

MANUTENÇÃO PREDITIVA EM ROLAMENTOS RÍGIDOS DE ESFERAS DE UM MOTOR ELÉTRICO COM ROTAÇÃO VARIÁVEL ATRAVÉS DA TÉCNICA DE DEMODULAÇÃO DO SINAL DE VIBRAÇÃO (ENVELOPE)

André Marcos de Oliveira¹
Andre Luiz Martins Pires Horta²

Resumo: A manutenção preditiva é uma técnica estratégica que permite o acompanhamento periódico dos equipamentos, por meio de dados coletados através de monitoramento ou inspeções, podendo prever e identificar possíveis defeitos, que a longo prazo poderão causar algum dano maior. Os sinais de vibrações de máquinas rotativas podem informar inúmeras situações, desde o estado normal da máquina até o possível surgimento de alguma falha. Através da análise de envelope da aceleração em um rolamento de um motor elétrico é possível apresentar dados quantitativos que demonstrem a eficiência desse tipo de análise. Com isso este estudo propõe uma questão norteadora: “quais são os principais fatores que tornam a análise de demodulação do sinal de vibração (envelope) eficiente em detectar falhas em rolamentos rígidos de esferas de um motor elétrico com rotação variável?”. A fim de responder essa pergunta, a pesquisa tem como método coletar dados de vibrações de um rolamento SKF61910, com posterior comparação com suas frequências características de defeitos calculadas anteriormente, realizando uma análise completa das vibrações no sistema digital de análise de vibrações (SDAV). Os resultados serão apresentados sobre forma quantitativa e qualitativas a partir da coleta de informações de fontes primárias e secundárias, incluindo revisão bibliográfica e a utilização do software simulador SDAV para obter resultados computacionais. Os resultados indicaram que, a análise de envelope é muito sensível em detectar defeitos no estágio inicial, permitindo montar pontos de monitoramento constante que são de grande importância para a manutenção preditiva.

Palavras-chave: Análise de Vibração; SDAV; Envelope; Rolamento Rígido de Esfera.

Abstract: Predictive maintenance is a strategic technique that allows the periodic monitoring of equipment, through data collected through monitoring or inspections, being able to predict and identify possible defects, which in the long term may cause greater damage. Vibration signals from rotating machines can inform numerous situations, from the normal state of the machine to the possible appearance of a fault. Through the envelope analysis of the acceleration in an electric motor bearing, it is possible to present quantitative data that demonstrate the efficiency of this type of analysis. Thus, this study proposes a guiding question: “what are the main factors that make the vibration signal demodulation (envelope) analysis efficient in detecting faults in deep groove ball bearings of an electric motor with variable rotation?”. To answer this question, the research method is to collect vibration data from an SKF61910 bearing, with a subsequent comparison with its previously calculated characteristic defect frequencies, performing a complete vibration analysis in the digital vibration analysis system (SDAV). The results will be presented quantitatively and qualitatively from the collection of information from primary and secondary sources, including literature review and the use of the SDAV simulator software to obtain computational results. The results indicated that envelope analysis is very sensitive in detecting defects at an early stage, allowing to set up constant monitoring points that are of great importance for predictive maintenance.

Keywords: Vibration Analysis; SDAV; Envelope; Rigid Ball Bearing.

¹ Graduando do curso Engenharia Mecânica, da Faculdade Ciências da Vida, campus Z. marcosandrecvo@hotmail.com

² Mestre em engenharia mecânica; Professor do curso Engenharia Mecânica, da Faculdade Ciências da Vida. andrepireshorta@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

No âmbito industrial a manutenção preditiva é uma técnica estratégica que permite o acompanhamento periódico dos equipamentos, por meio de dados coletados através de monitoração ou inspeções, podendo prever e identificar possíveis defeitos, que a longo prazo poderão causar algum dano maior (SANTOS et al, 2018). De forma geral, a manutenção preditiva prevê falhas através de análise de dados, sendo que, a análise de envelope em mancais de rolamentos está atrelada a ela, contribuindo para que as empresas extraiam o máximo de suas cadeias produtivas.

Os motores elétricos possuem um elemento de transmissão mecânica importantíssimo, chamado de rolamento. O rolamento é uma peça constituída por vários elementos responsáveis por apoiarem a rotação de determinada carga, evitando a fricção de deslizamento, facilitando o deslocamento da mesma (CARVALHO, 2019). Atrelado aos rolamentos está o mancal, que serve como apoio. Os mancais de rolamentos para ambientes industriais trabalham em regime mais exigente e agressivo, demandando assim, de uma atenção maior.

Em uma indústria de grande porte, o ciclo de produção é intermitente, e paradas inesperadas levam à indisponibilidade da instalação, afetando o trabalho funcional, a segurança, o meio ambiente e a capacidade do maquinário. Tudo isso acarreta em elevação dos custos no produto final e perdas excessivas. Uma alternativa confiável para minimizar esses problemas é, utilizar a análise de envelope para acompanhamento do estado operacional dos rolamentos. A análise de envelope é um recurso importantíssimo utilizado na manutenção preditiva (ALMEIDA et al, 2018). Portanto busca-se reunir dados/informações com o propósito de responder o seguinte problema: quais são os principais fatores que tornam a técnica de demodulação do sinal de vibração eficiente em detectar falhas em rolamentos rígidos de esferas de um motor elétrico com rotação variável?

Assim sendo, o objetivo geral deste trabalho será reunir dados/informações que demonstre quais são os principais fatores que tornam a técnica de demodulação do sinal de vibração (envelope) eficiente em detectar falhas em rolamentos rígidos de esfera de um motor elétrico de rotação variável. O presente estudo consiste uma pesquisa de caráter exploratório e descritivo, com a apresentação de análises qualitativas e quantitativas, que demonstre os fatores que tornam a técnica de envelope eficiente em detectar falhas em mancais de rolamentos industriais.

Na indústria atual, a busca por excelência operacional é fundamental para que se possa almejar um futuro promissor. Investir em maquinário de ponta é algo obrigatório, investir em uma manutenção preditiva que aumente a vida útil desses maquinários é mais essencial ainda. Ter em mãos resultados de uma técnica de análise confiável e eficaz irá trazer redução de custos de manufatura, seja com material, ferramentaria/trabalhadores, e redução de eventuais impactos ambientais.

O trabalho de conclusão de curso irá ser estruturado em quatro capítulos, apresentando-se no primeiro a história e definições acerca da manutenção preditiva, rolamentos e a técnica de demodulação do sinal de vibração (envelope). No segundo capítulo, um perfil com os principais tipos de mancais de rolamento e suas aplicações na indústria. Além disso, apresentar uma discussão no que tange aos tipos de defeitos, principais causas de falhas e manutenção em mancais de rolamento. O terceiro capítulo apresenta modelos teóricos que abordam técnicas para análise de envelope em rolamentos industriais. No capítulo quatro, apresentação de amostras de análises, realizadas no software de simulação SDAV (Sistema Digital de Análise de Vibrações).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Tipos de manutenções

A história da manutenção começa com a evolução tecnológica do início da revolução industrial, período este em que a produção era pouco organizada e sistematizada, onde o reparo das máquinas era feito pelos próprios operadores, não havia uma manutenção específica. Como eram eles próprios os responsáveis pela manutenção, eles tinham que ter todas as ferramentas em mãos, daí surgiu o termo MANU (mão) + TENER (ter) = MANUTENER. Segundo Branco (2017), a manutenção é o emprego de um conjunto de ações rotineiras administrativas, técnicas e econômicas para a obtenção de um estado de correto funcionamento dos meios de produção.

2.1.2 Manutenção corretiva

Com o avanço tecnológico e também com a especialização dos operadores, surgiram as primeiras equipes de manutenção. Ao final da 1ª guerra mundial, as unidades fabris

implementam equipes de manutenção, surgindo assim a manutenção corretiva. Segundo Santos et al. (2018) manutenção corretiva é uma técnica de ação imediata, para corrigir uma falha da máquina ou equipamento. Podendo se afirmar que acontece a falha e só depois disso é que um plano de ação é tomado para a solução do problema.

2.1.3 Manutenção preventiva

As equipes de manutenção trabalharam assim até os anos 30. Com a segunda guerra mundial em evidência, foi necessário garantir que alguns equipamentos mais importantes não apresentassem problemas durante o funcionamento. Com essa mentalidade os gestores forçaram as equipes de manutenção a trabalharem na prevenção de problemas, surgindo assim a manutenção preventiva. Segundo Vanzo (2017) a manutenção preventiva é uma técnica de prevenção de possíveis defeitos associado a um plano de ação padrão (como paradas periódicas para troca de peça).

2.1.4 Manutenção preditiva

Já na década de 60, dentro da indústria aeronáutica surge uma técnica de monitoramento de máquinas e equipamentos, onde as condições estáveis dos equipamentos são mapeadas através de parâmetros como vibração e temperatura, chamada de manutenção preditiva. Segundo Baldissarelli et al. (2019) a manutenção preditiva é uma técnica estratégica que permite o acompanhamento periódico dos equipamentos, por meio de dados coletados através de monitoração ou inspeções, podendo prevê e identificar possíveis defeitos, que a longo prazo poderão causar algum dano maior. Já para Marques et al. (2019) a manutenção preditiva consiste em ações de acompanhamento do funcionamento dos equipamentos, onde só será realizada alguma ação se o sistema identificar alguma anomalia.

Para Sousa et al. (2018) a manutenção preditiva no exterior se destaca como um modelo de manutenção eficiente desde os anos 70, já no Brasil, ela só veio a ser utilizada anos depois, e mesmo assim, atualmente, as indústrias brasileiras não implementam todo o potencial da manutenção preditiva. O investimento em manutenção preditiva envolve custos elevados, desde à utilização de equipamentos de ponta até a especificação da mão de obra, sem um planejamento adequado, será necessário um tempo maior para que o investimento auto se pague. Tempo é dinheiro, em uma indústria é muito mais dinheiro ainda.

A manutenção preditiva baseia-se em medições de vibrações, em análises dos lubrificantes e termográfica para dispor resultados do estado atual do equipamento, Estes levantamentos são realizados de forma contínua, sendo que o intervalo das análises irá depender do estado do equipamento. As ações de correção também seguiram esta linha (MARQUES, 2017). Faz-se necessário, portanto, entender os conceitos relacionados à manutenção preditiva, por a análise de vibração ser um dos principais métodos da predição.

2.2 Mancais/rolamentos

Com a ideia fundamental de redução do atrito e a consequente economia de energia, surgiram os rolamentos. O uso dos rolamentos vem deste os primórdios, com relatos históricos de sua implementação desde 4000 A. C. Desde ao uso de rolos de madeira para transportar pedras de grande peso até os rolamentos de metal e materiais nobres de hoje em dia. O mancal de rolamento é um suporte mecânico montado em eixos, para facilitar o deslocamento rotacional, reduzindo assim o atrito/fricção entre as partes rotativas e estacionárias e suportar cargas (CABRAL, 2018). Os rolamentos são muito versáteis, pois oferecem alta precisão e baixo atrito, permitindo uma otimização dos recursos.

2.3 Motores elétricos

Com o intuito de converter energia elétrica em energia mecânica, os motores elétricos nasceram oficialmente no ano de 1866, quando o cientista alemão Werner Siemens inventou o primeiro gerador de corrente contínua auto induzido. Claro que com respaldo a vários outros estudos, pesquisas e invenções de outros cientistas sobre máquinas elétricas que antecederam esse ano histórico, como ao alemão Otto Guericke, que construiu a primeira máquina eletrostática em 1663, ao inglês Michael Faraday que em 1831 descobriu a indução eletromagnética e vários outros notáveis cientistas. Segundo Amaral (2014) os motores elétricos possuem como fundamento transformar energia elétrica em energia mecânica, porem existem diferentes tipos de motores com utilização de diferentes tecnologias, tudo dependerá das características pretendidas. Os diferentes tipos de motores elétricos serão abordados mais a frente, focando no motor de indução trifásico, que será alvo de testes.

2.4 Análise de vibração

Os sinais de vibrações de máquinas rotativas podem informar inúmeras situações, desde o estado normal da máquina até o possível surgimento de alguma falha (SANTOS, 2017). Estudar uma forma de análise destes sinais, se torna extremamente útil e necessário.

A análise de vibração evoluiu muito ao longo da história, em virtude dos grandes avanços tecnológicos. Essa história começa em 1939 quando foi realizada a 1ª publicação sobre utilização da medição de vibrações voltada para monitorar a condição de uma máquina rotativa, surgindo os primeiros guias de orientações. Mais adiante essa técnica de análise de frequência de vibração foi introduzida no ambiente fabril, porém os equipamentos para medição eram enormes e mediam apenas a amplitude das vibrações (quando maior a frequência, pior a máquina estava).

Retornando à revolução industrial, no final dos anos 60, muitos problemas relacionados aos eixos e mancais surgiram nas indústrias locais. Com a evolução dos estudos atrelados à manutenção preditiva, surgiu o conceito de monitoramento do deslocamento de eixos rotativos com medições de proximidade. Também ao final dos anos 60 foi implementado a análise em tempo real/FFT (transformada rápida de Fourier) (ALMEIDA et al, 2018). Anteriormente era possível apenas saber se a amplitude de vibração estava baixa ou alta. Já com a análise FTT já se tornava possível identificar que determinadas frequências eram sinal de possíveis falhas.

Já no início da era digital, a análise de vibração deu um salto grande em termos de praticidade. Os dados que antes eram manuscritos, agora poderiam ser armazenados de forma digital, facilitando a vida dos técnicos. Os equipamentos foram ficando modernos e atualmente é possível analisar medições de aceleração com análise em tempo real a partir de um aparelho celular, bastando ter o APP dedicado a realizar essa tarefa.

2.5 Classificação dos motores elétricos

Todo motor elétrico funciona a partir dos princípios do eletromagnetismo, mediante os quais, condutores situados num campo magnético e atravessados por corrente elétrica, sofrem a ação de uma força mecânica, força essa chamada de torque (GARCIA, 2003). Existem vários modelos de motores elétricos, mas os principais são de corrente contínua e os de corrente alternada.

2.5.1 Motores elétricos de corrente contínua (CC) X motores elétricos de corrente alternada (CA)

O que diferencia um motor elétrico de corrente alternada (CA) pelo motor de corrente contínua (CC) é o método de controle da velocidade, além claro da fonte de alimentação (ARAÚJO, 2015). Portanto um motor CC com alimentação 110 v girando a 1000 rpm pode ter sua velocidade reduzida apenas mudando a tensão de 110v para 55 v por exemplo, enquanto no motor CA é necessário determinar a frequência e corrente para se obter a velocidade desejada, mas isso é solucionado com um inversor de frequência.

No âmbito industrial o motor elétrico CA é o mais utilizado, desde em pequenos servos motores até em grandes máquinas. O princípio de rotação consiste na força de campos magnéticos induzidos pela corrente alternada que flui através de bobinas elétricas (BRITO, 2002). Todos os componentes: estator, rotor, ventilador, rolamentos, dentre outros, são alojados dentro de um invólucro projetado para proteção e controle da geração de calor.

A montagem errada, a falta de lubrificação e o desalinhamento dos rolamentos de um motor elétrico podem gerar vibrações excedentes aos padrões do equipamento, acarretando, portanto, em perdas no rendimento mecânico. O elemento de máquina rolamento presente nos motores, serão alvos de estudo e análise nos próximos capítulos.

2.6 Classificação dos rolamentos industriais

Quando são exigidos volume e aplicação com maior velocidade e menor atrito, evitando perdas de energia, o emprego dos rolamentos é essencial. Existem 3 tipos tradicionais de rolamentos, sendo classificados pelo elemento interno rolante. Rolamento de esfera, rolamento de rolo e rolamento de agulha.

Figura 1 – Principais modelos de rolamentos




Os rolamentos de esfera são caracterizados pela capacidade de operação em altas rotações enquanto rolamentos de rolos são diferenciados pela elevada capacidade de carga, enquanto, já os rolamentos de agulha são aplicados em locais onde a delimitação de espaço é menor. Respeitando a particularidade de cada um como, número de carreiras, direção predominante de suporte de carga e capacidade de compensar desalinhamentos (SILVA,2018). Os motores elétricos em sua grande maioria utilizam os rolamentos de esferas, pois demandam de grandes velocidades e menos peso.

Para Santiago (2018) os mancais de rolamentos estão presentes em praticamente qualquer mecanismo, sendo responsável por apoiar o movimento relativo entre dois elementos em uma ou duas dimensões, restringindo o deslocamento nas demais. A aplicação do mancal influencia muito em uma boa operação do sistema como um todo, sendo que uma instalação incorreta ou a falta de manutenção, causará prematuramente o aumento da vibração, ruídos e até causar uma falha catastrófica no sistema.

2.6.1 Principais modos de falhas em mancais de rolamentos

As causas de falha em rolamentos assumem diversas hipóteses além do normal aparecimento de fissuras abaixo da superfície da zona de deslizamento e nos elementos rolantes. As principais causas externas que contribuem para a redução do tempo útil de vida do rolamento são: contaminação, corrosão, lubrificação imprópria e problemas na instalação (ARAUJO, 2015). Após estudos realizados, foi possível desenvolver fórmulas capazes de calcular as frequências características de defeito e as suas harmônicas.

Figura 2 - Fórmulas para cálculo de frequência de defeito em rolamentos

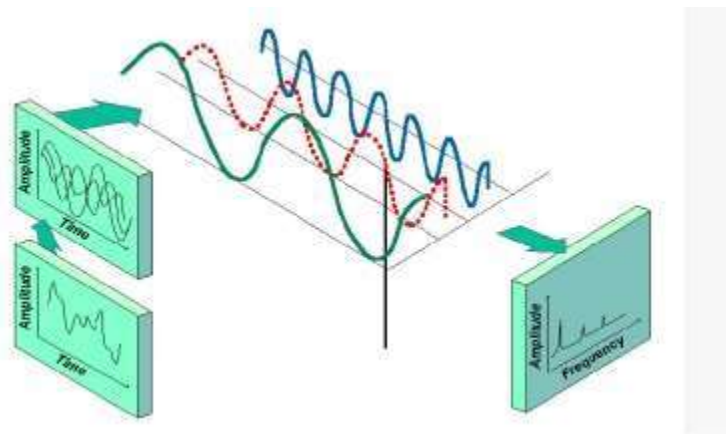


BPFi → Defeito na pista externa (Hz) = $\frac{n}{2} f \left(1 - \frac{DE}{DP} \cos \beta \right)$
 BPFO → Defeito na pista interna (Hz) = $\frac{n}{2} f \left(1 + \frac{DE}{DP} \cos \beta \right)$
 BSF → Defeito no elemento rolante (Hz) = $f \frac{DP}{DE} \left[1 - \left(\frac{DE}{DP} \cos \beta \right)^2 \right]$
 FTF → Defeito na gaiola (Hz) = $\frac{1}{2} f \left(1 - \frac{DE}{DP} \cos \beta \right)$
 $DP = \frac{D1 + D2}{2}$
 n = número de elementos rolantes
 f = frequência de rotação
 DE = Diâmetro elemento rolante
 DP = Diâmetro primitivo
 β = ângulo de contato

2.7 Análise da frequência

Cada um dos diversos componentes de uma máquina gera vibrações a uma determinada frequência. Ao fim forma-se a união dessas vibrações, formando a vibração ao longo do tempo.

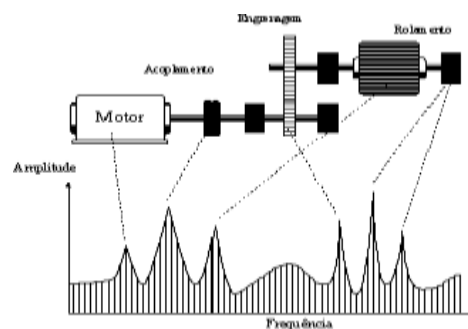
Figura 3 - Relação entre o sinal no tempo e o espectro de frequência



Fonte: <https://www.dmc.pt/medicao-de-vibracoes>

O processo de demodulação de sinais vibratórios ou envelope consiste em filtrar as ondas emitidas em sinais de alta frequência, realizando a prototipagem dos mesmos (KUHN, 2019). Através do espectro de frequência consegue-se saber qual a componente da máquina que origina as vibrações.

Figura 4 - Componente da máquina/origem das vibrações



Fonte: <https://www.dmc.pt/medicao-de-vibracoes>

2.7.1 Emprego da Análise de Envelope

O envelope de um sinal é definido por uma função que encapsula as extremidades do mesmo, através do componente de modulação de amplitude. As assinaturas de falhas geralmente se encontram nos sinais vibratórios. Aplicando-se os métodos apropriados é possível encontrar as frequências com características padrões de defeito (CAVALCANT, 2018). O que é confirmado por Biesek Junior (2017), que afirma que a demodulação da amplitude na região de ressonância, geralmente na região de alta frequência do sinal, responsável por excitar a frequência natural dos componentes, permite a análise das chamadas “frequências características de defeitos”. As frequências características de defeitos dos rolamentos foram citadas no capítulo acima. Portanto o envelope de um sinal permitirá diferenciá-lo entre um sinal normal de um sinal característico de defeito nos componentes dos rolamentos.

Figura 5 - Procedimento adotado na demodulação de sinal



Fonte: OLIVEIRA, 2018

Existe uma distinção entre a vibração global da máquina para defeitos específicos, dependendo do ponto na máquina onde a medida é realizada, ela vai indicar um ou outro tipo de defeito. Lembrando que ela apenas indica, ela não é certa. Sempre será necessário um analista ou mecânico capacitado para interpretar os resultados.

Os níveis globais de vibração seguem como base a Organização Internacional de Normalização (ISO)2372/10816, onde são elencados os diâmetros médios (mm) dos rolamentos, juntamente com a velocidade média (rpm) de rotação da máquina, para a obtenção do pico máximo global que cada máquina pode alcançar. O que é exemplificado na figura a seguir.

Figura 6 - Limites de vibração baseados na ISO 10816 para rolamentos

NORMA ISO 10816			
Critérios para julgamento do estado de rolamentos			
peak to peak	Diâmetro entre 200 a 500 mm e velocidade <500 rpm	Diâmetro entre 50 a 300 mm e velocidade entre 500 a 1800 rpm	Diâmetro entre 20 a 150 mm e velocidade entre 1800 a 3600 rpm
0,1	BOM	BOM	BOM
0,5	ADEQUADO	BOM	BOM
0,75	ADEQUADO	ADEQUADO	BOM
1	ADMISSÍVEL	ADEQUADO	ADEQUADO
2	INADMISSÍVEL	ADMISSÍVEL	ADEQUADO
4	INADMISSÍVEL	ADMISSÍVEL	ADMISSÍVEL
10	INADMISSÍVEL	INADMISSÍVEL	INADMISSÍVEL

Fonte: ISO 10816 (ARAUJO, 2015)

3. METODOLOGIA

O presente estudo consiste em pesquisas documentais com caráter exploratório, à periódicos, livros, relatórios estatísticos e softwares como: *Science Direct*, *The American Society of Mechanical Engineers (AMSE)*, *Scientific Eletronic Library Online (SCIELO)*, *Google Scholar* e *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)*, ferramenta *SKF Bearing Select*, software *SDAV*, com o objetivo de relacionar as teorias já existentes sobre manutenção preditiva e o uso da técnica de demodulação do sinal de vibração (envelope) em rolamentos, apresentando subsídios de informações que possam servir de diretrizes para a construção do documento.

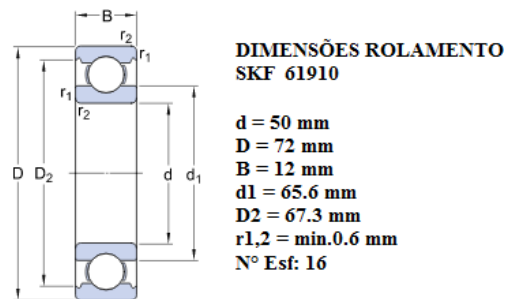
Portanto os resultados serão apresentados sobre forma quantitativa e qualitativas a partir da coleta de informações de fontes primárias e secundárias, incluindo revisão bibliográfica e a utilização do software simulador *SDAV* para obter resultados computacionais. O software *SDAV* permite criar um simulador que reproduz virtualmente uma máquina a ser analisada (motor elétrico com rolamento SKF61910), onde são definidos os parâmetros de medidas, espectros, filtros, sensores e os diversos dados para análise completa, como: gráfico de tendências, espectro de frequências, sinal no tempo, tabela de medidas. Também são utilizadas ferramentas auxiliares como: alarmes, harmônicas; integração digital; filtro digital; análise de frequências de defeitos.

Todas essas análises estatísticas irão identificar e apresentar os principais fatores que tornam a técnica de envelope eficiente em detectar falhas em rolamentos rígidos de esferas de um motor elétrico com rotação variável.

4. ANÁLISE DE DADOS

Será utilizado o software digital SDAV (Sistema Digital de Análise de Vibrações) para realizar experimentos direcionados à análise de espectros de envelope e a ferramenta SKF Bearing Select para confirmação dos cálculos. Primeiramente foi realizado o cálculo para descobrir as frequências de defeito do rolamento SKF 61910 a uma rotação de 1200 Rpm.

Figura 7 – Dimensões do rolamento SKF 61910



Fonte: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-61910>

Foram realizados os cálculos para identificar as frequências de defeito na pista externa (BPFI), frequências de defeito na pista interna (BPFI), frequências de defeito do elemento rolante (BSF) e frequências de defeito na gaiola (FTF). Os cálculos foram efetuados realizando as orientações da figura acima e o resultado confirmado através da ferramenta SKF Bearing Select. Os resultados estão apresentados a seguir:

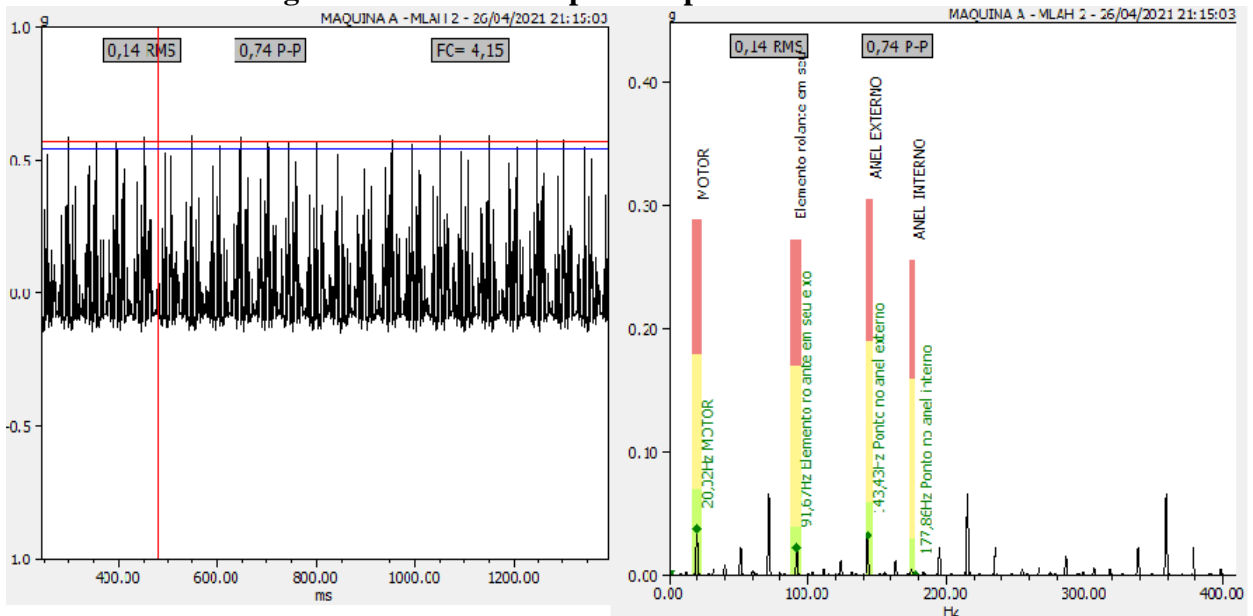
Figura 8 - Elemento rolante utilizado para teste/frequências características

ROLAMENTO	ROTAÇÃO (RPM)	Frequências rotacionais (Hz)				Frequência característica de defeito (Hz)		
		Anel interno	Anel externo	Conjunto de elementos rolantes e gaiola	Elemento rolante em seu eixo	Ponto no anel interno	Ponto no anel externo	Elemento rolante
SKF 61910	1200	20	0.0	8.894	89.304	177.697	142.303	178.609

Fonte: Autoria própria.

A fim de obter um resultado satisfatório, foram simulados 10 pontos de coleta para o rolamento SKF 61910. Depois de calculados as frequências características de defeito de cada componente do rolamento, o próximo passo foi escolher o melhor ponto para posicionar o acelerômetro, aparelho responsável pela captação das vibrações da máquina. Um motor elétrico apresenta diversos pontos de medidas, dentre elas estão: MLOH = Motor Lado Oposto Horizontal, MLAH = Motor Lado Acoplado Horizontal, MLAV = Motor Lado Acoplado Vertical e o ponto MLAA = Motor Lado Acoplado Axial (MANUAL SDAV, 2016), a escolha do melhor ponto dependerá do objetivo de coleta proposto. Como nosso objetivo é coletar dados de vibrações do rolamento do motor, o principal ponto de coleta será o MLAH = Motor Lado Acoplado Horizontal.

Figura 9 - Sinal no tempo e o espectro do sinal simulado

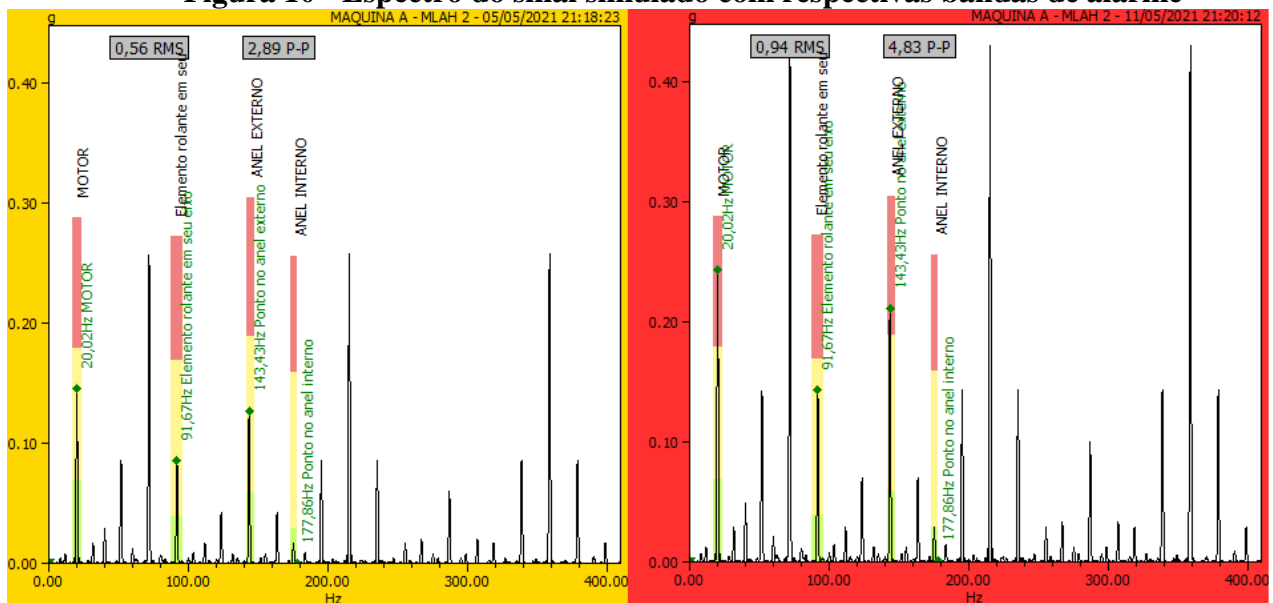


Fonte: Autoria própria

Escolhido o ponto de medida o próximo passo foi capturar os sinais de vibração. Há 3 métodos de coleta dos sinais vibratórios, pela unidade de velocidade (mm/s), pela aceleração (m/s^2) e pelo envelope da aceleração. O sinal de velocidade do movimento vibratório está associado à energia dissipada pela vibração sendo assim é comum utilizar esse sinal para encontrar defeitos de desbalanceamento, empenamento, folgas, dentre outros. Já o sinal de aceleração do movimento vibratório está associado à mudança rápida de posição, sendo utilizado para filtrar defeitos que geram altas frequências, como, engrenagens, cavitação e até mesmo falhas em rolamentos. Já os defeitos nos rolamentos e/ou pistas dos rolamentos são responsáveis por pulsos de vibrações em alta frequência, que por esse motivo podem ser medidos através do processo de demodulação do sinal de aceleração, conhecido como

envelope da aceleração. Foi possível notar que no envelope da aceleração os sinais de baixas frequências foram eliminados e o processo de demodulação elimina os sinais de alta frequência que possuem amplitudes constantes, dessa forma é possível alinhar as frequências características de defeitos calculadas anteriormente com esses sinais de impactos de alta frequência que sobraram, evidenciando com clareza o defeito. Então a partir daí foi possível programar um monitoramento através de alarmes pré-estabelecidos de acordo a ISO 10816.

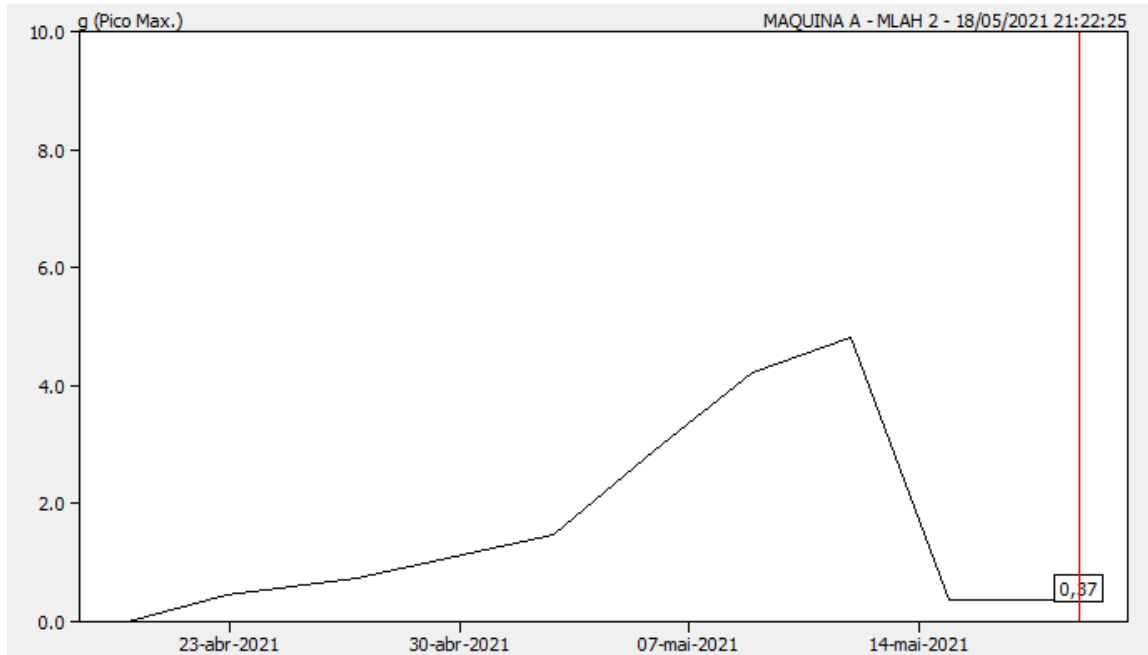
Figura 10 - Espectro do sinal simulado com respectivas bandas de alarme



Fonte: Autoria própria

Os valores dos alarmes foram estabelecidos com base na filosofia da manutenção preditiva. A escala da norma ISO 10816 indica uma mudança do estado da máquina em uma razão de 2X6 o nível de vibração, ou seja, o nível de vibração é bastante sensível a mudança de condição da máquina. Então os alarmes foram estipulados antes que o nível de vibração atual da máquina dobre, sendo estipulado em um valor de 60% do valor inicial, garantindo que o sistema avise que a máquina mudou de estado, mas que ainda dá tempo de tomar providências antes de chegar a níveis críticos.

Figura 11 – Gráfico de tendência g(pico a pico) do rolamento SKF 61910



Fonte: Autoria própria

Após o monitoramento das frequências características de defeitos, o SDAV calculou o nível global (PICO A PICO) de todos os sinais compostos no espectro. É possível verificar no gráfico que a evolução de defeito do rolamento SKF 61910, até atingir os alarmes pré-estabelecidos de alerta. Após o alerta, medidas preditivas pré-estabelecidas foram tomadas. Com a manutenção da máquina de forma planejada é possível verificar claramente através do gráfico acima uma queda drástica nos níveis de vibração e sua estabilização.

Figura 12 – Tabela de tendências do rolamento SKF 61910

Unidade:	Freq. Max:	N. Pontos						
Canal 1	g	1kHz	8k					
Bandas	RPM	°C	RMS	Pico Max.	MOTOR	Elemento rolante em seu	ANEL EXTERNO	ANEL INTERNO
Alarmes					✓	✓	✓	✓
Nível 1					0,07	0,04	0,06	0,03
Nível 2					0,18	0,17	0,19	0,16
Freq. Inf					16,85	87,52	141,36	172,85
Freq. Sup					23,19	95,34	146,24	177,25
Data Hora	RPM	°C	RMS	Pico Max.	MOTOR	Elemento rolante em seu	ANEL EXTERNO	ANEL INTERNO
18/05/2022	0,00	0,00	0,07	0,37	0,02	0,01	0,02	0,00
14/05/2022	0,00	0,00	0,07	0,37	0,02	0,01	0,02	0,00
11/05/2022	0,00	0,00	0,94	4,83	0,24	0,14	0,21	0,03
08/05/2022	0,00	0,00	0,82	4,23	0,21	0,13	0,19	0,03
05/05/2022	0,00	0,00	0,56	2,89	0,15	0,09	0,13	0,02
02/05/2022	0,00	0,00	0,29	1,48	0,07	0,04	0,06	0,01
29/04/2022	0,00	0,00	0,22	1,11	0,06	0,03	0,05	0,01
26/04/2022	0,00	0,00	0,14	0,74	0,04	0,02	0,03	0,00
22/04/2022	0,00	0,00	0,09	0,44	0,02	0,01	0,02	0,00
19/04/2022	0,00	0,00	0,00	0,00				

Fonte: Autoria própria

Pode se observar nos dados da tabela de tendências acima que no dia 02/05/2021 o alarme de entrada no estado admissível foi ativado, para defeito no anel externo do rolamento e também para a frequência do motor, após alguns dias nessa faixa, podemos notar que no dia 11/05/21 foi emitido um alarme de entrada no estado inadmissível do anel externo do rolamento, após o uso limite do rolamento, uma parada já programada foi efetuada para troca do mesmo. Após a troca foi possível verificar a queda e estabilização da vibração dos elementos em análise.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo teve como questão norteadora: “quais são os principais fatores que tornam a técnica de demodulação do sinal de vibração (envelope) eficiente em detectar falhas em rolamentos rígidos de esferas de um motor elétrico com rotação variável? ”. A fim de respondê-la, o estudo se propôs em analisar um rolamento rígido de esfera SKF 61910 de um motor elétrico, através do sistema digital de análise de vibrações (SDAV). Devido ao estado de calamidade pública imposta pelo COVID-19, os testes práticos em campo foram impossibilitados, mas o software SDAV se apresentou extremamente eficiente na coleta dos dados.

Após os cálculos realizados em cima das medidas do rolamento SKF61910 foi possível identificar as frequências características de defeito do elemento. Após isto os sinais simulados na máquina virtual foram analisados e comparados as referidas frequências de defeitos. Tendo em vista que o rolamento SKF61910 se encaixa na faixa de 50 a 300 mm e o motor gera uma velocidade entre 500 a 1800 rpm, os dados apresentados evidenciaram que os valores encontrados são condizentes com os níveis de alerta pré-estabelecidos na norma ISO 10816. Por fim, a resposta ao nosso problema de pesquisa está implícito na análise de dados, onde foi identificado que a análise de envelope no rolamento se tornou muito eficiente pelo motivo de eliminar os sinais de alta frequência que possuíam amplitudes constantes, sobrando apenas os sinais de impactos de alta frequência, condizentes com as frequências características de defeito do rolamento. Sendo muito sensível em detectar defeitos no estágio inicial, auxilia na montagem de pontos de monitoramento constante, o que é essencial para uma boa manutenção preditiva.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Bruno Anibal Moura - **Diagnóstico de avarias em motores elétricos**. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014. Dissertação de mestrado. DOI: <http://hdl.handle.net/10400.21/3322>.

ARAÚJO, Rui Gonçalo Clara. **Desenvolvimento de um sistema de diagnóstico de falhas em motores elétricos de indução**. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2015. DOI: <http://hdl.handle.net/10362/15709>.

BALDISSARELLI Luciano; Elton Fabro. **Manutenção Preditiva na indústria 4.0**. DOI: 10.18226/23185279.v7iss2p12.

BARROS JÚNIOR, José Jurandir de. **Análise do desgaste do contato seco/lubrificado entre metais**. 2019. 47f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. DOI: <http://monografias.ufrn.br/handle/123456789/10113>.

BIESEK JÚNIOR, Luís Carlos. **Deteção de desalinhamento por análise de vibração**. 2017. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017. DOI:<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9263>.

BRITO, Jorge Nei. **Desenvolvimento de um sistema inteligente hibrido para diagnostico de falhas em motores de indução trifásicos**. 2002. 214p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/265217>>.

CABRAL, Karina Chemim. **Análise de falha em mancal de rolamento autocompensador de rolos de uma máquina de papel**. 2018. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2018. DOI: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/11072>.

CRISTIANO SIMPLÍCIO GUIMARÃES DE ALMEIDA; Lucas Costa Brito; Hermes Dias Godinho; Jorge Nei Brito et al. **APLICAÇÃO DA METODOLOGIA MASP E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NA RESOLUÇÃO DE FALHA**. In: ANAIS DO XVIII CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA Mecânica E INDUSTRIAL, 2018, Joinville. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2020. Doi :10.17648/conemi-2018-91277.

GARCIA, Agenor Gomes Pinto - **IMPACTO DA LEI DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA MOTORES ELÉTRICOS NO POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA: PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO - RIO DE JANEIRO**, 2003.

JORGE Nei Brito. **PLANO DE MANUTENÇÃO DE ATIVOS FÍSICOS COMO PARTE ESTRATÉGICA DO NEGÓCIO**. In: ANAIS DO XVIII CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL, 2018, Joinville. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2020. Doi: 10.17648/conemi-2018-91231.

KUHN, Luiz Eduardo. **Estudo dirigido ao balanceamento de sistemas através da análise de sinais vibratórios: emprego de um software e de uma bancada experimental**. 2019. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019. DOI: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/12692>.

MARQUES ANA CLAUDIA, Jorge Nei Brito. **Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos**. DOI:10.34117/bjdv5n7-095.

MARQUES, Gabriel Rezende. **Manutenção centrada em confiabilidade: estudo de caso da eficácia dos equipamentos industriais**. 2017. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. DOI: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/19528>.

MERCURI, José Renato; MARTINS, Otávio Ferreira; TRAUTMANN, Paulo Victor. **Desenvolvimento de um sistema supervisor para análise de motores elétricos através**

da vibração mecânica. 2011. 127 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9922>.

MURBACH JUNIOR, Eduardo. **AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA EM PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE ROLAMENTO.** DOI: <http://hdl.handle.net/11449/138119>.

NOGUEIRA BRANCO, Henrique Alves Junqueira , Thiago Salomão Cavalcanti. **Elaboração de um plano de manutenção preventiva para o centro de usinagem CNC ROMI DISCOVERY 760.** DOI: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20554>.

NORMA ISO 2372/10816. **Verificação dos níveis de vibração.**

OLIVEIRA, Gabriel Boratto; Cristiano Henrique Moreira; Jorge Nei Brito. **A INFLUÊNCIA DE UM ROLAMENTO DEFEITUOSO NA MEDIÇÃO DE UM ROLAMENTO SEM DEFEITO – COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO E ULTRASSONOGRRAFIA.** In: ANAIS DO CONGRESSO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI, 2018, São João Del Rei. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2018. Doi: 10.17648/coen-2018-89442.

ROCHA JUNIOR, João Dehon. **ANÁLISE DO DESGASTE EM MANCAIS RADIAIS DE MOTORES USANDO INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO.** DOI: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/28708>.

SANTIAGO, Iago Henrique Lima. **Avaliação tribológica de um compósito a base de PTFE aplicado em mancais de deslizamento.** 2018. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. DOI: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/26261>.

SANTOS, M.; ARAÚJO, M. M.; LIMA, A. R. **Manutenção preditiva: contribuindo para a melhoria dos processos e para a redução dos custos de operação.** In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 10., 2018, São Cristóvão, SE. Anais [...]. São Cristóvão, SE, 2018. p. 342 - 358. DOI: <http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/10421>.

SANTOS, Rodolfo de Sousa. **Deteção de falhas em rolamentos de máquinas rotativas utilizando técnicas de processamentos de sinais.** Doi: <http://hdl.handle.net/11449/151409>.

SILVA, Deivison das Graças. **ESTUDO DA EVOLUÇÃO DO DESGASTE EM ROLAMENTOS COM USO DE CONDICIONADOR METÁLICO.** DOI: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/575>.

SILVA, Raíssa Maradja Kadydja. 2018. 60f. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica)** - Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.DOI: <http://monografias.ufrn.br/handle/123456789/7902>.

TASSIRO, Willian Arruda. **O IMPACTO DA DISPONIBILIDADE DE MÁQUINA EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL: UM ESTUDO DE CASO.** DOI:<http://www.riuni.unisul.br/handle/12345/4399>.

VANZO, Fernanda do Carmo Silvério. **Metodologia para predição de tempo de falha de máquinas e equipamentos baseada no monitoramento de vibração.** Uberlândia, 2017. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Doi: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1109>.

VISSOCI JUNIOR, Rodney Luis. **Confiabilidade em equipamentos rotativos baseado em monitoramento de condição: aumento da confiabilidade de equipamentos rotativos em empresas de papel e celulose.** 2016. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.DOI: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8486>.