

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS
CURSO ENGENHARIA MECÂNICA**

ALLAN DE LUCA MORAIS VASCONCELOS

**INSTALAÇÃO DE LUBRIFICADORES AUTOMÁTICOS NOS
ROLAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS**

VARGINHA – MG

2022

ALLAN DE LUCA MORAIS VASCONCELOS

**INSTALAÇÃO DE LUBRIFICADORES AUTOMÁTICOS NOS ROLAMENTO DE
MOTORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, sob orientação do Prof. Me. Jonathan Oliveira Nery.

VARGINHA – MG

2022

**INSTALAÇÃO DE LUBRIFICADORES AUTOMÁTICOS NOS ROLAMENTO DE
MOTORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, sob orientação do Prof. Me. Jonathan Oliveira Nery.

Aprovado em: / /

Prof. Me. Jonathan Oliveira Nery

Prof.

Prof.

OBS.:

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pelas bênçãos durante essa jornada, aos meus pais Luciane Aparecida Morais e Fausto Vasconcelos, dedico também a minha tia/madrinha Flávia Maria Morais de Lanna que foram meu alicerce, e que foram as peças fundamentais para que esse sonho se realizasse, em geral a toda minha família que sempre me apoiaram e a todas as demais pessoas que me apoiaram nessa extensa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que estiveram ao meu lado, me apoiando e incentivando. Em especial aos meus pais Luciane Aparecida Morais e Fausto Vasconcelos e também minha tia/madrinha Flávia Maria Morais de Lanna que acreditaram em mim e sempre estiveram ao meu lado durante toda essa jornada. Agradeço ainda, a minha namorada Helena Nogueira, que seguiu me dando mais forças e me apoiando em todos meus objetivos e sonhos. Sou extremamente grato a empresa onde trabalho que sempre me apoiou e abriu as portas pra mim. E agradeço a todos os professores e ao meu orientador Jonathan Oliveira Nery pelo empenho, e pelos ótimos ensinamentos.

EPÍGRAFE

“Tudo que um sonho precisa para ser realizado, é alguém que acredite que ele possa ser realizado”.

Roberto Shinyashiki.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma melhoria no processo de lubrificação desenvolvido em uma indústria automobilística. A indústria está localizada na região do Sul de Minas, na cidade de Varginha. Durante a pesquisa acadêmica, foi possível identificar alguns problemas e identificar melhorias a serem aplicadas a fim de colaborar diretamente com o processo da empresa e a manutenção de equipamentos. O projeto realizado apresentou uma inovação com uma tecnologia recente em processos de lubrificação que é a lubrificação automatizada, apresentando uma melhora no procedimento técnico de realizar a lubrificação visando a segurança e tempo para mão de obra. O objetivo desse trabalho é avaliar a instalação dos lubrificadores automáticos nos rolamentos dos motores elétricos, cujo motores são os equipamentos mais críticos da empresa, com riscos de parada do processo de produção de forma direta, onde os lubrificadores serão instalados para evitar falhas nos processos de lubrificação manual, permitindo melhor eficiência no modo de lubrificação que é realizada de forma contínua, sendo monitorada por análises de vibrações mecânicas que apontam possíveis falhas de lubrificação do equipamento. A implementação desse projeto fez com que a lubrificação do equipamento fosse mais eficiente, confiável e segura, apresentando a melhora do processo e atendendo as necessidades abordadas.

Palavras-chave: Processo de lubrificação; Lubrificadores automáticos; Motores elétricos.

ABSTRACT

This work presents an improvement in the lubrication process developed in an automobile industry. The industry is located in the southern region of Minas, in the city of Varginha. During the academic research, it was possible to identify some problems and identify improvements to be applied in order to collaborate directly with the company's process and equipment maintenance. The project carried out presented an innovation with a recent technology in lubrication processes that is automated lubrication, presenting an improvement in the technical procedure of carrying out the lubrication aiming at safety and time for labor. The objective of this work is to evaluate the installation of automatic lubricators in the bearings of electric motors, whose motors are the most critical equipment of the company, with risks of stopping the production process directly, where the lubricators will be installed to avoid failures in the production processes. manual lubrication, allowing better efficiency in the lubrication mode that is performed continuously, being monitored by mechanical vibration analysis that point out possible equipment lubrication failures. The implementation of this project made the lubrication of the equipment more efficient, reliable and safe, presenting the improvement of the process and meeting the needs addressed.

Keywords: Lubrication process; automatic lubricators; Electric motors.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Sistemas automáticos de lubrificação	12
2.2 Tribologia	14
2.3 Monitoramento da condição dos rolamentos	14
2.4 Consequências das vibrações em rolamentos	15
2.4.1 Estágio 1- Início dos primeiros furos ou rachaduras	15
2.4.2 Estágio 2- Aumento da quantidade de defeitos	15
2.4.3 Estágio 3- Rolamento ruim	16
2.4.4 Estágio 4- Quebra do rolamento	16
2.5 Excesso de graxa nos rolamentos	17
2.5.5 Cuidados com a lubrificação em excesso	17
2.6 Volume e periodicidade da lubrificação	19
2.6.1 Definição de volume	20
2.6.2 Definição de periodicidade	20
3 METODOLOGIA	23
3.1 Primeiras análises vibracionais do motor	23
3.2 Dimensões dos rolamentos	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01	– Diagrama da eficiência da lubrificação manual x automática	12
FIGURA 02	– Principais causas de defeitos em rolamentos	13
FIGURA 03	– Espectro do estágio 4	17
FIGURA 04	– Dreno de lubrificação do motor elétrico	18
FIGURA 05	– Local de aplicação da graxa no motor elétrico	19
FIGURA 06	– Diagramas de intervalos de lubrificação	21
FIGURA 07	– Fatores de correção para intervalos de lubrificação a graxa	22
FIGURA 08	– Fórmula para cálculo de frequência de lubrificação	22
FIGURA 09	– Motor lado direito: Primeiras análises	24
FIGURA 10	– Motor lado esquerdo: Primeiras análises	24
FIGURA 11	– Motor lado direito: Análises novas	25
FIGURA 12	– Motor lado esquerdo: Análises novas	26
FIGURA 13	– Lubrificador automático instalado	27
FIGURA 14	– Acelerômetros no motor elétrico	28
FIGURA 15	– Gráfico do motor 1	29
FIGURA 16	– Gráfico do motor 2	30

1 INTRODUÇÃO

A lubrificação consiste na formação de uma película que impede o contato direto entre duas superfícies, que se movam relativamente entre si, reduzindo ao mínimo, o atrito entre as partes. Ela tem papel importante em manter a integridade, reduzir choques e aumentar a vida útil dos ativos, quando corretamente aplicada, minimiza danos causados por temperaturas altas, corrosão e atritos (VEDAN ALEX, 2021).

A instalação de lubrificadores automáticos em motores elétricos melhora as condições de lubrificação evitando contaminação do lubrificante, otimizando tempo com paralisações e perda de produção para realizar a lubrificação manual e são uma maneira eficaz de aumentar a disponibilidade da máquina.

Segundo Svenska Kullager Fabriken (2022), esses sistemas de lubrificação proporcionam a quantidade de lubrificação apropriada nos intervalos corretos, minimizando o atrito e o desgaste e otimizando a vida útil do rolamento e das máquinas. Um sistema de lubrificação automática faz a lubrificação continuamente enquanto a máquina está em funcionamento. A lubrificação enquanto os rolamentos estão girando também melhora a distribuição do lubrificante. A instalação de lubrificadores automáticos irá influenciar o processo de lubrificação, mas deve se atentar também para os cuidados necessários com as possíveis falhas do sistema de lubrificação automática.

Os lubrificadores automáticos otimizam tempo com paralisações dos equipamentos que necessitam ser realizadas pela segurança do colaborador para realizar a lubrificação e facilitam o processo de lubrificação em locais de difícil acesso. A vida útil de rolamentos diminui devido a um dos principais fatores em falhas de rolamentos e máquinas, considerando falhas no processo de lubrificação que pode acontecer a partir de contaminação dos lubrificantes, falhas nos períodos e processo de relubrificação (SVENSKA KULLAGER FABRIKEN, 2022).

A instalação dos lubrificadores fará com que não haja falha na periodicidade da relubrificação, pois são ajustados para operar em função da quantidade de lubrificante em relação ao intervalo de tempo e impedem a contaminação dos lubrificantes pois isolar totalmente o lubrificante da área externa, afastando de qualquer umidade do ambiente, poeira e outras partículas contaminantes prejudiciais para o rolamento (SVENSKA KULLAGER FABRIKEN, 2022).

Os lubrificadores automáticos também necessitam de cuidados realizando inspeções diárias sobre suas condições de funcionamento devido sua programação apresentar relatórios de falhas, como ar no sistema do lubrificador que pode ser desativado temporariamente ou podendo ocorrer seu desligamento, já que são alimentados por pilhas ou baterias.

Será apresentado a automatização do processo de lubrificação, visando a otimização do tempo de parada da máquina, mantendo as boas condições de vida útil dos rolamentos dos motores elétricos e realizando a lubrificação com o máximo de eficiência, seguindo os seguintes passos:

- Conceituar e estudar o processo de lubrificação;
- Apresentar as contribuições da automatização de processos;
- Apresentar os dados calculados de lubrificação em relação a quantidade e periodicidade;
- Especificar o tipo de lubrificador automático ideal;
- Realizar a automatização do processo de lubrificação instalando os lubrificadores automáticos nos motores elétricos;
- Realizar mensalmente coletas de análises de vibração mecânica para acompanhamento da eficiência da lubrificação;
- Analisar a resposta vibracional em aceleração com os lubrificadores automáticos.

Visando a economia financeira, a otimização com tempo de mão de obra, segurança, aumento geral da produtividade, ajuda com o meio ambiente e eficiência, a automatização do processo de lubrificação tem suma importância dentro dos princípios de soluções e melhorias para reduzir custos que as empresas buscam, sendo assim elas tem reconhecido esse processo e buscando aplicá-lo com o máximo de eficiência.

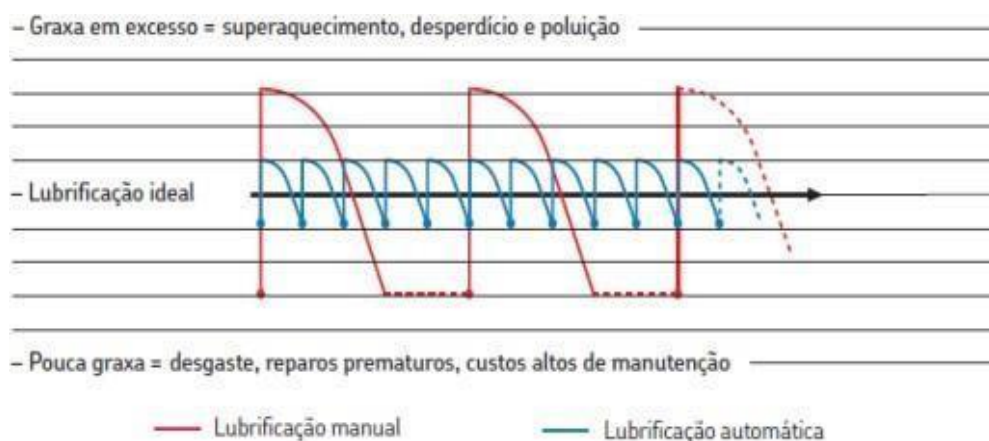
2 REFERENCIAL TEÓRICO

A lubrificação manual apresenta dificuldades em ser realizada no seu procedimento correto, pois é influenciada por fatores essenciais, como a dosagem correta do lubrificante que pode ser não controlado corretamente devido alguns pontos, como uma falta de calibração da ferramenta de aplicação do lubrificante e contaminações durante o procedimento (SVENSKA KULLAGER FABRIKEN, 2022).

2.1 Sistemas Automáticos de Lubrificação

Os pontos de lubrificação se apresentam como um desafio, devido a variedade e quantidade de pontos a serem lubrificados, principalmente em lugares de difícil acesso ou lugares que podem não apresentar totais condições de segurança ao técnico responsável. Pode ser visto na figura 1, o diagrama de uma lubrificação ideal, e na figura 2 pode ser observado as causas raízes de falhas que ocorrem durante a vida útil dos rolamentos e durante todo seu uso onde, em rolamentos 36% das falhas ocorrem pela má realização do procedimento de lubrificação (SVENSKA KULLAGERFABRIKEN, 2022).

Figura 01 – Diagrama de eficiência de lubrificação manual x automática



Fonte: Svenska Kullager Fabriken (2022)

Figura 02 – Principais causas de defeitos em rolamentos



Fonte: Svenska Kullager Fabriken (2022).

Um lubrificador automático proporciona benefícios para uma máquina devido a aplicação de lubrificantes e manualmente regulado de acordo como especificado. A confiabilidade da máquina diante de um sistema de lubrificação automática também apresenta um grande aumento, conseqüentemente otimizando paradas para intervenção da manutenção gerando maior produtividade (MEGDA RAFAEL, 2018).

A utilização de lubrificadores automáticos é uma alternativa que pode melhorar a segurança do trabalhador e visando o aumento da confiabilidade da máquina (SVENSKA KULLAGER FABRIKEN, 2022 p.2).

Aproximadamente 36% das falhas prematuras de rolamentos ocorrem devido a lubrificação inadequada, como o excesso, a falta ou o tipo incorreto de lubrificante. Em 14% dos casos, as falhas de rolamentos ocorrem em função de contaminação através de vedações ou práticas de manuseio de lubrificante inadequadas (SVENSKA KULLAGER FABRIKEN, 2022 p.4).

Segundo Megda (2018), diante de uma revolução tecnológica visando o procedimento de lubrificação industrial, aplicações de manutenção preditiva para condição de monitoramento é visto com um grande potencial para utilização. É possível a partir de manutenções preditivas apresentar os problemas, causas raízes e indicar o momento ideal para realizar uma relubrificação.

2.2 Tribologia

A tribologia é o estudo do atrito, lubrificação e desgaste causado pela interação entre sistemas mecânicos. O estudo da tribologia se torna fundamental para o desenvolvimento de novas tecnologias. Um método chave para diminuir o atrito e conseqüentemente o desgaste é lubrificar o sistema (DUARTE JUNIOR, 2005).

A palavra "tribologia" (do grego: τριβος = fricção ou atrito) foi primeiro cunhada em 1966 por um comitê do governo do Reino Unido, embora fricção, lubrificação e desgaste tenham sido estudados por muitos anos antes e tenham uma longa e fascinante história. Esse comitê também fez uma estimativa das economias que poderiam ser feitas pela indústria do Reino Unido se os princípios tribológicos conhecidos fossem amplamente aplicados (HUTCHINGS, 2017 apud MEGDA, 2018).

A superfície de dois corpos que se encontram em movimento relativo se denomina atrito. São comuns alguns tipos de atrito como o de deslizamento que é uma força que resiste ao movimento relativo entre dois corpos e suas superfícies se encontram limpas e secas, e o atrito de rolamentos resultante da força resistente aliada ao movimento de dois corpos sólidos quando um ou ambos rola sobre a superfície do outro (HUTCHINGS, 1992 apud MEGDA, 2018).

Os modos de desgaste podem ocorrer através de diversos mecanismos. Os mecanismos de desgaste são descritos pelas considerações de mudanças complexas na superfície durante o movimento (RADI *et al.*, 2007).

2.3 Monitoramento da Condição dos Rolamentos

A vibração é um dos principais sintomas de defeitos em máquinas rotativas causada por desgaste, má utilização e lubrificação inadequada, e a manutenção é uma forte aliada no controle e monitoramento da evolução das falhas, determinando o momento mais adequado para intervenção (AROEIRA CARLOS, 2019).

As vibrações são fenômenos que ocorrem a todo o tempo no universo, desde os grandes fenômenos naturais, como tremores de terra, até os menores detalhes do cotidiano, como a utilização de aparelhos domésticos, a utilização de transportes percorrendo vias irregulares que provocam sensações desagradáveis aos usuários, os equipamentos industriais que induzem movimentos vibratórios aos operadores e a outros equipamentos vizinhos (HOLANDA, 2016 p.19).

A utilização das análises vibracionais é um método utilizado para o monitoramento da condição dos rolamentos, pois conseguem detectar sinais prematuros de falhas nos componentes. Algumas informações apresentadas pelas análises podem ser usadas para identificação de uma possível falha de lubrificação, como o desbalanceamento, desalinhamento ou componentes ruins. Os métodos mais comuns de se obter e exibir a informação é em amplitude e frequência, já que a frequência revela a fonte vibracional ou tipo de falha e a amplitude revela a severidade da falha (ABECOM, 2021).

As análises em rolamentos detectam frequências características, as amplitudes e a distribuição dos harmônicos, que a passagem das esferas ou rolos produzem em pistas com furos e rachaduras. Como resultado, ela permite determinar com relativa precisão e segurança o grau da deterioração do rolamento (ABECOM, 2022).

2.4 Consequências das Vibrações em Rolamentos

A vibração de componentes mecânicos como um rolamento, gera consequências graves para a operação do equipamento, entre elas os riscos de acidentes na operação da máquina, o desgaste prematuro dos rolamentos precisando realizar intervenções de manutenção de formas corretivas com o risco de quebras inesperadas que podem acontecer no momento de operação da máquina, assim impactando diretamente na produção, aumento dos custos de manutenção com possíveis quebras eventuais e fadigas estruturais que vão afetar todo o equipamento permitindo deterioração das partes do equipamento que não se relacionam com os rolamentos (HOLANDA, 2016).

Segundo Holanda (2016), antes de ocorrer a quebra do equipamento, ou a falha total do sistema, é possível identificar os primeiros indícios de uma possível falha mais grave.

2.4.1 Estágio 1 – Início dos Primeiros Furos ou Rachaduras

No primeiro estágio onde é apresentado o início dos primeiros furos ou rachaduras, os indicadores de vibração não apresentam muitas alterações, como em seu espectro de vibração. Porém, já ocorrem inícios de aparecimento de falhas visíveis. Esse pode ser o início da deterioração do rolamento e pistas (ABECOM, 2022).

2.4.2 Estágio 2 – Aumento da Quantidade de Defeitos

Os defeitos se apresentam no corpo do rolamento e nas pistas com maior visibilidade,

à medida que a sua quantidade aumenta. O espectro de velocidade (ou aceleração) começa a aparecer com mais frequência e mostrando os picos claramente. Esses picos tendem a crescer em amplitude com o aumento da rotação, mas não mudam de posição com a variação da rotação (ABECOM, 2021).

Segundo Abecom (2021), a partir desse ponto o rolamento só tende a aumentar a sua deterioração e dessa forma, visando uma melhor condição de uso do mesmo rolamento, as lubrificações deverão ser realizadas com mais frequência.

2.4.3 Estágio 3 – Rolamento Ruim

No terceiro estágio é onde o rolamento se encontra em condições piores e é possível perceber alterações no ruído devido às suas condições. A temperatura também é outro fator apresentado no terceiro estágio, onde ela apresenta algumas variações (ABECOM, 2021).

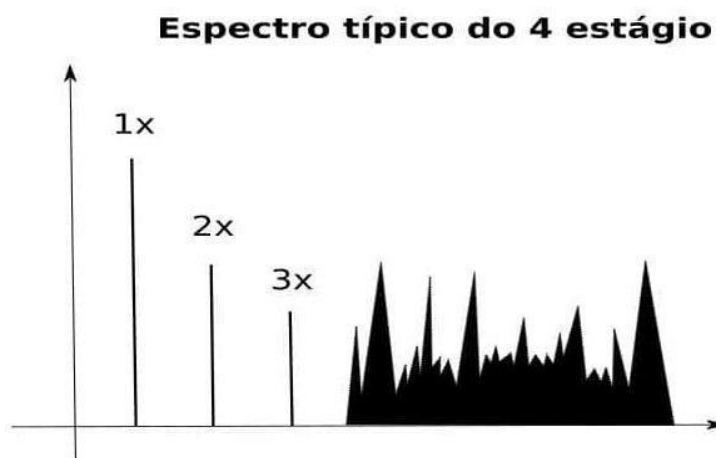
Segundo Abecom (2021), para identificar as frequências de defeito mais comum neste estágio, a análise de vibração será realizada nos rolamentos, e apresentará as mesmas:

- Passagem das esferas ou rolos na pista externa;
- Passagem das esferas ou rolos na pista interna;
- Giro das esferas ou rolos;
- Rotação da gaiola ou trem de retenção.

2.4.4 Estágio 4 – Quebra do Rolamento

Segundo Abecom (2022), no quarto estágio o rolamento não tem mais condições de uso e já está totalmente danificado. Ao ponto que os defeitos avançam, os picos se apresentam e harmônicos começam a saturar o espectro de velocidade até formar uma região de uma massa de picos de amplitude quase igual, como podemos analisar na figura 3.

Operar o equipamento nesse estágio pode trazer riscos de segurança pessoal e para o equipamento por se tratar de um equipamento sem condições de uso, que pode permitir consequências mais graves, como quebras de outros componentes das máquinas em função de sua operação em condições inadequadas (ABECOM, 2022).

Figura 03: Espectro típico do estágio 4

Fonte: Abecom Rolamentos e Produtor de borracha (2022).

2.5 Excesso de Graxa Nos Rolamentos

Lubrificar um rolamento de motor elétrico exige cuidados especiais, principalmente quando se trata de excesso de graxa. Esse fator pode levar a lubrificação ineficiente, devido uma das principais falhas que são o atrito e o superaquecimento, gerando aumento no consumo de energia, sobrecarga no motor e o desgaste prematuro dos componentes (INDUSTRIAL INOVAÇÃO, 2020).

Segundo Weidlich (2009), um motor elétrico possui a bobina localizada no interior da sua carcaça e entre os rolamentos que se encontram nas duas extremidades do motor. Graxa em excesso pode provocar vazamentos e penetrar no interior do motor, sendo depositada sobre a bobina que pode causar a queima do motor.

2.5.1 Cuidados com a Lubrificação em Excesso

A graxa, uma vez aplicada, geralmente não requer lubrificação por um longo período de tempo, mas dependendo das condições de operação, há casos em que se faz necessário relubrificar frequentemente ou substituir a graxa (WEIDLICH, 2009, p.82).

Segundo Industrial (2020), quando identificado e detectado o excesso de graxa nos rolamentos, deve-se agir para a correção desse problema o quanto antes, assim evitando alguma deterioração ou degradação do próprio rolamento ou da pista. Excesso de graxa não é um problema difícil de ser resolvido, portanto deve ser corrigido da melhor forma

possível e uma possível correção do sistema de lubrificação em excesso é a limpeza de toda a graxa do rolamento, porém necessita da intervenção realizando a parada da máquina para realizar o procedimento com totais condições de segurança.

Segundo Industrial (2020), para evitar o excesso de graxa pode ser utilizado o sistema de dreno quando encontrado em alguns motores, que tem a função de drenar a graxa que está no rolamento a algum tempo sem condições de uso e dessa forma liberando os espaços necessários para ser depositada o lubrificante novo em ótimas condições de uso. O dreno se localiza na parte inferior do mancal do rolamento, como na figura 4 ao inverso da aplicação que se encontra na parte superior, como podemos ver na figura 5.

Figura 04 – Dreno de lubrificação do motor elétrico



Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 05 – Local de aplicação da graxa no motor elétrico



Fonte: Próprio autor (2022).

Ao realizar o procedimento de lubrificação, com a pressão gerada na aplicação do lubrificante, a graxa velha é expulsa para fora do mancal a partir do ponto de dreno evitando qualquer chance de vazamento de graxa para o interior do motor elétrico impedindo que ocorra a deposição sobre a bobina, eliminando qualquer risco de queima do motor elétrico por essa causa (INDUSTRIAL INOVAÇÃO, 2020).

2.6 Volume e Periodicidade da lubrificação

A lubrificação de rolamentos em motores elétricos deve ser realizada na periodicidade ideal e no volume ideal diante da sua aplicação, sendo assim, calculado de acordo com as dimensões do rolamento, quantidades de horas de trabalho, velocidade e outros fatores que são influenciados (SVENSKA KULLAGER FABRIKEN, 2022).

A definição do volume de graxa aplicado na relubrificação é um fator de extrema importância, devido às falhas que podem ocorrer nos rolamentos. Escassez de graxa nos rolamentos gera falhas por falta de lubrificação, onde ocorre o contato metal com metal e a partir disso começam aparecer as deteriorações. O excesso de graxa é outro responsável pelas falhas prematuras em rolamentos, pois apresentam cargas elevadas, temperaturas elevadas a ponto de denegrir o corpo dos rolamentos ou das pistas causando oxidação (INDUSTRIAL INOVAÇÃO, 2020).

Em caso de trabalho do rolamento em baixas velocidades é aconselhável o preenchimento total de graxa na caixa, isso criará uma proteção contra a corrosão e agentes

externos como: água e poeira (FERNANDES, 2014 p. 28).

Segundo Industrial (2020), a definição do tempo correto de relubrificação está diretamente ligada ao processo, sabendo que grandes frequências de relubrificação podem ocasionar problemas como: excesso de lubrificação, se não calculada e definida corretamente.

2.6.1 Definição do Volume

A quantidade de graxa na lubrificação e relubrificação é calculada para a máxima eficiência do processo, impedindo a escassez de graxa no rolamento, mas também o excesso de graxa. O cálculo para a quantidade de graxa aplicada pode ser indicado pela fórmula seguinte (SVENSKA KULLAGER FABRIKEN, 2012).

$$G = 0,005 \times D \times B:$$

- G = quantidade de graxa, em gramas;
- D = diâmetro externo do rolamento, em mm;
- B = largura do rolamento, em mm;
- H = para rolamentos axiais.

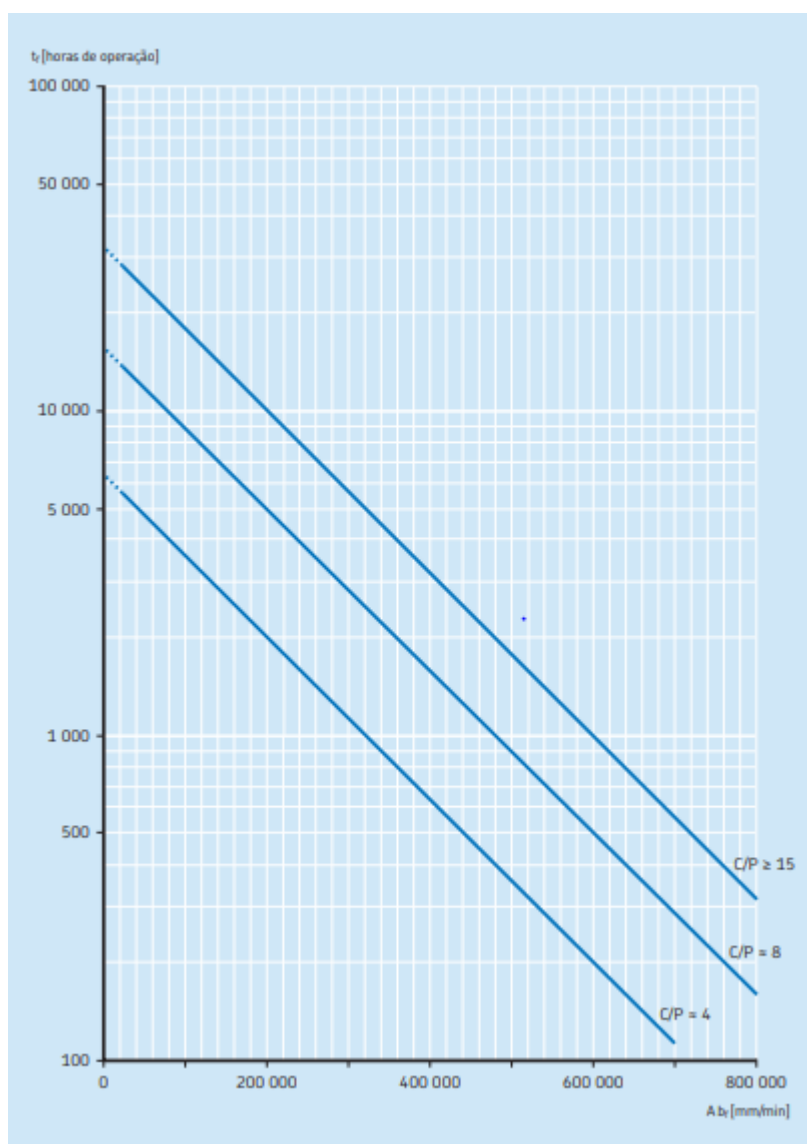
2.6.2 Definição Da Periodicidade

Segundo Svenska Kullager Fabriken (2012), os principais fatores considerados para definição da frequência de lubrificação são a velocidade de operação, temperatura, contaminação, umidade, vibração, posição de montagem e tipo do rolamento. O intervalo de relubrificação é dado por “tf - horas de operação” e pode ser obtido do diagrama da figura 6, sendo:

- Do fator de velocidade A;
- Do fator de suporte de carga bf;
- Da razão da carga C/P.

Onde temos:

- $A = n \cdot d_m$ [mm/min];
- N = velocidade de rotação [r/min];
- $D_m = \text{diâmetro médio do rolamento} = 0,5 (d + D)$ [mm];
- Bf = fator de suporte de carga, dependendo do tipo de rolamento e condições de carga.

Figura 06 – Diagrama de intervalos de lubrificação

Fonte: Svenska Kullager Fabriken (2012).

Como podemos ver na figura 7 e figura 8, o fator de velocidade “A” depende de alguns fatores do rolamento e limites recomendados que devem ser adequados com alguns ajustes de intervalos de relubrificação (SVENSKA KULLAGER FABRIKEN, 2012).

Figura 07 – Fatores de rolamentos

Fatores de rolamento e limites recomendados para o fator de velocidade A				
Tipo de rolamento ²¹	Fator de suporte de carga b_1	Limites recomendados para o fator de velocidade A, para razão de carga		
		C/P ≥ 15	C/P = 8	C/P = 4
		mm/min		
Rolamentos rígidos de esferas	1	500 000	400 000	300 000
Rolamentos de esferas de contato angular	1	500 000	400 000	300 000
Rolamentos autocompensadores de esferas	1	500 000	400 000	300 000
Rolamentos de rolos cilíndricos				
• rolamento livre	1,5	450 000	300 000	150 000
• rolamento fixo, sem cargas axiais externas ou com cargas axiais leves, mas alternantes	2	300 000	200 000	100 000
• rolamento fixo, com carga axial leve agindo constantemente	4	200 000	120 000	60 000
• sem uma gaiola, conjunto completo ²¹	4	NA ²¹	NA ²¹	20 000
Rolamentos de rolos cônicos	2	350 000	300 000	200 000
Rolamentos autocompensadores de rolos				
• quando $F_r/F_e \leq e$ e $d_m \leq 800$ mm				
– séries 213, 222, 238, 239	2	350 000	200 000	100 000
– séries 223, 230, 231, 232, 240, 248, 249	2	250 000	150 000	80 000
– série 241	2	150 000	80 000 ⁴¹	50 000 ⁴¹
• quando $F_r/F_e \leq e$ e $d_m > 800$ mm				
– séries 238, 239	2	230 000	130 000	65 000
– séries 230, 231, 240, 248, 249	2	170 000	100 000	50 000
– série 241	2	100 000	50 000 ⁴¹	30 000 ⁴¹
• quando $F_r/F_e > e$				
– todas as séries	6	150 000	50 000 ⁴¹	30 000 ⁴¹
Rolamentos de rolos toroidais CARB				
• com gaiola	2	350 000	200 000	100 000
• sem uma gaiola, conjunto completo ²¹	4	NA ²¹	NA ²¹	20 000
Rolamentos axiais de esferas	2	200 000	150 000	100 000
Rolamentos axiais de rolos cilíndricos	10	100 000	60 000	30 000
Rolamentos axiais autocompensadores de rolos				
• arruela de eixo giratório	4	200 000	120 000	60 000

Fonte: Svenska Kullager Fabriken (2012).

Figura 08 – Ajustes de intervalos de lubrificação

Ajustes de intervalos de relubrificação			
Condição operacional/ tipo de rolamento	Descrição	Recomendado ajuste de t_l	Razão para ajuste
Temperatura de operação	Para cada 15 °C (27 °F) acima de 70 °C (160 °F), até o limite de temperatura alta (HTL)	Divida o intervalo por dois	Para levar em conta o envelhecimento acelerado da graxa em temperaturas mais altas
	Para cada 15 °C (27 °F) abaixo de 70 °C (160 °F)	Dobre o intervalo (máximo duas vezes) ²¹	Para levar em conta o risco reduzido de envelhecimento da graxa em temperaturas mais baixas
Orientação do eixo	Rolamentos montados em um eixo vertical	Divida o intervalo por dois	A graxa tende a vaziar para fora devido à gravidade
Vibração	Altos níveis de vibração e cargas de choque	Reduza o intervalo ²¹	A graxa tende a "afundar" em aplicações vibratórias, resultando em agitação
Rotação do anel externo	Rotação do anel externo ou peso excêntrico do eixo	Calcule o fator de velocidade A usando D, não d_m	A graxa tem uma vida útil de graxa mais curta nessas condições
Contaminação	Contaminação pesada ou presença de contaminantes fluidos	Reduza o intervalo ^{21,31}	Para reduzir os efeitos danosos causados pelos contaminantes
Carga	Cargas muito pesadas ou seja, $P > 0,15 C$	Reduza o intervalo ²¹	A graxa tem uma vida útil de graxa mais curta nessas condições
Tamanho do rolamento	Rolamentos com um diâmetro de furo $d > 300$ mm	Reduza o intervalo ²¹	Esses normalmente são arranjos críticos, que necessitam de programas de relubrificação rígidos e frequentes
Rolamentos de rolos cilíndricos	Rolamentos equipados com gaiolas J, JA, JB, MA, MB, ML, MP e PHA ⁴¹	Divida o intervalo por dois	A eliminação (sangramento) de óleo com esses projetos de gaiola é limitada

Fonte: Svenska Kullager Fabriken (2012).

3 METODOLOGIA

O trabalho foi realizado através de uma pesquisa bibliográfica, também seguida de um estudo de caso, onde foi definido o processo de lubrificação mais eficiente e através de cálculos para definição de volume e periodicidade da lubrificação para os rolamentos dos motores elétricos.

Diante dos cuidados necessários em com uma lubrificação automática, foram utilizados os procedimentos ideais para obter a máxima eficiência na operação de um lubrificador automático.

Após as análises realizadas, foi definido o lubrificador automático ideal para a aplicação, instalado visando todo o procedimento de melhoria na produção, manutenção e segurança com a automatização do processo de lubrificação.

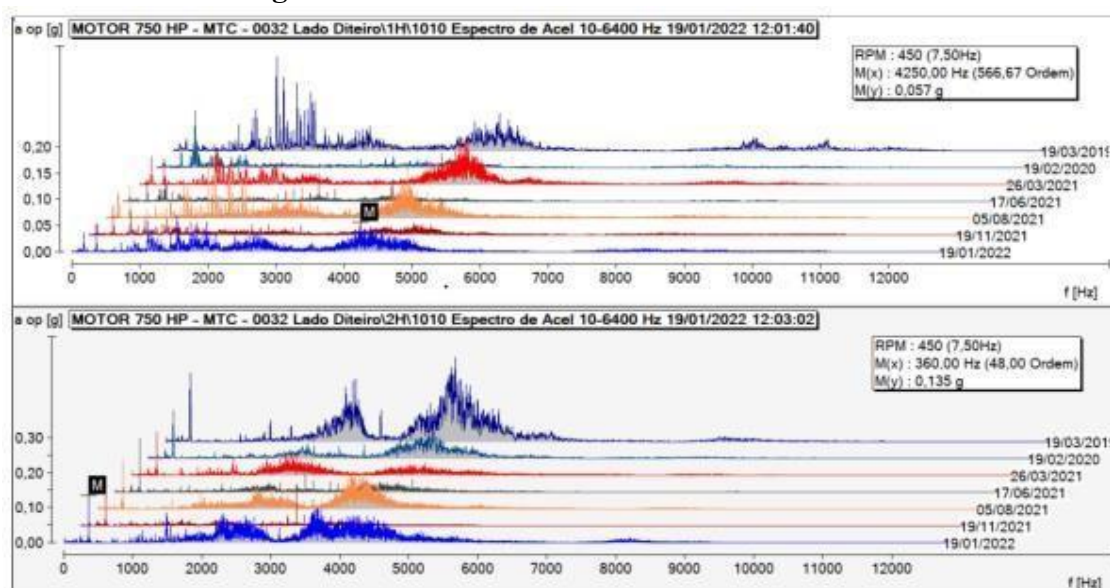
Com a instalação do lubrificador automático, a quantidade de graxa passou a ser aplicada em função do tempo de forma contínua.

O monitoramento da condição dos rolamentos foi realizado através de análises de vibrações mecânicas, realizadas para acompanhamento e análise dos resultados obtidos no processo de lubrificação.

3.1 Primeiras análises vibracionais do motor elétrico

A primeira coleta vibracional do motor elétrico foi realizada e constatada a necessidade de checagem da condição da lubrificação dos rolamentos aconteceu no dia 19 de Janeiro de 2022, pois foram apresentadas ganhos de amplitudes nos espectros de aceleração e envelope no rolamento do lado direito, mas também elevação do carpete de vibração no rolamento do lado esquerdo do motor elétrico, como podemos analisar nos gráficos da figura 9 e da figura 10, respectivamente.

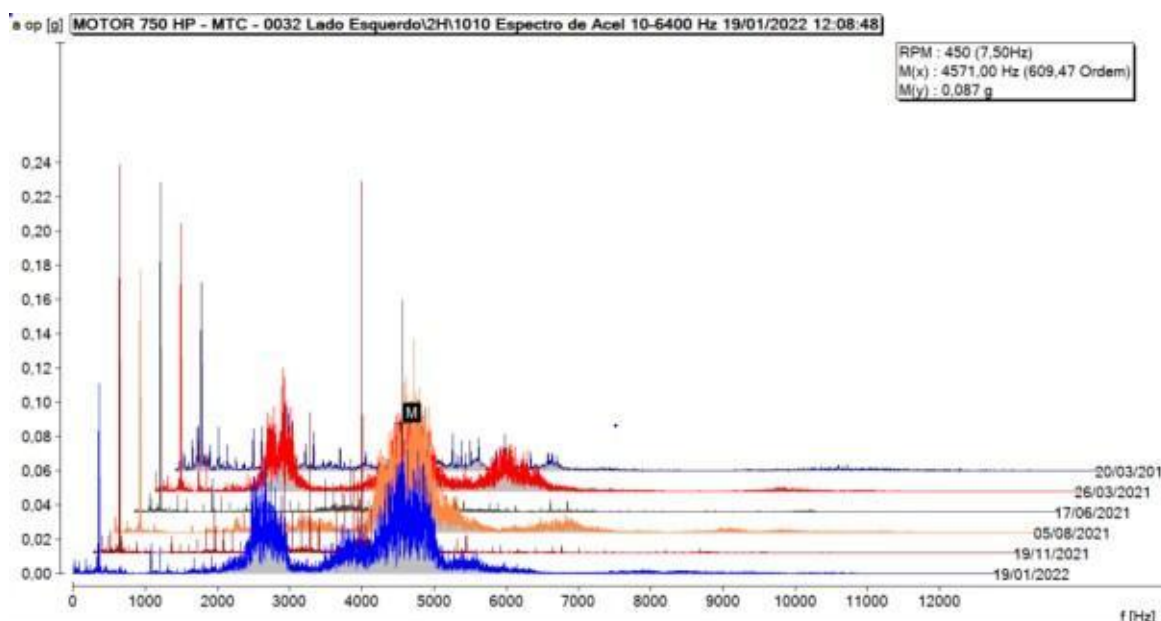
Figura 09: Motor lado direito - Primeiras análises



Fonte: Empresa de manutenção preditiva (2022).

Diante do diagnóstico das análises vibracionais realizadas nesse rolamento foi verificado o carpete de vibração apresentando ganho de amplitude em aceleração e em envelope, sendo recomendado avaliar o plano de lubrificação, checar a última lubrificação e realizar o monitoramento com mais frequência.

Figura 10 – Motor lado Esquerdo: Primeiras análises



Fonte: Empresa de manutenção preditiva (2022).

No rolamento lado esquerdo também foi realizado o diagnóstico apresentando falhas, como a elevação do carpete de vibração, sendo recomendado avaliação do plano de

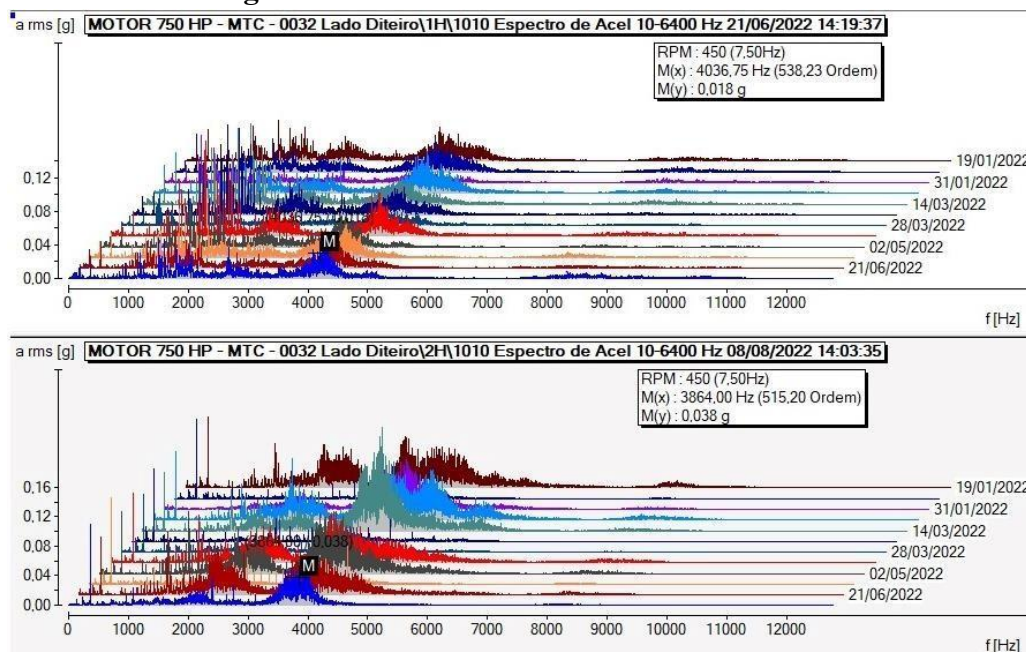
lubrificação, checagem da última lubrificação realizada no mesmo e monitorar com mais frequência.

Em seguida, após obter esses dados, foi realizada a relubrificação dos rolamentos do motor de forma manual e realizada a coleta vibracional novamente 1 hora depois de realizada a lubrificação para as análises comparativas com os novos dados capturados, onde os dados foram satisfatórios e apresentaram melhora nos espectros de aceleração e envelope.

Diante disso, análises de vibração mecânica passaram a ser realizadas frequentemente para monitoramento das condições do rolamento, mas foram apresentados alguns picos de amplitude devido a lubrificação manual, que ao ser realizada fornece uma quantidade de graxa maior no início após ser executada, e ao final do período, próximo ao dia de relubrificação, apresenta uma quantidade de graxa menor.

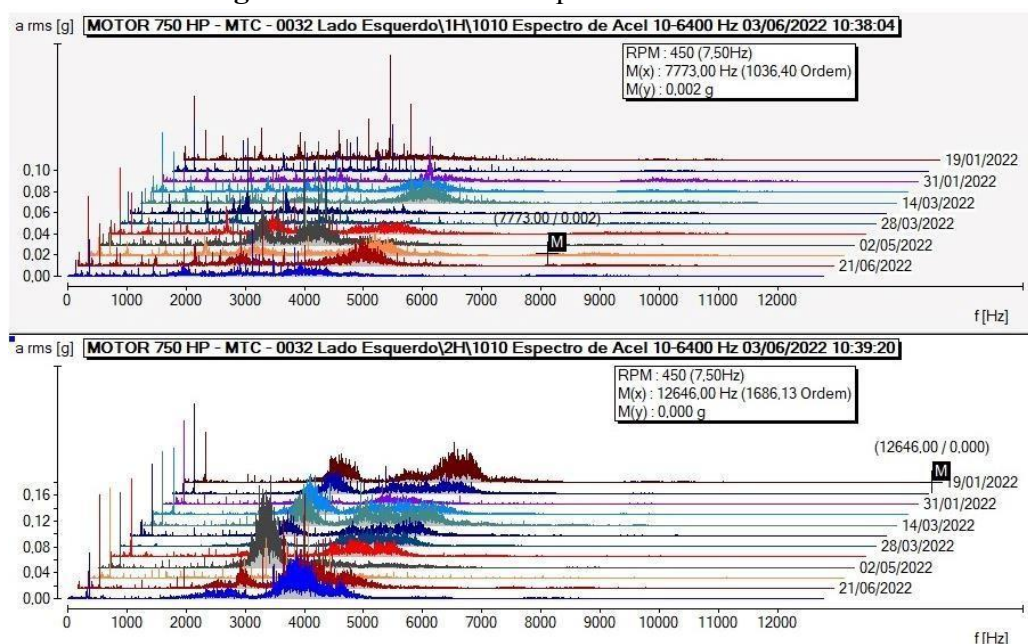
Na figura 11 e na figura 12, podemos analisar as novas coletas vibracionais com o aparelho “Vibexpert II, da Pruftechnik”, onde vemos o momento antes de ser realizada a lubrificação e logo após ser realizada, apresentando nitidamente melhoras nos picos de elevação.

Figura 11 – Motor Lado direito: Análises novas



Fonte: Empresa de manutenção preditiva (2022).

Figura 12 – Motor lado esquerdo: Análises novas



Fonte: Empresa de manutenção preditiva (2022).

As coletas vibracionais foram realizadas e os relatórios de análises elaborados por empresas profissionais especializadas em vibrações mecânicas.

3.2 Dimensões dos rolamentos

O motor elétrico possui dois rolamentos, sendo um em cada lado do motor. O rolamento 6232 localizado no lado direito possui as seguintes características:

- B= Largura do rolamento (mm): 48;
- D= Diâmetro externo (mm): 290;
- d= Diâmetro interno (mm): 160;
- G= Massa (kg): 14,5;
- Dm= Diâmetro médio (mm): 225.

O rolamento 6228 localizado no lado esquerdo do motor possui as seguintes características:

- B = Largura do rolamento (mm): 42;
- D = Diâmetro externo (mm): 250;
- d = Diâmetro interno (mm): 140;
- G = Massa (kg): 7,45;

- D_m = Diâmetro médio (mm): 195.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O volume de graxa na relubrificação dos rolamentos foi calculado da seguinte forma para os rolamentos 6232 e 6228, respectivamente:

- Rolamento 6232: $G = 0,005 \times 290 \times 48$: 69,6 gramas;
- Rolamento 6228: $G = 0,005 \times 250 \times 42$: 52,5 gramas;

A periodicidade de relubrificação foi avaliada de acordo com as tabelas de fatores de correção dos rolamentos e ajuste de intervalos e da figura 06 e figura 07, concluindo que os mesmos devem ser relubrificadas na quantidade de graxa calculada de forma mensal.

O lubrificador automático possui 250 gramas de graxa no seu reservatório e realiza a aplicação da graxa uma vez ao dia, onde é ajustado os meses que serão necessários para esvaziá-lo. Portanto será completamente aplicado ao longo de três meses e quinze dias no rolamento 6232, onde acontecerá uma aplicação diária do lubrificante de aproximadamente 2,0 gramas a cada quatro meses e quinze dias no rolamento 6228, que fará a aplicação de 1,6 gramas diariamente.

O lubrificador foi instalado no rolamento do motor com uma mangueira transparente para facilitar a visualização e inspeção, como podemos ver na figura 13 e da mesma forma nos outros rolamentos dos dois motores elétricos.

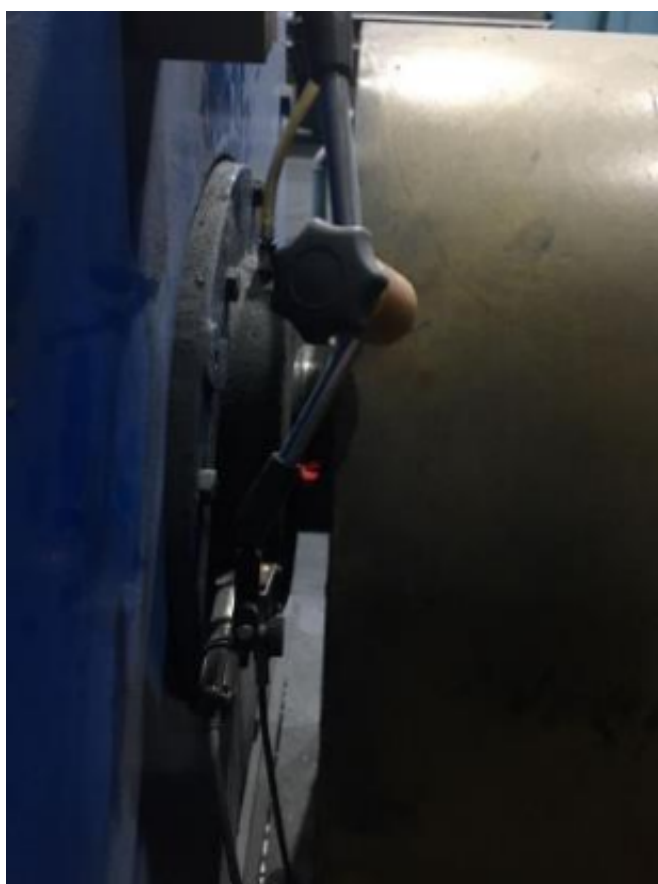
Figura 13 – Lubrificador automático instalado



O acompanhamento para monitoramento das condições dos rolamentos após instalados os lubrificadores, foram realizados com as análises de vibrações mecânicas que apresentaram os gráficos de espectro e aceleração com os dados e foram analisados para conclusão de que a lubrificação automática é eficiente nos rolamentos do motor.

As coletas de vibrações mecânicas foram realizadas de forma contínua com o analisador de vibrações “NK820, da Teknikao” como podemos ver na figura 14, composto também por acelerômetros que são fixados no motor elétrico que transmite os dados para o coletor de vibrações, onde são amplificados e filtrados os sinais, onde foi possível capturar informações suficientes para diagnosticar falhas ou não no processo de lubrificação dos rolamentos.

Figura 14: Acelerômetros no motor elétrico



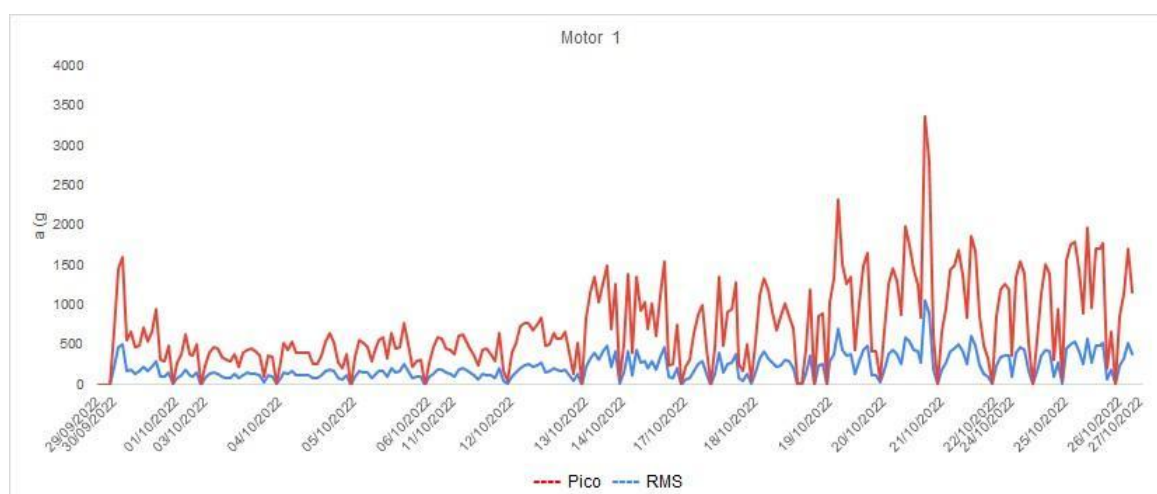
Fonte: Próprio autor (2022).

Para um monitoramento mais eficiente nas semanas que antecederam a instalação e após instalados os lubrificadores, foram coletados os dados de forma contínua do dia 30 de Setembro até 13 de Outubro sem o lubrificador automático e do dia 13 de Outubro até 29 de Outubro com o lubrificador automático instalado e operando em ótimas condições.

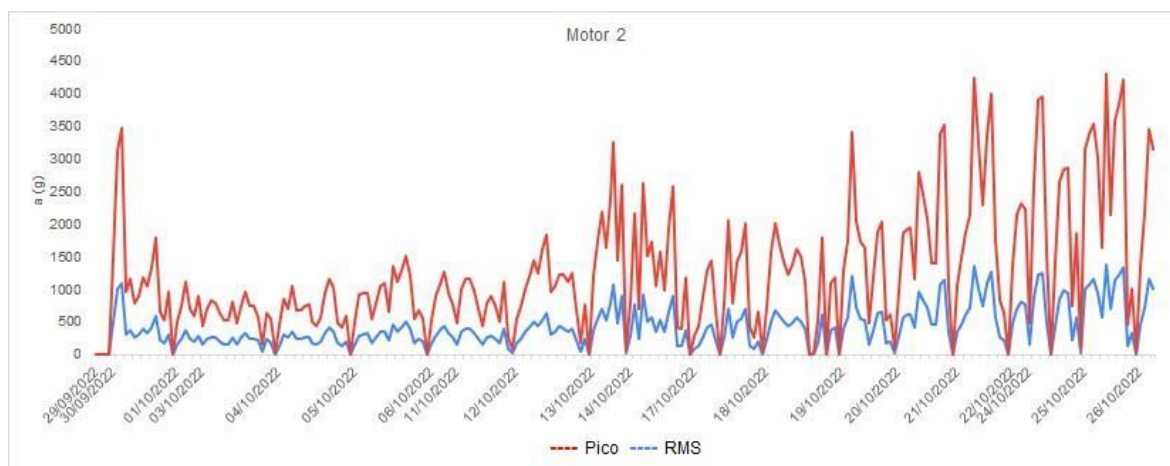
Na figura 15 e figura 16, podemos analisar os gráficos das análises vibracionais

contínua que apresentam dados de níveis globais em uma determinada faixa de frequência de aceleração de 1 KHz até 10 KHz, onde é possível apresentar o melhor controle do monitoramento da lubrificação relacionado ao período que foi realizado, visando todo o cuidado e avaliação necessária com os dados coletados durante o processo, pois a faixa de vibração até 1 KHz será em decorrência da operação do equipamento e na faixa de vibração de 1 KHz até 10 KHz está diretamente relacionada às condições dos rolamentos e da lubrificação, onde um carpete de vibração se apresenta como uma falha de lubrificação.

Figura 15 – Gráfico do motor 1



Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 16 – Gráfico do motor 2

Fonte: Próprio autor (2022).

A vibração em pico indica as alterações da condição operacional do motor elétrico e a vibração em RMS está diretamente relacionada ao carpete de aceleração, que está relacionado com a lubrificação dos rolamentos.

Nos gráficos da figura 15 e e figura 16 conseguimos observar que as amplitudes em RMS tiveram pouca variação no momento em que os picos tiveram grande variação em função da condição operacional desse equipamento. Portanto mesmo que em função do aumento das amplitudes dos picos que pode ter sido elevados devidos cargas maiores no motor, aumento de potência, os valores de RMS conseguiram se manter em boas condições apresentando boas condições da lubrificação dos rolamentos.

As coletas de dados para análises vibracionais serão realizadas frequentemente, para que assim continue sempre o monitoramento afirmando a eficiência da lubrificação automática em rolamentos de motores elétricos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através desse trabalho, apresentamos a melhoria no processo de lubrificação com a lubrificação automática que é uma inovação na indústria 4.0 resultando nos melhores benefícios possíveis para um equipamento e empresa, principalmente por se tratar de confiabilidade do equipamento, segurança, automatização e maximização da produção e melhora do processo de lubrificação.

Com a lubrificação manual foram identificados algumas falhas no equipamento, onde foi diagnosticado por espectros de aceleração nas análises vibracionais possíveis causas relacionadas a lubrificação dos rolamentos dos motores elétricos nas primeiras análises realizadas.

Após estudos realizados visando a melhoria do processo e do equipamento, foi concluído que a melhor forma para resolver o problema em questão seria a lubrificação de modo automatizado, onde foi implementado, avaliado e frequentemente sendo monitorado com coletas de dados de vibrações mecânicas de forma contínua durante o período de 31 dias, sendo 15 dias anteriores à instalação do lubrificador e 15 dias após instalados.

Foi possível perceber de acordo com os gráficos a melhora no equipamento em relação ao processo de lubrificação que é fundamental e essencial para evitar falhas e diminuir vibrações mecânicas que são altamente prejudiciais ao rendimento e segurança do equipamento.

Esse trabalho realizado foi extremamente importante para os processos da empresa, pois foi possível implementar uma nova tecnologia e processo de lubrificação de uma indústria em inovação.

Foi avaliado o aumento de produção com a diminuição da parada do equipamento para intervenção, aumentando a confiabilidade e rendimento do mesmo com o intuito de evitar possíveis quebras ou intervenções no equipamento.

Uma parada inesperada do equipamento poderia ser altamente prejudicial para a empresa em todos os setores, por se tratar exatamente de um equipamento crítico localizado no início do processo, que se por ventura necessita de uma manutenção corretiva sem realizar a programação, afeta todo o processo seguinte de forma direta.

REFERÊNCIAS

Análise de vibração em rolamentos industriais: 4 estágios até a falha total, **ABECOM**, 2021. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/analise-de-vibracao-em-rolamentos-industriais/?gclid=Cj0KCQjw4PKTBhD8ARIsAHChzRIYPgEWqkxoR6a6brw55cA3b2bF7uHLsLEqNHF_A32zTyZmTf9W0aAoVLEALw_wcB>. Acesso em: 17 de Maio 2022.

AROEIRA, Carlos. Análise de vibrações e envelope. **DMC Engenharia e sistemas ibéricos LTDA, 2019**. Disponível em: <<https://www.dmc.pt/analise-de-vibracoes-e-envelope/>>. Acesso Em: 12 de Maio de 2022.

BELINELLI, Marjorie Maria. **Desenvolvimento de método para seleção de política de lubrificação de máquinas centrada em confiabilidade: aplicação na indústria alimentícia. Tese de Doutorado, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015.**

DUARTE JUNIOR, Durval. **Tribologia, lubrificação e mancais de deslizamento**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2005. 239p.

ELLWANGER, Diego. **Análise de desempenho tribológico de lubrificantes automotivos em ensaio de escorregamento metal-metal**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

Excesso de graxa em rolamentos: quais problemas podem surgir? Inovação Industrial, 2020. Disponível em: <<https://inovacaoindustrial.com.br/excesso-de-graxa/>>. Acesso em: 20 de Maio de 2022.

FERNANDES, Paulo. **Técnicas de lubrificação em rolamentos por meio de graxa e óleo**. Rio Verde, Goiás: Uni RV, 2014.

HOLANDA, Sandra. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, 2016.

JUNIOR, Joe Luiz. **Análise de vibração em rolamentos industriais**. Lages: Centro Universitário UNIFA C VEST, 2018.

Manual de manutenção de rolamentos SKF, SKF, 2012. Disponível em: <https://www.skf.com/binaries/pub45/Images/0901d1968083afa2-SKF-Bearing-maintenance-handbook---10001_1-PT-BR_tcm_45-463040.pdf>. Acesso em: 10 de Maio de 2022.

MEGDA, Rafael Giansi. **INDÚSTRIA 4.0: aplicação dos conceitos para identificar falhas de lubrificação**. Varginha: Centro Universitário Do Sul de Minas, 2018.

MERCURI, José; MARTINS, Otávio; TRAUTMANN, Paulo. **Desenvolvimento de um sistema supervisor para análise de motores elétricos através da vibração mecânica**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

O poder da lubrificação, SKF, 2012. Disponível em: <https://www.skf.com/binaries/pub45/Images/0901d1968037f0c8-15117PT_tcm_45-167158.pdf>. Acesso em: 15 de Maio de 2022.

RADI, Polyana Alves et al. **Tribologia, conceitos e aplicações**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007.

SINATORA, Amilton. **Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte 2005**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

Sistemas de Lubrificação automática, SKF, 2012. Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/lubrication-management/automatic-lubrication-system>> Acesso em: 10 de Maio de 2022.

SKF Automatic lubricators, SKF, 2012. Disponível em: <https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968019d1ed-17099EN_SKF_Automatic_Lubricators_tcm_12-66465.pdf>. Acesso em: 15 de Maio de 2022.

TELES, Jhonata. **Como elaborar planos de lubrificação**, Engeteles, 2016. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/plano-de-lubrificacao/>>. Acesso em: 18 de Maio de 2022.

WEIDLICH, Felipe. **Avaliação da lubrificação de rolamentos de motores elétricos por ultrassom**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009