


Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 24190,2 LSB/g, 22620,7 LSB/g para mínimo e 25759,7 LSB/g para máximo.

Avaliando os resultados de valores de pico, também é verificado padrões que concordam com a literatura. Assim como o comparativo apresentado anteriormente, os valores de pico apresentaram diferentes respostas com o avanço das falhas induzidas, aumentando conforme o aumento da falha. A Figura 30 apresenta um gráfico comparativo das quatro condições de funcionamento.

Figura 30 – Evolução do valor de pico em função do aumento da folga radial do mancal.



Fonte: Autoria própria.

Realizando uma análise similar à do valor RMS, verificando os valores médios obtidos, da condição 01 para a condição 02 o aumento foi de 2045 LSB/g, da condição 3 em relação a 01 foi de 3243 LSB/g e da condição 04 em relação a 01 foi de 6206 LSB/g.

À primeira vista os valores encontrados já se mostram parâmetros melhores de serem trabalhados do que o valor RMS, uma vez que as diferenças dos valores detectados entre os níveis de folga são bem acentuadas em relação à análise anterior. Desse modo a identificação da falha se torna mais fácil, com maiores probabilidades de acerto.

O valor de pico dá uma ideia do nível de vibração presente, quanto maior esse valor, maiores são as amplitudes de vibração. Esse incremento do valor de pico com o aumento da folga radial pôde ser percebido a olho nu durante os ensaios. Foi verificado que quanto maior a folga, maiores eram os níveis de vibração que foram comprovados posteriormente com o tratamento dos sinais captados.

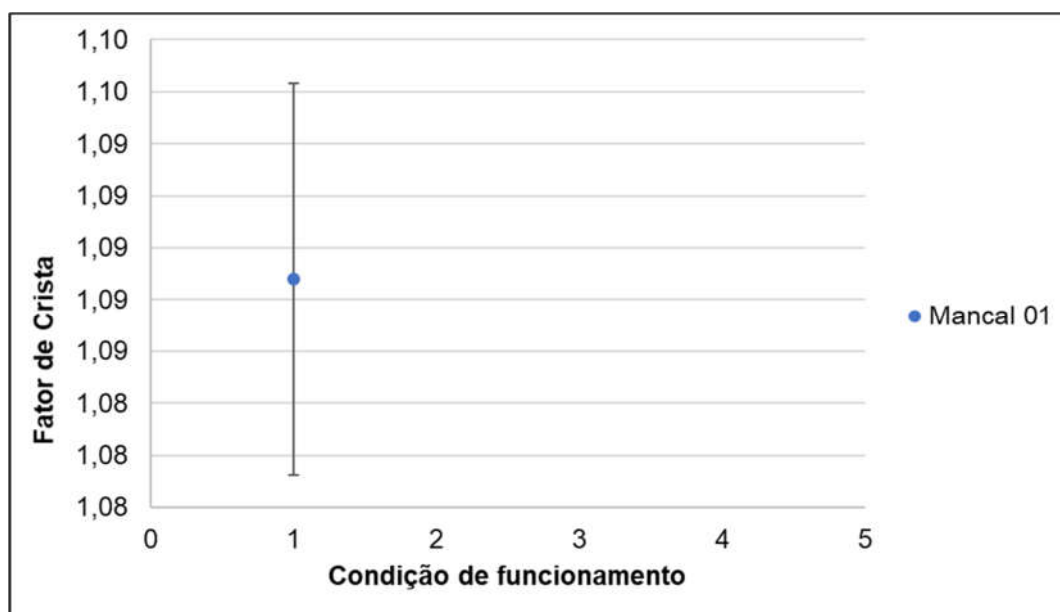
Essa forma de análise é bastante aplicada em estudos de vibração. Igba *et al.* (2016) utilizaram, também, essa técnica no estudo da vibração em dentes de engrenagens, só que utilizando a teoria dos extremos.

Jesus e Cavalcante (2011) utilizaram o valor de pico para determinar desalinhamentos em eixos. Conseguiram captar vibrações radiais para o mínimo valor de desalinhamento induzido. Já Souto (2016) realizou um estudo em um sistema bem diferente do apresentado nesse trabalho. Aplicou a análise do valor de pico em processos de usinagem e conseguiu identificar o desgaste da ferramenta de corte, comprovando assim a eficácia desse tipo de análise em diversas aplicações distintas.

Urbanek *et al.* (2013) estudaram aerogeradores. Aplicaram diferentes rotações no sistema e para cada rotação efetuaram a análise de pico para a identificação de falhas. Já Zimroz *et al.* (2014) utilizaram as distribuições de pico a pico como complemento da análise de valor médio eficaz para o estudo em rolamentos de aerogeradores.

Os resultados e os estudos apresentados comprovam a eficácia desse tipo de análise. Mas, assim como o valor RMS, existem regiões que coexistem. Quando avaliada as condições dos mancais 02 e 03 existe uma faixa estreita, entre o valor 20887,8 e 21005,2 LSB/g que estão presentes em ambas as condições. A próxima análise é feita com base no fator de crista. A Figura 31 apresenta um gráfico contendo os resultados dessa análise para o mancal 01.

Figura 31 – Fator de crista, mancal 01.

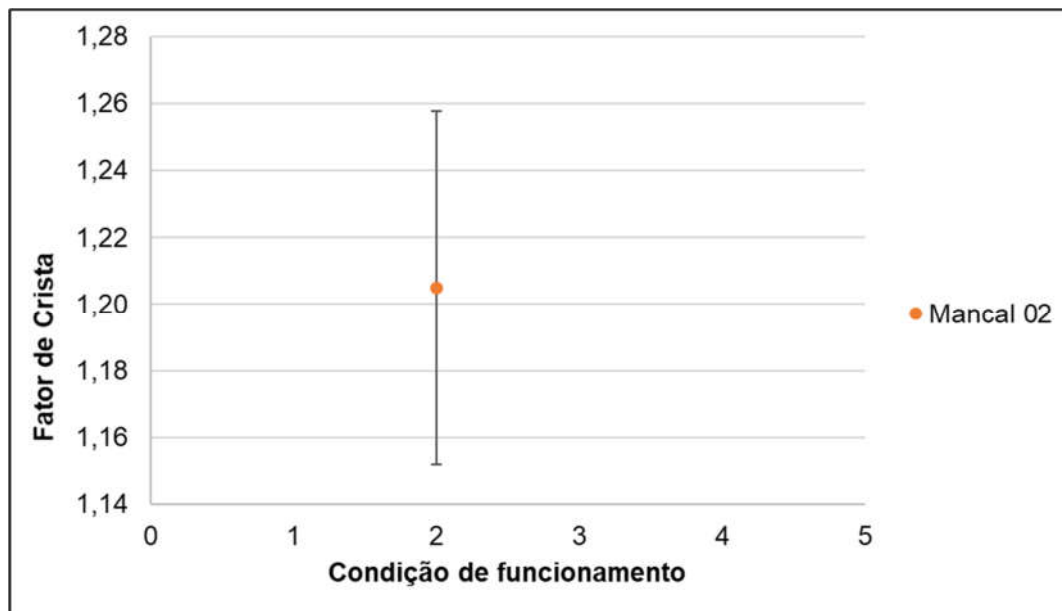


Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 1,09, 1,08 é para mínimo e 1,10 para máximo. Por ser uma razão entre variáveis de mesmas dimensões, o fator de crista é apresentado como um valor adimensional.

A Figura 32 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao fator de crista para o mancal 02.

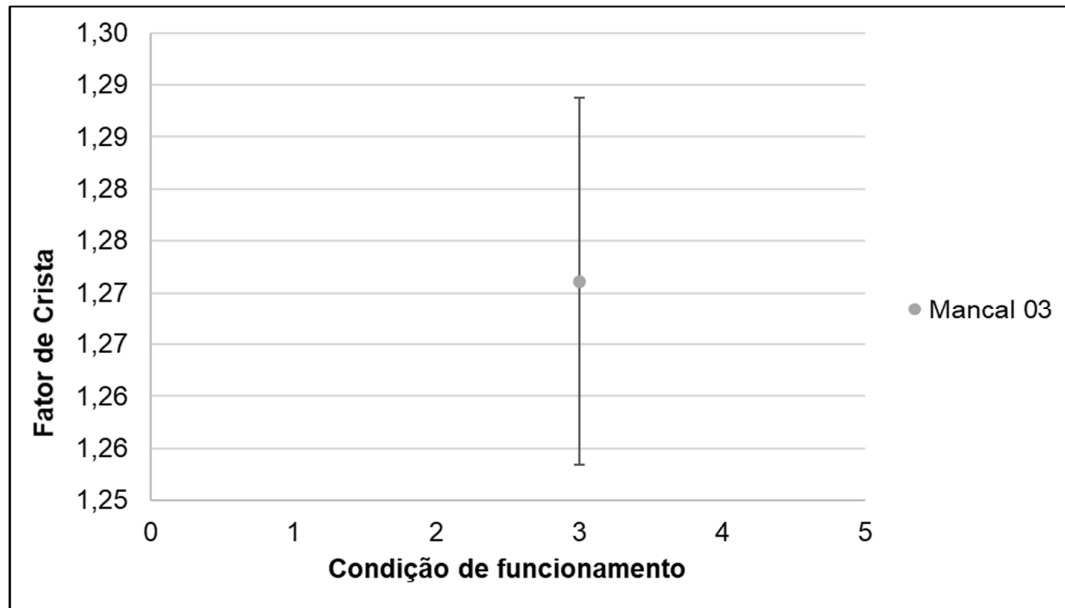
Figura 32 – Fator de crista, mancal 02.



Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 1,20, 1,15 para mínimo e 1,26 para máximo. A Figura 33 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao fator de crista para o mancal 03.

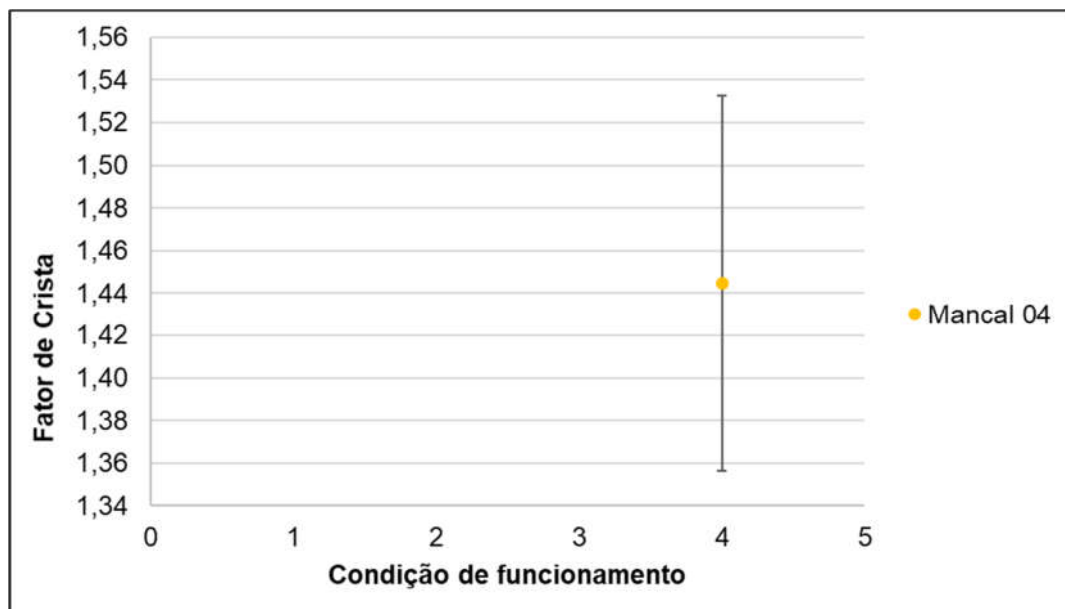
Figura 33 – Fator de crista, mancal 03.



Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 1,27, 1,25 para mínimo e 1,29 para máximo. A Figura 34 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao fator de crista para o mancal 04.

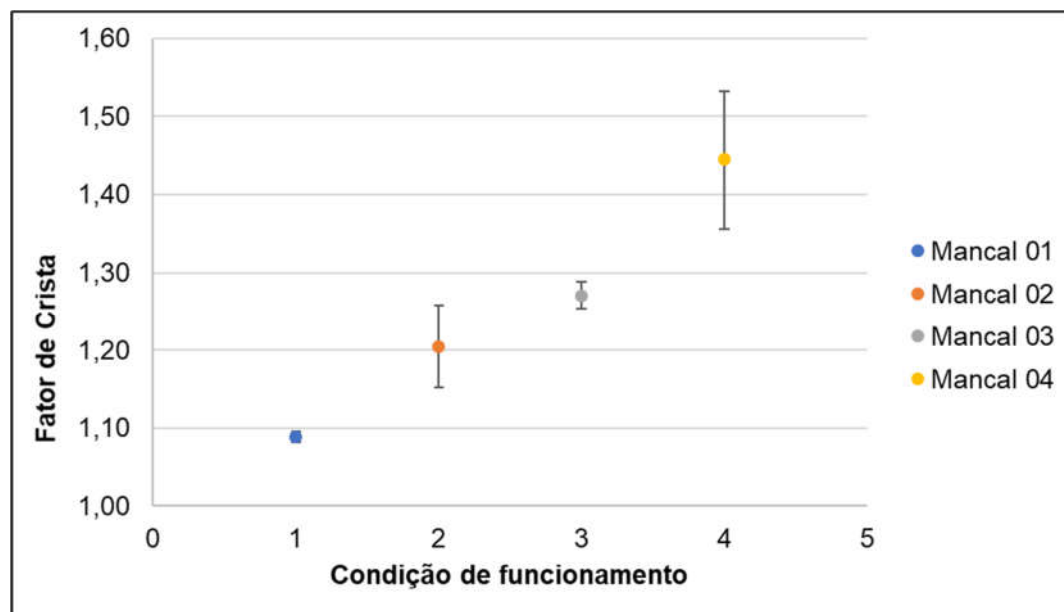
Figura 34 – Fator de crista, mancal 04.



Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 1,44, 1,33 para mínimo e 1,53 para máximo. A seguir será apresentada, na Figura 35, uma análise comparativa dos valores obtidos com o fator de crista para cada condição de funcionamento.

Figura 35 – Evolução do valor do fator de crista em função do aumento da folga radial do mancal.



Fonte: Autoria própria.

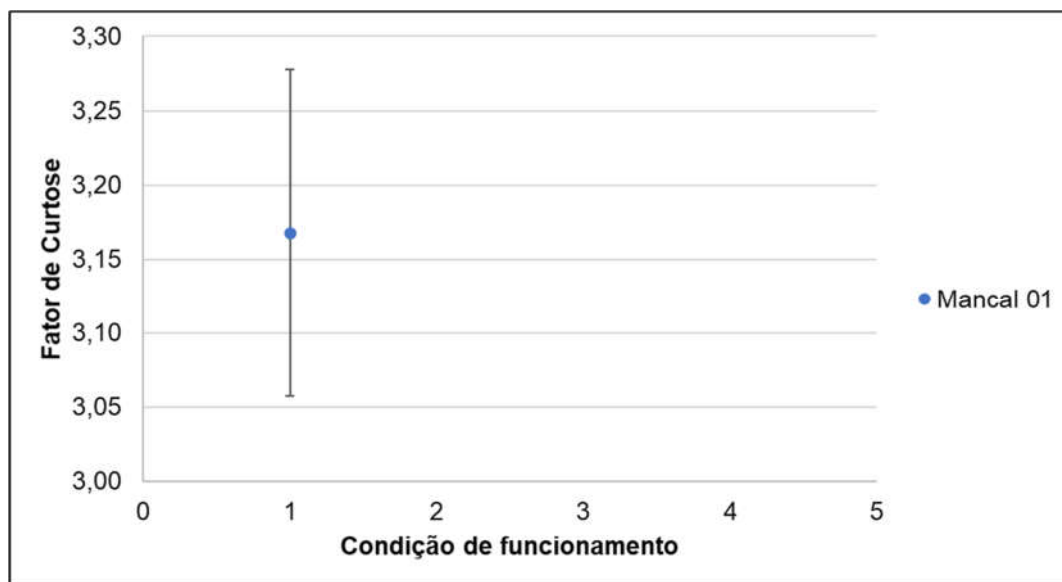
Como o fator de crista relaciona o valor médio eficaz e o valor de pico, com essa análise foram obtidos resultados similares aos anteriores. Foi verificado que existe uma relação direta entre o aumento da folga radial do mancal e o aumento do fator de crista. Essa ferramenta geralmente é utilizada para detecção de estágios iniciais de falhas pois quando o defeito é apresentado começam a surgir picos de amplitude que logo resultam em um aumento do fator de crista. Caso o defeito avance para uma situação que os picos se tornam mais constantes sem a alteração em sua amplitude, o valor RMS vai se elevar ocasionando uma diminuição do fator de crista. Logo, a utilização dessa medida de forma isolada pode provocar diagnósticos errôneos.

Com os devidos cuidados essa ferramenta pode vir a contribuir no estudo. Avaliando o gráfico, verificando os valores médios, é possível prever qual o nível de desgaste que àquele mancal está submetido. Mais uma vez é necessário observar os

valores mínimos e máximos, novamente as áreas coexistentes são entre as condições 02 e 03 que se interceptam entre os valores de crista de 1,25 e 1,26.

Nesta etapa será apresentada a análise do fator de curtose. A Figura 36 apresenta um gráfico contendo os resultados dessa análise para o mancal 01.

Figura 36 – Fator de curtose, mancal 01.

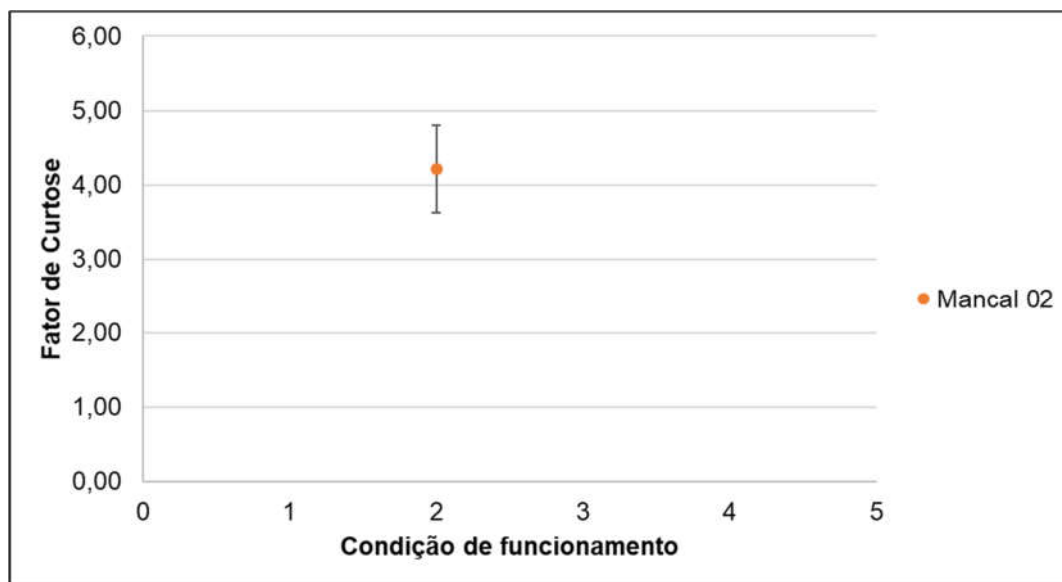


Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 3,17, 3,06 para mínimo e 3,28 para máximo. O valor médio é próximo de 3, indicando que a distribuição dos resultados possui alguns picos, porém, se aproxima da distribuição normal (Gaussiana).

A Figura 37 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao fator de curtose para o mancal 02.

Figura 37 – Fator de curtose, mancal 02.

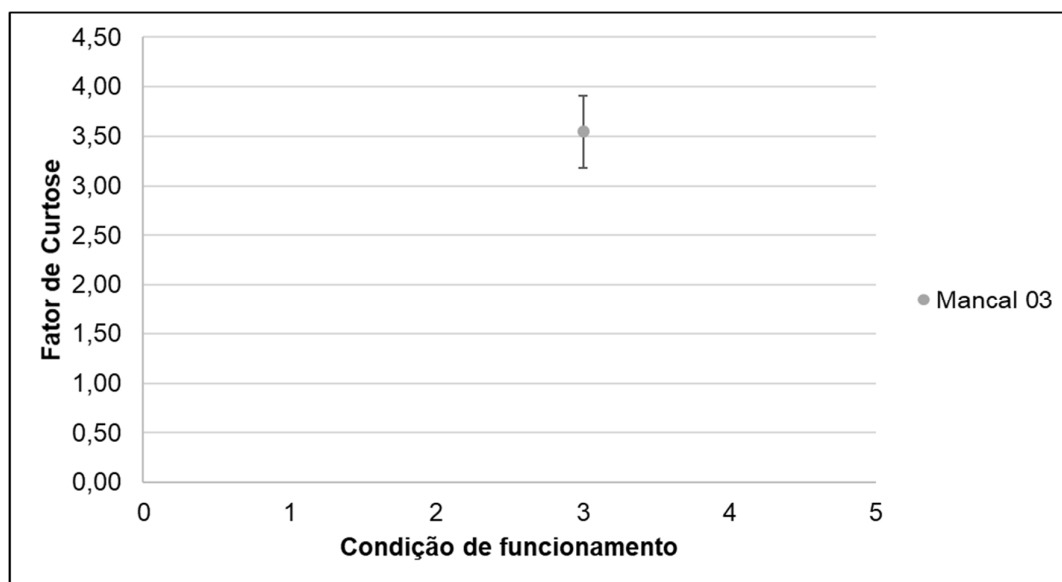


Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 4,21, 3,62 para mínimo e 4,80 para máximo. O valor médio já distanciou do 3, indicando que a distribuição dos resultados possui picos.

A Figura 38 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao fator de curtose para o mancal 03.

Figura 38 – Fator de curtose, mancal 03.

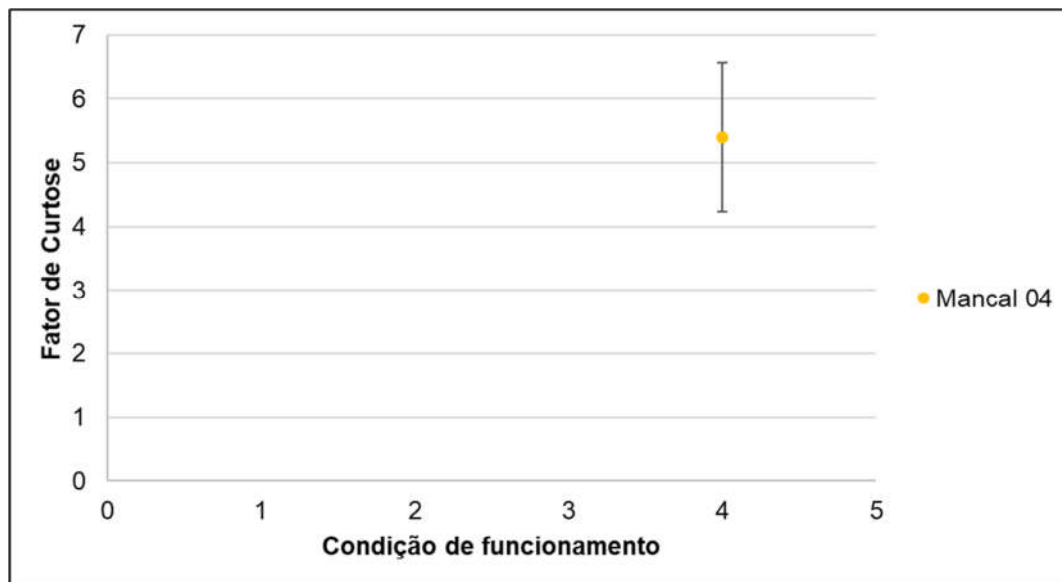


Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 3,55, 3,18 para mínimo e 3,91 para máximo. O valor médio volta a se aproximar de 3, indicando que a distribuição dos resultados se aproxima novamente de uma distribuição Gaussiana.

A Figura 39 apresenta um gráfico contendo os resultados da análise com relação ao fator de curtose para o mancal 04.

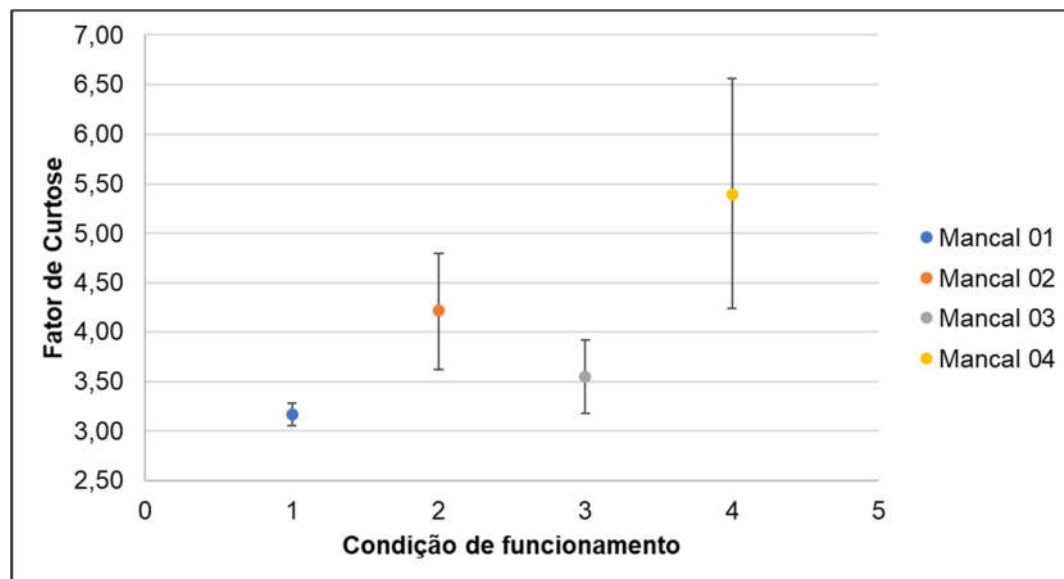
Figura 39 – Fator de curtose, mancal 04.



Fonte: Autoria própria.

O valor médio obtido foi de 5,39, 4,23 para mínimo e 6,55 para máximo. O valor médio volta a se distanciar de 3, indicando que a distribuição dos resultados se aproxima novamente de uma distribuição em forma de picos. A seguir será apresentado, na Figura 40, o comparativo dos valores obtidos no gráfico da curtose.

Figura 40 – Evolução do valor do fator de curtose em função do aumento da folga radial do mancal.



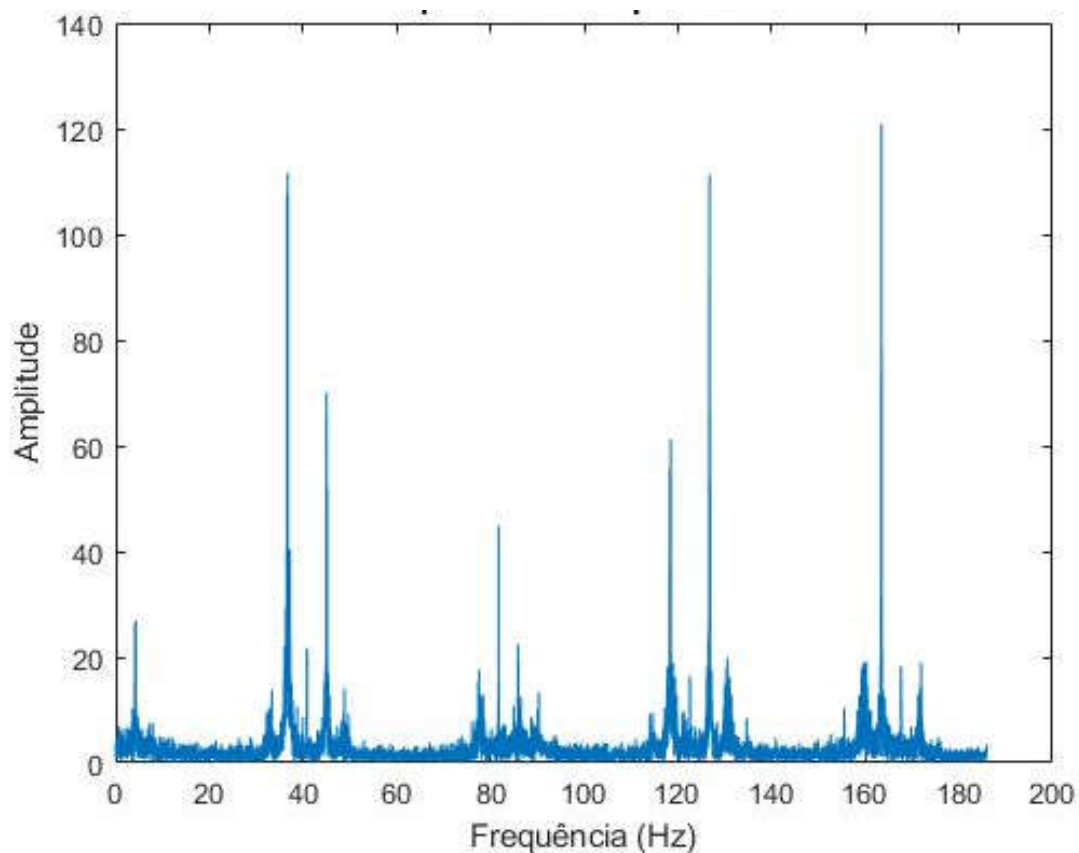
Fonte: Autoria própria.

O fator de curtose apresenta uma ideia da distribuição dos resultados. É possível verificar que inicialmente, entre as condições 01 e 02, há um aumento de valor, indicando uma maior dispersão dos resultados como consequência dos estágios iniciais de falha/desgaste. Entre as condições 02 e 03 há então uma diminuição do fator. Isso mostra que a falha/desgaste já está mais consolidada, não havendo muitos valores dispersos. Entre as condições 03 e 04 há novamente um aumento no fator de curtose, informando que os valores voltaram a se dispersar em consequência do aumento do nível de desgaste.

Já discutido os resultados referentes à análise temporal, será apresentado a seguir a análise do espectro de frequência dos mancais. Como os seis gráficos para cada condição de funcionamento ficaram semelhantes, para cada condição foi escolhido um gráfico representativo.

Para a análise do espectro de frequência a amplitude é dada em LSB/g A Figura 41 apresenta um gráfico do espectro de frequência do mancal na condição de funcionamento 01.

Figura 41 – Espectro de frequência, mancal 01.

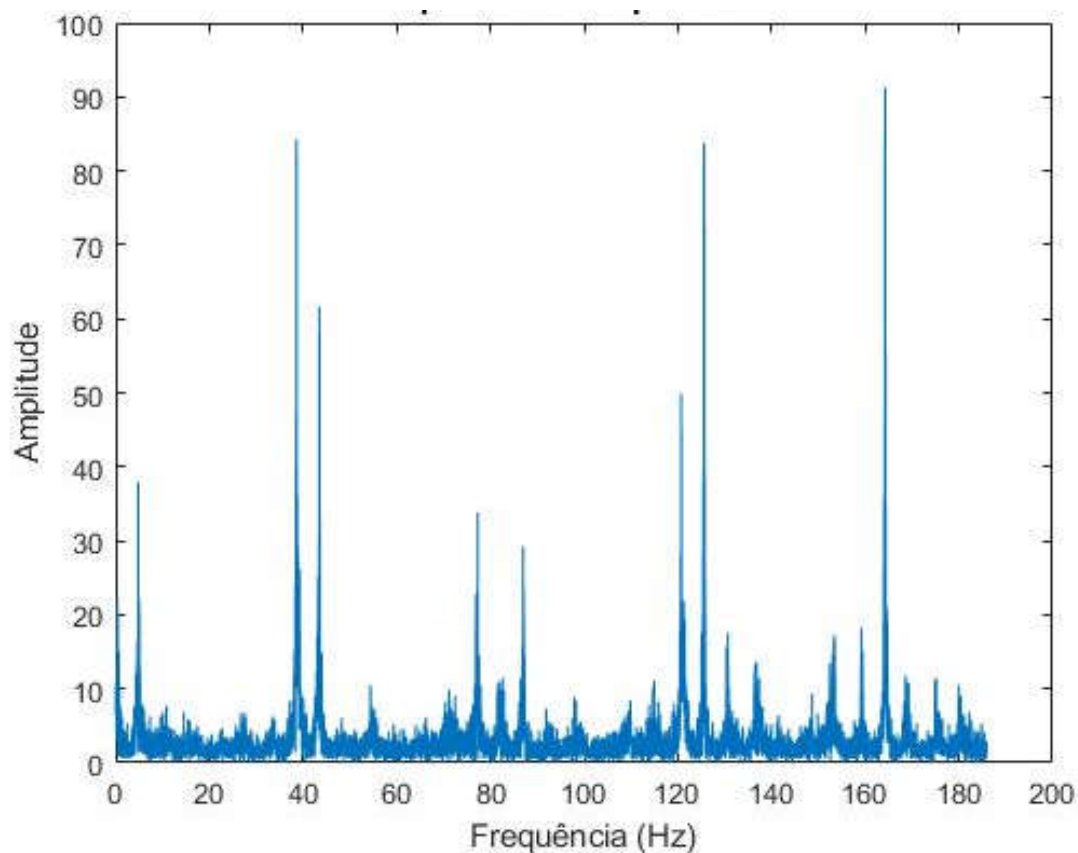


Fonte: Autoria própria.

As principais frequências anotadas são: 35, 45, 82, 119, 125 e 164 Hz.

A Figura 42 apresenta um gráfico do espectro de frequência do mancal na condição de funcionamento 02.

Figura 42 – Espectro de frequência, mancal 02.

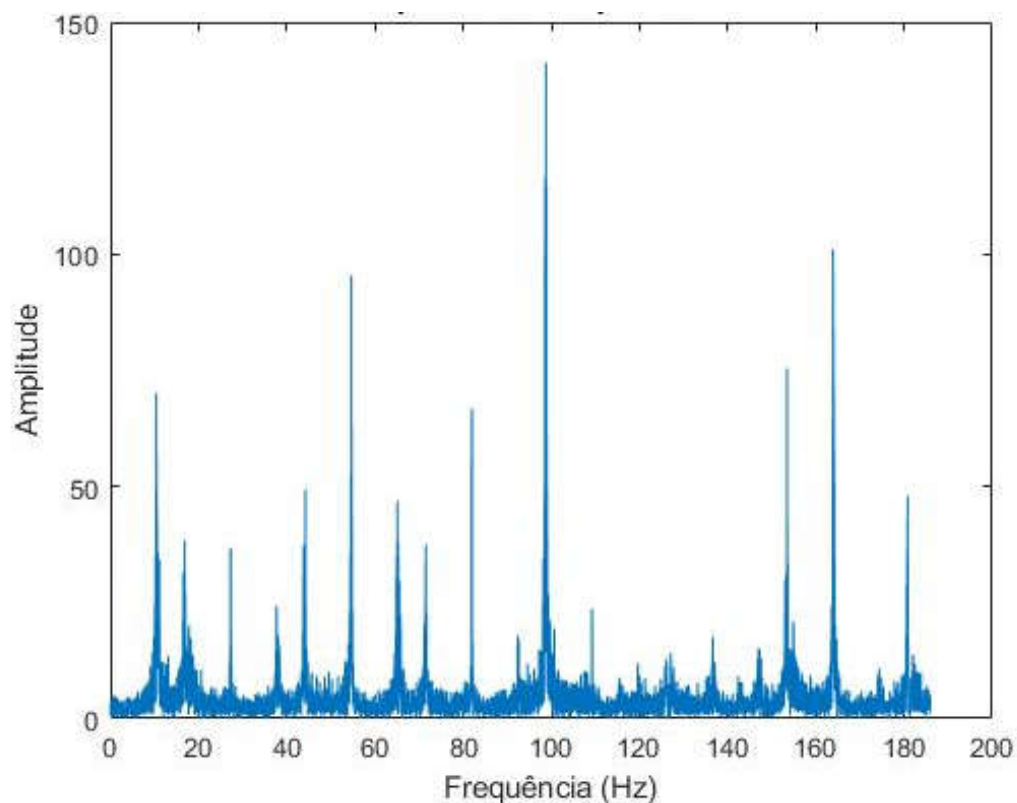


Fonte: Autoria própria.

As principais frequências anotadas são: 06, 38, 43, 77, 88, 122, 128 e 164 Hz.

A Figura 43 apresenta um gráfico do espectro de frequência do mancal na condição de funcionamento 03.

Figura 43 – Espectro de frequência, mancal 03.

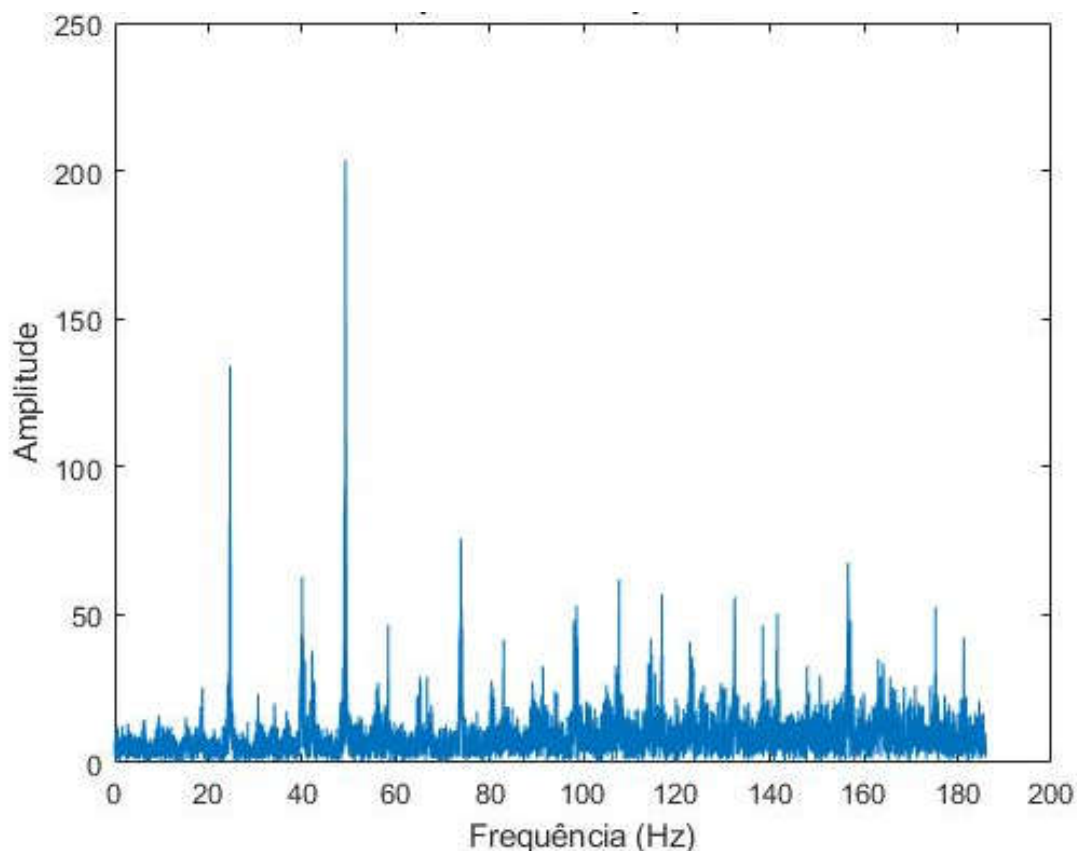


Fonte: Autoria própria.

As principais frequências anotadas são: 10, 18, 26, 37, 44, 56, 65, 72, 82, 98, 154, 164 e 181 Hz.

A Figura 44 apresenta um gráfico do espectro de frequência do mancal na condição de funcionamento 04.

Figura 44 – Espectro de frequência, mancal 04.



Fonte: Autoria própria.

As principais frequências anotadas são: 25, 40, 50, 58, 75, 83, 100, 109, 117, 132, 138, 141, 156, 175 e 181 Hz.

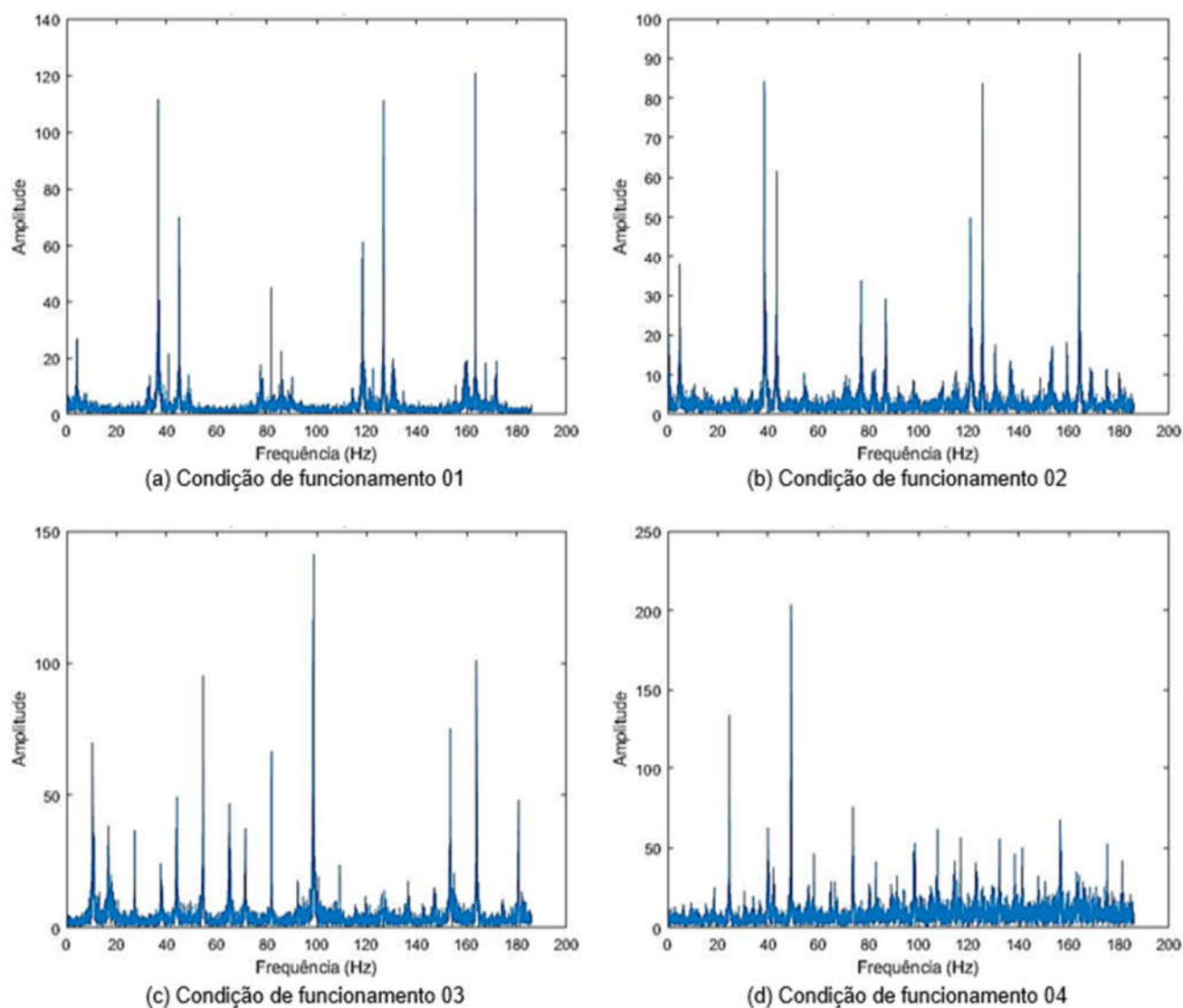
Comparando os quatro gráficos que contêm o espectro de frequência é possível colocá-los lado a lado. A Figura 45 apresenta os espectros de frequência dos mancais nas condições de operação de 01 a 04 que foram avaliados seguindo dois critérios distintos:

O primeiro: nível de ruído, comparando os quatro gráficos é possível notar o aumento considerável de vibração naqueles locais que anteriormente apresentavam amplitudes baixas, como por exemplo a região que comporta as frequências de 95 a 110 Hz. No gráfico “a” as amplitudes são baixas, menor que 5, já no gráfico “b” essa amplitude se aproxima de 10, no gráfico “c” ultrapassa 10, chegando próximo de 20, sendo observado um pico em torno de 100 Hz que será avaliado no próximo critério. E, o gráfico “c” possui valores próximo de 50. A estratégia definida para utilizar esse

primeiro critério foi a seguinte: Se o equipamento apresenta em seu espectro de funcionamento, amplitudes maiores que 5 nas regiões de 10-25, 50-75, 95-110 e 135-155 Hz é um indicativo que ele está funcionando fora das condições de fábrica (condição de funcionamento 01).

O segundo: são os picos de amplitudes notáveis que aparecem em “b” e “c”. Os gráficos “a” e “b” não tiveram diferenças relevantes com relação a esse critério se comparado com os demais gráficos. No gráfico “c” a amplitude que chama mais atenção é em torno de 100 Hz. No gráfico “d” as amplitudes que se destacam são em torno de 25 e 50 Hz.

Figura 45 – Espectro de frequência para as condições de funcionamento de 01 a 04.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a utilização do espectro de frequência pode ser complementar às análises no domínio do tempo, uma vez que ela pode ser utilizada para diferir as condições de funcionamento 02 e 03.

Vários autores utilizam essa análise do espectro de frequência para prever falhas, Melo (2017) realizou um trabalho similar ao de Jesus e Cavalcante (2011), mas, dessa vez, utilizou o espectro de frequência para a identificação do desalinhamento de rotores. Já Feng (2013) e Mohammed (2014) estudaram engrenagens e o aparecimento de trincas de forma similar à Chen (2016) que dessa vez utilizou a transformada de Wavelet para a análise espectral.

A análise espectral da frequência é uma ferramenta bastante empregada no estudo da vibração aplicado a manutenção de máquinas. Aliando-a a análise no domínio do tempo é possível elaborar regras para tomada de decisão que facilitam o processo de diagnóstico de equipamentos. A seguir será apresentada uma metodologia de diagnóstico que é o principal objetivo desse estudo.

4.3 Algoritmo de diagnóstico

Com base nos resultados desse estudo foi definida uma metodologia para o diagnóstico de desgaste em mancais radiais superiores de conjuntos motobombas submersas de 04 hp da marca EBARA.

O primeiro passo é verificar a Tabela 01. Trata-se do primeiro momento de análise. Se os valores de RMS, fator de crista e valor de pico estiverem situados nas linhas correspondentes das condições de funcionamento 01, 02, 03 ou 04, então o diagnóstico pode ser realizado no primeiro momento.

Tabela 1 – Tabela de diagnose.

Condição de funcionamento	RMS	Fator de Crista	Valor de pico
1	16497,6 a 16537,4	1,08 a 1,10	17837,6 a 18130,4
2	16541,5 a 16664,1	1,15 a 1,25	19054 a 20887,8
2 ou 3	16664,1 a 16702,7	1,25 a 1,26	20887,8 a 21005,2
3	16702,7 a 16734,9	1,26 a 1,29	21005,2 a 21566,4
4	16675,36 a 16807,3	1,36 a 1,53	22620,7 a 25759,7

Fonte: Autoria própria.

Se os valores estiverem situados na linha cuja condição de funcionamento é 2 ou 3, ou seja, a condição de funcionamento não está bem definida, o espectro de frequência deverá ser avaliado. Se forem anotadas frequências principais em torno de 100 Hz a condição de funcionamento é a 03, senão, a condição de funcionamento é a 02.

4.4 Estudo de caso

Para a comprovação do método desenvolvido nesse estudo, o sistema foi aplicado em uma situação real nas dependências de uma empresa de manutenção em conjuntos motobombas submersas.

Um equipamento de 04 hp similar ao utilizado no estudo foi colocado para a manutenção. Foi submetido as mesmas condições de ensaios aqui propostas e os seguintes valores foram adquiridos, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Valores obtidos no estudo de caso.

RMS	Fator de Crista	Valor de pico
16699,5	1,27	21349,1

Fonte: Autoria própria.

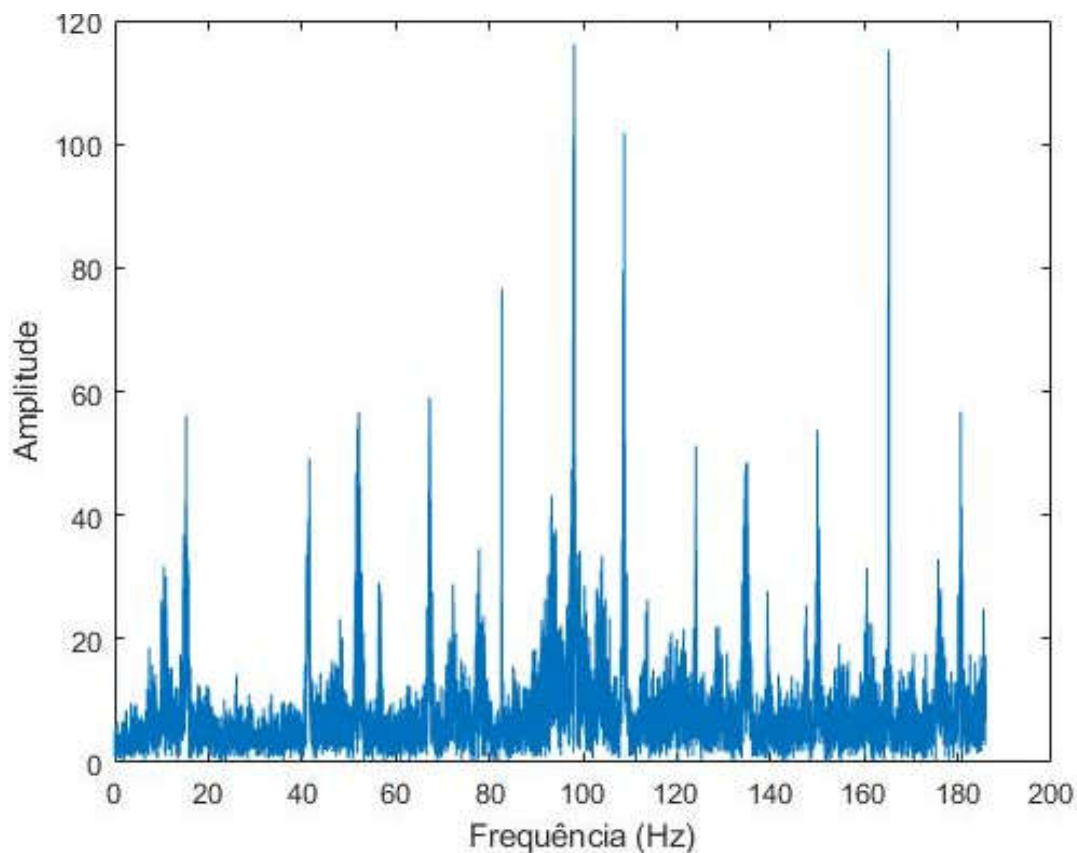
De acordo com a tabela 1, o valor em RMS fornecido foi de 16699,50 LSB/g, ou seja, está localizado em uma região de dúvida, mas representa uma condição de funcionamento diferente da condição 01 que é o ajuste de folga que a fábrica utiliza.

O valor correspondente ao fator de crista foi 1,27 que define a condição de funcionamento 03. Analisando o valor de pico, foi obtido um valor de 21349,1 LSB/g. Essa variável reafirma que a condição de funcionamento no equipamento é a 03.

Pela metodologia de diagnóstico desenvolvida não seria necessário a avaliação do espectro de frequência. Entretanto, essa análise foi efetuada. A Figura 46 apresenta esse gráfico. É possível identificar uma frequência em destaque em torno de 100 Hz.

Hipoteticamente, se esse mancal analisado estivesse com o valor de pico na região de dúvida, o gráfico do espectro de frequência teria revelado qual a condição de funcionamento do equipamento.

Figura 46 – Espectro de frequência do estudo de caso.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a metodologia desenvolvida nessa pesquisa, o mancal está com a condição de funcionamento 03, ou seja 0,5 mm de folga entre o mancal e o eixo. Nesse caso é necessária a abertura do motor e execução da manutenção.

Quando realizada a manutenção, foi identificada uma folga entre o mancal e o eixo de 0,55 a 0,61 mm. Desse modo a técnica de diagnóstico sugerida nesse trabalho foi validada na prática.

O presente capítulo apresenta todos os resultados obtidos no estudo. Inicialmente, o sistema de aquisição de dados vibracionais desenvolvido nesse trabalho foi comparado nas dependências do laboratório de Tribologia da UFRN que constatou uma compatibilidade de 80% com o sensor calibrado. Posteriormente foram apresentados dados dos ensaios realizados no motor elétrico para cada condição de funcionamento do mancal radial superior imposta. Para cada situação foram

apresentados os resultados de valor RMS, valor de pico, fator de crista e fator de curtose, além do espectro de frequência característico.

Na discussão dos resultados foi verificado que o fator de curtose não foi útil para prever a condição de funcionamento do motor, mas os demais fatores apresentaram padrões que puderam ser explorados. Com essas informações foi montado um algoritmo de diagnóstico que envolveu o valor RMS, valor de pico, fator de crista e o espectro de frequência. Em seguida o algoritmo foi posto à prova em um estudo de caso que comprovou a eficácia do método.

5 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para a captação de sinais e definição de uma metodologia para ser aplicada na técnica de manutenção preditiva. Com a utilização do Arduino e o sensor MPU6050 foi possível desenvolver uma ferramenta de captura de sinais de vibração de baixo custo que permitiu uma taxa máxima de 380 amostras por segundo, que se mostrou suficiente para o desenvolvimento do estudo proposto.

O sistema de aquisição foi comparado nas dependências do laboratório de Tribologia da UFRN por meio da utilização de um sensor calibrado e de uma bancada para estudos dinâmicos.

Foram induzidas 04 condições de funcionamento para o mancal radial superior do motor do estudo para simular o desgaste natural do equipamento. Posteriormente o sistema de aquisição foi aplicado ao mancal e os sinais oriundos da vibração de cada condição de funcionamento foram captados. O valor RMS, valor de pico, fator de crista e curtose foram avaliados. Com exceção do fator de curtose, todos os outros responderam de forma crescente com o aumento do desgaste. O fator de curtose explicou a discrepância dos resultados e como a falha estava evoluindo com relação a vibração. Outra análise realizada foi com relação ao espectro de frequência que se mostrou eficaz para complementar a análise no domínio do tempo e ser decisiva nas situações duvidosas. Com os dados coletados e tratados foi possível elaborar uma metodologia de diagnóstico desses equipamentos para ser aplicada durante a manutenção preditiva.

Depois do sistema ser validado e aplicado, a técnica de manutenção preditiva elaborada, o sistema foi posto a teste por meio de um estudo de caso em manutenção real. Mais uma vez o sistema se comportou de forma satisfatória. Foi possível prever a necessidade da realização de manutenção do equipamento testado.

Desse modo, o estudo mostrou que é possível desenvolver um sistema de monitoramento de baixo custo para ser aplicado em manutenção preditiva. Provou que com criatividade e esforço é possível construir equipamentos e propor soluções tecnológicas utilizando poucos recursos e materiais. Para a execução desse trabalho

foi utilizado um sistema de aquisição que custa cerca de 30 vezes menos que o sistema utilizado pela UFRN.

Para a aplicação industrial desse dispositivo, alguns ajustes e avanços nas pesquisas necessitam ser realizados. Segue então algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o comportamento vibracional induzindo outras condições de funcionamento, como desgaste no mancal radial inferior e axial;
- Avaliar o comportamento vibracional com a introdução de material particulado junto ao fluido de lubrificação;
- Avaliar o comportamento vibracional oriundo de desalinhamento no acoplamento do motor-bombeador;
- Avaliar o comportamento vibracional oriundo de desbalanceamento dos elementos girantes;
- Assimilar os dados vibracionais com outras grandezas, como corrente e tensão;
- Desenvolver um método para aplicar o sistema no equipamento em funcionamento dentro do poço artesiano.

A ciência é algo instigante que aguça a curiosidade do pesquisador, quanto mais se estuda mais dúvidas são geradas acerca do tema. Esse estudo atingiu seu objetivo, mas muito ainda tem a ser descoberto com relação às bombas submersas, pois são equipamentos que trabalham em regiões de difícil acesso e controle.

6 Referências

ALLEN, Ronald L., MILLS, Duncan W. **Signal Analysis**. 1ª ed. Nova Jersey, Estados Unidos da América: IEEE Press, 2004. 902 p.

ALMEIDA, Isac Barbosa. **Análise de falhas em rolamentos por análise de vibração aplicado a aerogeradores**. Natal, RN: 2016. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

ALSALAET, Jaafar. **Vibration Analysis and Diagnostic Guide**. [S.l.]: Resarchgate, 2012.

ARDUINO. **Arduino**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 05 de setembro de 2018.

BIGRET, R. Rotating machinery, monitoring. **Encyclopedia of Vibration**, p. 1078-1084, 2017.

BIRD, John. **Basic engineering mathematics**. [s. L]: Elsevier, 2010. 337 p.

BUDYNAS, Richard G. NISBETT, J. Keith. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 9ª ed. Nova York, NY: Mc Graw Hill, 2011. 1109 p.

CABRAL, Adriano de Sousa. **Estudo termográfico de auxílio à detecção de falhas por desgaste mecânico em rolamento autocompensador de esferas**. Campina Grande, PB: 2017. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

CAERN. **Abastecimento de água em Mossoró. Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte**. Disponível em: "<http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/fundac/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=81460&ACT=&PAGE=&PARM=&LBL=Materia>". Acesso em: 08 de outubro de 2018.

CANDELAS, F. A. *et al.* Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, p. 105-110, 2015.

CHAGURY, Michel. **Protótipo para correção de fator de potência em baixa tensão usando Arduino**. São Paulo, SP: 2017. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Centro

Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos.

CHAN, Y. J.; HUANG, J. W. Multiple-point vibration testing with micro-electromechanical accelerometers and micro-controller unit. **Mechatronics**, v. 44, p. 84-93, 2017.

CHEN, J. *et al.* Generator bearing fault diagnosis for wind turbine via empirical wavelet transform using measured vibration signals. **Renewable Energy**, v. 89, p. 80-92, 2016.

CHOUDHURY, A.; TANDON, N. Vibration Response of Rolling Element Bearings in a Rotor Bearing System to a Local Defect Under Radial Load. **Journal of Tribology**, v. 128, p. 252-261, 2016.

COSTA, C. A. B. *et al.* A multi-criteria model for auditing a Predictive Maintenance Programme. **European Journal of Operational Research**, v. 217, p. 381-393, 2012.

CUBAS, Jhoan Miguel. **Estudo experimental do escoamento bifásico ar-àgua em uma bomba centrífuga radial**. Paraná, PR: 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

CUNHA, R. C. **Análise do Estado de Conservação de um Redutor de Velocidade Através da Técnica de Partículas de Desgaste no Óleo Lubrificante Auxiliada pela Análise de Vibrações**. São Paulo, SP: 2005 - Universidade Estadual Paulista, 2005.

DALPIAZ, G. *et al.* Effectiveness and sensitivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 14, p. 387-412, 2000.

EBARA. **Bombas submersas**. São Paulo, 03 set. 2018. Disponível em: <<http://www.ebara.com.br/ebara/pt/index.php>>. Acesso em: 03 set. 2018.

FARIAS, Aline Cristina Mendes. **Lubricidade de biodiesel e sua associação com a vibração e nível de pressão sonora oriundos do contato esfera-plano sob deslizamento alternado**. Natal, RN: 2015. 167 f. Tese (Doutorado) – Universidade

Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

FENG, H. *et al.* Investigations of the static and dynamic characteristics of water-lubricated hydrodynamic journal bearing considering turbulent, thermohydrodynamic and misaligned effects. **Tribology International**, v. 188, p. 451-457, 2018.

FENG, Z.; ZUO, M.J. Fault diagnosis of planetary gearboxes via torsional vibration signal analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 36, p. 401-421, 2013.

FERREIRA FILHO, José Rogério Maciel. **Controlador digital de tensão de conversor boost de alto ganho aplicado a sistema fotovoltaico para bombeamento de água**. Ceará, CE: 2017. 95 f. Dissertação (Mestrado) - INSTITUTO Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis.

FLORIN, B. C. *et al.* Using a fuzzy logic approach for the predictive maintenance of textile machines. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**, v. 30 p. 999-1006, 2016.

FOX, Robert W.; McDonald, Alan T.; Pritchard, Philip J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6ª ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2006. 813 p.

FRANCISCO, Marcos Salazar. **Simulador de processos industriais aplicado ao ensino da teoria de controle de processos industriais**. São Paulo, SP: 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Automação e controle de processos.

GEORGIADIS, A. *et al.* Vibration analysis based on the spectrum kurtosis for adjustment and monitoring of ball bearing radial clearance. **Matec web of conferences**, v. 211, p.06006-06012, 2018.

GOMBÉ, B. O. *et al.* A SAW wireless sensor network platform for industrial predictive maintenance. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 28, p. 1-12, 2017.

HUAMANI, Jairo Alvaro Cotaquispe. **Análise modal operacional de uma bomba centrífuga submersa utilizando a decomposição melhorada no domínio da**

frequência. Rio de Janeiro, RJ: 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica.

IGBA, J. *et al.* Analysing RMS and peak values of vibration signals for condition monitoring of wind turbine gearboxes. **Renewable Energy**, v. 91, p. 90-106, 2016.

INTERNATIONAL, M+p. **The effect of kurtosis on random vibration testing**. [S.l.]. 2019.

JESUS, S. S.; CAVALCANTE, P.F. utilização de bancadas de ensaio para estudo do comportamento dinâmico de máquinas rotativas - vibrações mecânicas –. **Holos**, v. 3, p. 18-40, 2011.

KAMARAS, K.; DIMITRAKOPOULOS, I. Vibration analysis of rolling element bearings using spectral kurtosis and envelope analysis. **Sea Services**, v. 5, p.1-14, 2016.

KREYSZIG, Erwin. **Advanced engineering mathematics**. 10. ed. Columbus: John Wiley & Sons, 2011. 1283 p.

LEÃO. **Treinamento**. 2002. 36 p.

LEPINE, J.; ROUILLARD, V. Evaluation of shock detection algorithm for road vehicle vibration analysis. **Vibration**, v. 1, p.220-238, 2018.

LIANG, X. *et al.* A windowing and mapping strategy for gear tooth fault detection of a planetary gearbox. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 80, p. 445-459, 2016.

LIMA, Epaminondas Pio Correia. **Mecânica das bombas**. 2^a ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Interferência, 2003. 610 p.

LIU, H. *et al.* On-line chatter detection using servo motor current signal in turning. **Science China Technological Sciences**, v. 54, p. 3119–3129, 2011.

LONGHI, César. **Estudo Experimental e Modelagem do Escoamento Bifásico Água e Ar em Manuseador de Gás Hélico-Axial e em Bomba Centrífuga**. CAMPINAS, SP: 2017. 401 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Pretróleo.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1997. 782 p.

MCROBERTS, Michael. **Arduino Básico**. 1ª ed. São Paulo, SP: Editora Novatec, 2011. 456 p.

MEDEIROS, Everton Coelho. **Projeto e avaliação do comportamento dinâmico de um conjunto de mancais hidrodinâmicos aplicados a um rotor Jeffcott**. Guaratinguetá, SP: 2017. 88 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

MELO, Vinícius Yoshida. **Análise de rotores com mancais hidrodinâmicos considerando desalinhamento**. São José dos Campos, SP: 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Programa de Pós-Graduação em Ciências.

MEOLA, Tatiana. **Monitoramento em tempo real da qualidade de sinais de vibrações, utilizando inteligência artificial**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

MOHAMMED, A. *et al.* Crack detection in a rotating shaft using a artificial neural networks and PSD characterisation. **Meccanica**, v. 49, p. 255-266, 2014.

MRC. **Portable vibration analyzer for equipment diagnosis and on-site measurements**. Netanya: Mrc, 2019. 7 p.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas**. 4ª ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013. 1028 p.

OLIVEIRA, A. J. *et al.* Protótipo de sensoriamento de detecção de gestos. In: Salão Internacional de Ensino, v. 8, 2016. **Anais...** Bagé, RS: UNIPAMPA, 2016. p. 84-93.

PATRICIO, Wagner Xavier. **Desenvolvimento de um sistema embarcado para medições de deformações com extensômetros elétricos do tipo resistivo**. Joinville, SC: 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado) – Centro Universitário SOCIESC. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

PEREIRA, Francisco Aécio de Lima. **Desenvolvimento e análise da eficiência energética de um sistema de automação de precisão para irrigação localizada utilizando Arduino e inversor de frequência**. MOSSORÓ, RN: 2017. 59 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água.

PODDAR, S.; TANDON, N. Detection of particle contamination in journal bearing using acoustic emission and vibration monitoring techniques. **Tribology International**, v. 134, p. 154-164, 2019.

RAI, A.; UPADHYAY, S.H. A review on signal processing techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings. **Tribology International**, v. 96, p. 289-306, 2016.

SALLES, Lais Monique Mendes. **Desenvolvimento de um dispositivo de medição de ruído com base no sistema OpenWrt**. São Paulo, SP: 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

SHINDE, A. *et al.* Numerical Analysis of Deterministic Micro-Textures on the Performance of Hydrodynamic Journal Bearing. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, p. 5999-6008, 2018.

SIMÕES, Rodrigo de Araújo. **Análise de mancais radiais de três lóbulos lubrificados a gás utilizando procedimento de elementos finitos**. Belo Horizonte, MG: 2017. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

SKRIMPAS, G. *et al.* Residual signal feature extraction for gearbox planetary stage fault detection. **Wind Energy**, v. 20, p. 1389-1404, 2017.

SOARES, F. G. *et al.* análise de falhas por vibrações em mancais de rolamentos. In: Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, v. 22, 2015. **Anais...** Goytacazes, RJ: Universidade Cândido Mendes, 2015. 10 p.

SOUTO, Ulisses Borges. **Análise do sinal de vibração no fresamento do aço AISI 4340 com ferramentas desgastadas**. Natal, RN: 2016. 94 f. Dissertação (Mestrado)

– Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

SOUZA, Marcelo Varela. **Domótica de baixo custo usando princípios de IoT**. Natal, RN: 2016. 50 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Instituto Metropole Digital. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Software.

STAN, M. *et al.* Centrifugal Pump Monitoring and Determination of Pump Characteristic Curves Using Experimental and Analytical Solutions. **Processes**, v. 6, 2018.

SUN, X.; WEI, Q. Performance influence in submersible pump with different diffuser inlet widths. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, 2017.

TEKTRONIX. **Signal Generator Fundamentals**. [s. L]: Tektronix, 2009. 54 p.

TUMA, Jirí. **Vehicle Gearbox Noise and Vibration**. 1^a ed. Ostrava, República checa: John Wiley & Sons, Ltd, 2014. 261 p.

URBANEK, J. *et al.* Joint Power-Speed Representation of Vibration Features. Application to Wind Turbine Planetary Gearbox. **Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations**, v. 20, p. 197-205, 2013.

VITORIA, Bruno Cesar Rocha. **Análise do sinal de vibração no fresamento do aço AISI 4340 com ferramentas desgastadas**. Natal, RN: 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

WANG, J. *et al.* A new paradigm of cloud-based predictive maintenance for intelligent manufacturing. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 28 p. 1125-1137, 2017.

WILO. **Manual SPI Português**. 1. ed. Rio de Janeiro: 2013. 34 p.

ZHANG, P. *et al.* Ocean Economy and Fault Diagnosis of Electric Submersible Pump applied in Floating platform. **International Journal of e-Navigation and Maritime Economy**, v. 6, p. 37-43, 2017.

ZHOU, L. *et al.* Numerical analysis and performance experiment of electric submersible pump with different diffuser vanes number. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, p. 1-11, 2018.

ZIMROZ, R. *et al.* Diagnostics of bearings in presence of strong operating conditions non-stationarity. A procedure of load-dependent features processing with application to wind turbine bearings. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 46, p. 16-27, 2014.