

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
CARLOS ROBERTO DE ALMEIDA JUNIOR
GUSTAVO RODRIGUES BRAGA

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO
PREDITIVA NAS INSPEÇÕES DE ROTINA DE UMA
MONTADORA AUTOMOBILÍSTICA**

Taubaté - SP

2021

CARLOS ROBERTO DE ALMEIDA JUNIOR

GUSTAVO RODRIGUES BRAGA

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO
PREDITIVA NAS INSPEÇÕES DE ROTINA DE UMA
MONTADORA AUTOMOBILÍSTICA**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador(a): Prof Ivair Alves dos Santos

**Taubaté – SP
2021**

**Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi
Universidade de Taubaté - Unitau**

A447a Almeida Junior, Carlos Roberto de
Aplicação de técnicas de manutenção preditiva nas inspeções de rotina de uma montadora automobilística / Carlos Roberto de Almeida Junior, Gustavo Rodrigues Braga. -- 2021.
42 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharias, 2021.
Orientação: Prof. Me. Ivair Alves dos Santos, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Manutenção preventiva. 2. Termografia. 3. Ultrassom. 4. Vibração. I. Braga, Gustavo Rodrigues. II. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD – 620.0046

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

**CARLOS ROBERTO DE ALMEIDA JUNIOR
GUSTAVO RODRIGUES BRAGA**

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA NAS
INSPEÇÕES DE ROTINA DE UMA MONTADORA AUTOMOBILÍSTICA**

Trabalho de Graduação apresentado
para obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica do Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade de
Taubaté.


DATA: 19/11/2021

RESULTADO: Aprovado

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Me. Ivair Alves dos Santos

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

Prof. Me. Leandro Maia Nogueira

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

Dedicamos esta monografia aos professores do Campus Juta da Universidade de Taubaté, ao nosso querido Orientador Professor Ivair Santos Alves, aos nossos familiares, amigos e que participaram e contribuíram com a nossa jornada até a conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus em primeiro lugar, por nos dar a força e abençoar nossa jornada durante todo o curso, principalmente nos momentos de angústia, ansiedade e pressão.

Aos nossos pais, Patrícia Vaz Busnelli, Ruben Antonio Busnelli Carrera, Nair Rodrigues Braga e Clodoaldo Pinto Braga, pelo apoio e amor incondicional que nos deram desde sempre. A estes seremos eternamente gratos, esperamos um dia poder retribuir ao menos uma fração de tudo que fizeram por nós.

Ao nosso orientador, Prof. (Dr. Msc) Ivair Alves dos Santos, por todo o conhecimento passado ao longo dos anos, em especial nas aulas ministradas sobre Manutenção Industrial, que nos inspirou a estudar e nos aprofundar no assunto, culminando hoje no nosso Trabalho de Graduação.

À Universidade de Taubaté – UNITAU, pelo zelo à integridade acadêmica nos cursos oferecidos, em especial as Engenharias.

Por fim, agradecemos a todos que de alguma forma nos deram força e nos apoiaram durante nossos anos de graduação. Faremos bom uso da sabedoria que nos foi dada durante estes anos de estudo, e esperamos devolver à sociedade bons frutos do nosso aprendizado.

RESUMO

No cenário da indústria global, a competitividade promove uma constante busca por melhores resultados, sendo assim, empresas que possuem uma melhor gestão de manutenção focada em otimizar a operação da planta industrial, reduzem seus custos e promovem maior confiabilidade e segurança no seu processo. Portanto, é essencial que se monitore a condição operacional das máquinas, possibilitando a programação de intervenções e reduzindo paradas inesperadas. O presente trabalho tem como proposta o desenvolvimento e aplicação de um plano de manutenção preditiva, com a utilização de técnicas como análise de vibração, ultrassom e termografia nas máquinas produtivas de uma empresa automobilística, bem como seus benefícios e resultados. Os equipamentos monitorados foram exaustores, bombas centrífugas, compressores, motores elétricos, linhas de distribuição de eletricidade e ar comprimido. Esta atividade foi dividida seguinte processos: mapeamento dos equipamentos, enquadramento nas categorias de normas, definição dos parâmetros e pontos críticos de medição, coleta de dados, análise em softwares e emissão de laudos. A execução dos planos de manutenção preditiva visa uma melhoria na programação das manutenções preventivas e corretivas, de forma a atuar antecipadamente em falhas encontradas pelas análises. O formato de trabalho promove também maior contato dos manutencistas da empresa com a manutenção preditiva, aumentando a precisão dos diagnósticos de falhas e propagando conhecimento sobre defeitos até então desconhecidos.

Palavras-chave: Manutenção, Preditiva, Termografia, Ultrassom, Vibração.

ABSTRACT

In the global industry scenario, competition promotes a constant search for better results, therefore, companies that have a better maintenance management focused on optimizing the operation of the industrial plant, reduce their costs and promote a larger reliability and security in their process. Therefore, it is essential to monitor the condition of the machines, enabling the planning of interventions and reducing unexpected stops. The present work proposes the development and application of predictive maintenance plan, using techniques such as vibration analysis, ultrasound and thermography on production machines of an automobile company, as well as its benefits and results. The monitored equipment were exhaust fans, centrifugal pumps, compressors, electric motors, electricity and compressed air distribution lines. This activity was divided into the following processes: mapping equipment, framing into standard categories, defining parameters and critical measurement points, collecting data, software analysis and issuing reports. The execution of the predictive maintenance plans aims to improve the scheduling of preventive and corrective maintenance, in order to act in advance on failures found by the analyzes. The work format also promotes greater contact between the company's maintenance staff and predictive maintenance, increasing the accuracy of fault diagnoses and spreading knowledge about previously unknown defects.

Keyword: Maintenance, Predictive, Thermography, Ultrasound, Vibration.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das máquinas. Fonte: ISO 10816-1(1995).....	11
Tabela 2 - Limites de velocidade de acordo com a classe da máquina.....	12
Tabela 3 - Vazamento x perda de potência.	15
Tabela 4 - Guess-timator UE Systems.....	30
Tabela 5 - Comparação de dados com tabela Technical Associates of Charlotte (1997).....	32
Tabela 6 - Vazão aproximada de fuga de ar (m ³ /min).	35
Tabela 7 - Demonstração de custo anual estimado do vazamento.	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Medição em mancais.....	9
Figura 2 - Medição em rolamentos.	9
Figura 3 - Medição em equipamento elétrico.....	10
Figura 4 - Medição em motores.	10
Figura 5 - Kit do Detector Ultrassônico JORC.	16
Figura 6 - Eixo Gleason 0660000429.	19
Figura 7 - Disjuntor 02Q03.....	20
Figura 8 - PFAUTER 716210.....	20
Figura 9 - SKF Microlog CMXA 75.....	21
Figura 10 - Câmera Termográfica FLIR T400.....	22
Figura 11 - UE SYSTEMS - ULTRAPROBE P15000.....	23
Figura 12 - Coleta de dados em rolamentos.....	25
Figura 13 - Posições de medição (Eixo Gleason).....	25
Figura 14 - Coleta de dados ultrassônicos.....	26
Figura 15 - Inspeção termográfica Disjuntor 02Q03.	27
Figura 16 - Espectro de Envelope em 1H.....	31
Figura 17 - Termografia Rolamentos eixo Gleason 0660000429.	33
Figura 18 - Ponto de fuga de ar Pfauter 716210.....	34
Figura 19 - Termografia disjuntor 02Q03.....	36
Figura 20 - Espectro de Envelope em 1H.....	38
Figura 21 - Tendência de envelope em 1H.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RPM – Rotações por minuto

Hz – Hertz

kHz – Quilo Hertz

MTBF - Mean time between failures

SKF - Svenska KullagerFabriken

ISO - International Organization for Standardization

W - Watt

kW – Quilo watt

kWh – Quilo watt hora

US DOE - United State Department of Energy

pmc – Pés Cúbicos por minuto

HP – Horse Power

CAG – Central de água gelada

FLIR – Foward-looking infrared

MDA – Manual data automatic

dB - Decibéis

CMF - Cubic feet per minute

PSIG - Pounds per square inch

gE – Parâmetro de envelope

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO	2
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	2
1.3 RELEVÂNCIA DO ESTUDO	2
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 VANTAGENS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	5
2.2 CONCEITOS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	6
2.2.1 PARÂMETROS DE VIBRAÇÃO	6
2.2.2 SENSORES DE VIBRAÇÃO	6
2.2.3 INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÃO, ANÁLISE E REGISTRO DE VIBRAÇÃO.....	6
2.2.4 MEDIÇÃO DA VIBRAÇÃO	7
2.2.5 FALHAS COMUNS DETECTÁVEIS PELA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	7
2.2.6 ISO 10816-1 E 10816-3.....	8
2.3 CONCEITOS DA TERMOGRAFIA.....	12
2.3.1 PARÂMETROS DE MEDIÇÃO DA TERMOGRAFIA.....	12
2.3.2 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	13
2.3.3 COMO REALIZAR UMA ANÁLISE TERMOGRÁFICA	13
2.3.4 TIPOS DE DEFEITOS IDENTIFICADOS PELA TERMOGRAFIA ..	14
2.4 CONCEITOS DE ULTRASSOM.....	14
2.4.1 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE ULTRASSOM	15
2.4.2 PARÂMETROS DE MEDIÇÃO DE ULTRASSOM.....	16
2.4.3 ESTIMATIVA DE CUSTO DOS VAZAMENTOS.....	17

3 METODOLOGIA.....	18
3.1 DEFINIÇÃO DO LOCAL E MATERIAL DE ESTUDO.....	18
3.1.1 APRESENTAÇÃO DOS OBJETOS DE ESTUDO.....	18
3.2 EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS PARA COLETA E ANÁLISE DOS DADOS.....	21
3.2.1 SKF MICROLOG CMXA 75 E 70.....	21
3.2.2 CÂMERA TERMOGRÁFICA FLIR - MODELO T400.....	22
3.2.3 INSTRUMENTO ULTRASSÔNICO UE SYSTEMS - ULTRAPROBE P15000.....	22
3.2.4 SOFTWARE UE SYSTEM – SPECTRALYZER.....	23
3.2.5 SOFTWARE @PTITUDE ANALYST – SKF.....	23
3.2.6. SOFTWARE FLIR THERMACAM QUICKREPORT.....	24
3.3 METODOLOGIA DE MEDIÇÕES E COLETA DE DADOS.....	24
3.3.1 METODOLOGIA DE COLETA DE DADOS VIBRACIONAIS.....	24
3.3.2 METODOLOGIA DE COLETA DE DADOS ULTRASSÔNICOS.....	26
3.3.3 METODOLOGIA DE COLETA DE IMAGENS TERMOGRÁFICAS.....	27
3.4 METODOLOGIA DE ANÁLISE VIBRACIONAL.....	28
3.4.1 ANÁLISE VIBRACIONAL DE ENVELOPE.....	28
3.5 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE ULTRASSOM.....	29
4 ANÁLISES E DESENVOLVIMENTO DE PLANO DE MANUTENÇÃO.....	31
4.1 EIXO GLEASON 0660000429 - ANÁLISE VIBRACIONAL E TERMOGRÁFICA.....	31
4.2 VAZAMENTO PFAUTER 716210.....	34
4.3 SUPERAQUECIMENTO DO DISJUNTOR 02Q03.....	35
5 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	37
5.1 RESULTADOS EIXO GLEASON 0660000429.....	37
6 CONCLUSÕES.....	40
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	41

8 REFERÊNCIAS	42
---------------------	----

1 INTRODUÇÃO

A manutenção preditiva surgiu como uma evolução da manutenção preventiva sistemática, ou seja, ao invés de trocar componentes em intervalos de tempo definidos, passa-se a inspecionar e medir parâmetros dos equipamentos em intervalos de tempos definidos prevendo assim a sua vida útil. Alguns exemplos de manutenção preditiva são: análise de vibração, termografia, ultrassom nos quais abordaremos nesse trabalho.

As primeiras utilizações da análise de vibração como forma de monitoramento de uma máquina ocorreram nos anos 30, por meio do trabalho de TC. Rathbone, que avaliava equipamentos de 1(60 rpm) a 120 Hz (7200 rpm). No final dos anos 60, Don Bently e Don Wilhelm aplicaram o conceito de medição de deslocamento de eixos rotativos voltados para a manutenção preditiva. Após uma série de evoluções, a análise de vibração se inseriu na era digital, utilizando computadores e softwares com armazenamento de dados e proporcionando análises mais precisas, para a identificação prematura de falhas.

A medida de temperatura à distância, ou seja, o início da termografia como conhecemos hoje, ocorreu em 1878, com a criação do bolômetro pelo astrônomo Samuel Pierpont Langley. Esse equipamento foi utilizado para a medir a temperatura corporal na época. Em 1928, com o aperfeiçoamento dessa tecnologia, foi possível identificar movimentos de tropas e navios durante a noite na Segunda Guerra Mundial. A partir dos anos 80 com a utilização de computadores e softwares com imagens em tempo real, a termografia foi utilizada para diagnosticar doenças e mudou o conceito do procedimento na medicina. Na indústria moderna a termografia é utilizada para identificar irregularidades em subestações, painéis elétricos, componentes mecânicos danificados e até mesmo infiltrações na construção civil.

Assim como na termografia o ultrassom inicialmente era utilizado na medicina para detecção de tumores no século XX. Com sua evolução ao longo dos anos surgiram diversos equipamentos que utilizam o ultrassom, como por exemplo sensores ultrassônicos amplamente utilizados na indústria. Na manutenção preditiva o ultrassom vem se destacando na identificação de vazamentos de ar comprimido e outros gases, inspeção de rolamentos e redutores, inspeções elétricas e outras aplicações.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral desenvolver um estudo sobre a manutenção preditiva, aplicando as técnicas de análise de vibração, termografia e ultrassom em máquinas produtivas, aumentando a disponibilidade da máquina, e dessa forma minimizando paradas inesperadas de manutenção, além de reduzir os custos, promover a eficiência energética e um ambiente de trabalho mais seguro.

1.1.2 Objetivos Específicos

O objetivo específico deste trabalho, consiste em analisar periodicamente o funcionamento das máquinas, identificar possíveis falhas e verificar os resultados obtidos da aplicação da manutenção preditiva na fábrica.

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Este estudo de caso foi desenvolvido em uma empresa que atua no ramo de manutenção e reparação de máquinas e equipamentos para uso geral localizada no Vale do Paraíba. A empresa presta serviços de manutenção preditiva, preventiva e corretiva: mecânica, elétrica, eletrônica, instrumentação, serralheria, caldeiraria e soldagem.

O local de prestação de serviços é uma empresa do ramo automobilístico, com uma divisão interna de 4 setores principais, sendo eles: fábrica de motores, fábrica de fundição, fábrica de transmissões e casa de força/utilidades, sendo de responsabilidade da Leadec Servicos a manutenção de equipamentos como exaustores, torres de resfriamento, chillers, ventiladores centrifugos, circuitos de alimentação/iluminação e tanques de combustível.

1.3 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

O campo de estudo deste trabalho concentra-se na aplicação e observação de resultados da manutenção preditiva na indústria, visando uma prolongação da vida útil das máquinas fabris, além da redução de gastos com outros tipos de manutenção.

A metodologia utilizada durante o estudo faz parte de um conjunto de técnicas de preditiva, criadas para atender uma necessidade industrial de diminuir principalmente custos com manutenção corretiva.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O estudo está dividido em capítulos e subcapítulos. No capítulo 1, são apresentadas as justificativas do trabalho, seus objetivos e delimitação do estudo.

No capítulo 2, é apresentada uma breve revisão da literatura sobre o assunto, demonstrando os principais tópicos de embasamento da equipe a respeito do trabalho.

No capítulo 3, é apresentada a metodologia do trabalho, os objetos de estudo e os instrumentos de medição. Também são demonstradas técnicas utilizadas na medição e as teorias por trás das estimativas abordadas no capítulo 4.

O capítulo 4 mostra a análise das medições e dados coletados, e discorre sobre os problemas e suas principais prováveis causas.

No capítulo 5 são analisados os resultados das implementações de técnicas preditivas nos setores propostos.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e considerações finais.

Por fim, nos capítulos 7 e 8 estão as sugestões para trabalhos futuros e referências bibliográficas, respectivamente.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A necessidade de manter o maquinário industrial em boas condições de uso e prolongar a vida útil é um conceito relativamente moderno na história da indústria. No período anterior a Segunda Guerra Mundial, o conceito de manutenção resumia-se a serviços de limpeza, troca de óleo e substituição parcial ou total do equipamento, sendo o último praticado na sua maioria das vezes sem um planejamento prévio. Esse conceito de utilização do maquinário até a sua quebra fazia sentido dentro do cenário econômico e industrial da época, pois a falta de competitividade permitia que fábricas com baixa produtividade sobrevivessem no mercado. De acordo com Kardec e Nascif (2009), tais práticas constituíam uma manutenção 'fundamentalmente corretiva não planejada', pois não havia justamente uma programação que previsse tais paradas por falha.

Após o fim da Segunda Guerra, cresce a demanda por produtos industrializados e conseqüentemente a competitividade no setor industrial. Na busca por linhas de produção mais eficientes e preços cada vez menores, concluiu-se que apesar de necessária, a manutenção corretiva não planejada era demasiadamente custosa, e uma solução mais barata seria prever a vida útil e antecipar a quebra do equipamento (Kardec e Nascif, 2009). Por fim, com a necessidade de diminuir as paradas inesperadas decorridas de desgaste e falha de equipamentos, criou-se um planejamento de intervenções nas máquinas, de acordo com intervalos de tempo pré-determinados. Essa prática passou a ser chamada de manutenção preventiva, que se disseminou rapidamente pela sua eficiência em prevenir paradas não programadas e assim manter a produção contínua.

Porém, 'a manutenção sempre foi tolerada somente como um mal necessário' (Nepomuceno, 1989), e a busca pela diminuição dos custos da manutenção corretiva não programada só cresceu, assim como os gastos de uma linha de produção parada por uma falha inesperada. A manutenção preventiva passa então a se mostrar estagnada em uma situação em que somente prevenir problemas genéricos, de acordo com os estudos do próprio fabricante do equipamento, não era mais suficiente para se manter competitivo no mercado.

A partir deste ponto, novas técnicas de manutenção passam a ser adotadas, com o intuito de individualizar cada máquina, estudar seus próprios problemas e manter um acompanhamento contínuo delas. Dessa maneira a manutenção só

precisaria ser acionada quando o equipamento demonstrasse a tendência a falha (Nascif, 2009).

Como consequência direta da adoção da chamada Manutenção Preditiva, o custo com os demais tipos de manutenção passou a diminuir consideravelmente, e diversos estudos foram conduzidos para aprimorar e diversificar essa área da manutenção, como análise de vibrações, termografia, ultrassom, entre outros (Nascif, 2009).

2.1 VANTAGENS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA

De acordo com Júlio Nascif (2009), a manutenção preditiva tem como objetivo geral justamente prever o momento de falha do equipamento, porém com um grande diferencial, que é a medição e análise do comportamento da máquina. Desse modo, têm-se uma vantagem sobre a manutenção preventiva, que pressupõe uma retirada pelo tempo de operação da máquina, mesmo quando não se observa tendência a falha.

Ainda de acordo com Nascif (2009), os benefícios da manutenção preditiva se estendem para outros setores de manutenção e produção. O diagnóstico de uma análise preditiva provê à equipe de manutenção informações úteis na hora de se preparar para o serviço a ser feito na máquina, o que pode diminuir o tempo de reparo e qualidade do trabalho. Além disso, a produção pode se preparar à retirada do equipamento com antecedência, minimizando assim a perda de produtividade na falta do equipamento.

Quando feitas de maneira correta, as análises de preditiva podem diminuir significativamente o risco de falhas severas que levam à uma substituição precoce de maquinário. Porém, quando o diagnóstico do equipamento demonstra uma quebra iminente, os relatórios de preditiva na máquina podem auxiliar na decisão de substituição. Utilizando o histórico de preditiva num equipamento, pode-se estimar o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF), e utilizar essas informações para determinar quando o custo de manutenção e operação da máquina já ultrapassou o seu custo de substituição (Collacott, 1999).

2.2 CONCEITOS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Segundo Kardec e Nascif (2009) a análise de vibração pode ser considerada um dos métodos preditivos mais importante na indústria atual, com sua maior aplicação em equipamentos rotativos como motores, bombas, compressores, ventiladores, turbinas etc. Os avanços no desenvolvimento de analisadores, sensores e softwares, em conjunto com outras variáveis que são medidas simultaneamente, vêm permitindo análises e resultados cada vez mais satisfatórios.

2.2.1 Parâmetros De Vibração

Os parâmetros de vibração indicam a intensidade da vibração no equipamento, e são medidos em uma função de deslocamento pelo tempo. Após registrados os valores, as grandezas são derivadas para deslocamento, velocidade e aceleração. De acordo com a SKF (2016), no software *@ptitude Analyst SKF* esses termos são apresentados nas unidades de mm (deslocamento), mm/s (velocidade) e g (aceleração).

2.2.2 Sensores De Vibração

Os sensores mais comumente utilizados para medição de vibração são eletromagnéticos capacitivos, eletrodinâmicos de velocidade e os acelerômetros (sensor no qual foi foram feitas as medições citadas neste trabalho). Os sensores convertem a vibração mecânica em sinais elétricos de modo que possibilite a análise através de valores e gráficos (SKF, 2016).

2.2.3 Instrumentos Para Medição, Análise E Registro De Vibração

Existem diversos tipos de analisadores de vibração, como a caneta de medição de vibração (Vibration Pen), vibrômetro, analisadores de vibração e sistemas de monitoramento. A caneta de medição de vibração pode ser utilizada para uma primeira avaliação da máquina, já que ela é portátil e de fácil operação, porém com recursos limitados de análise. Assim como a caneta, o vibrômetro também possui uma boa portabilidade e uma interface simplificada, fornecendo níveis globais nos parâmetros de velocidade e aceleração. Já os analisadores possuem softwares que mostram em

tempo real os níveis globais e espectros com as assinaturas de vibração (equipamento utilizado para realizar as medições apresentadas nesse trabalho). Nos sistemas de monitoramento os sensores geralmente são fixos na máquina, e os dados acompanhados remotamente, amplamente utilizados em locais de difícil acesso, como por exemplo usinas hidroelétricas (SKF, 2016).

2.2.4 Medição Da Vibração

Antes de se medir uma vibração, é necessário observar as particularidades de cada equipamento, de modo que as mesmas devem ser levadas em consideração para se obter resultados confiáveis. Segundo Nascif (2009), três aspectos devem ser analisados, sendo eles: O tipo de máquina e sua construção, qual o propósito da medição e qual faixa de frequência será analisada.

Pelo tipo de máquina e sua construção podemos definir, por exemplo, qual sensor utilizar para fazer a medição, uma vez que equipamentos e máquinas vibram em frequências distintas. Tubulações e estruturas geralmente vibram em baixa frequência, fator que inutilizaria um sensor de velocidade ou aceleração, já que esses são para alta frequência. Porém, para motores e bombas, estes sensores seriam os mais indicados. Poderíamos definir também o melhor ponto de tomada de medição, pois máquinas com conjunto rotativo leve vibram de maneira diferente de máquinas de conjunto pesado, assim como o tipo de fixação influencia nesse processo. A faixa de frequência é a responsável por definir o espectro de vibrações, dados que possibilitam a análise e identificação de falhas (SKF, 2016).

2.2.5 Falhas Comuns Detectáveis Pela Análise De Vibração

Em *Introduction to Machine Vibration* (2008), Glenn D White cita falhas detectáveis pela análise de vibração e suas respectivas características.

- Desbalanceamento:

As principais causas do desbalanceamento são: desgaste ou danos no rotor, desbalanceamento de massas, acúmulo de material estranho nas pás e empenamento e eixo excêntrico. O desbalanceamento possui geralmente uma frequência de excitação de vibração que se equivale ao RPM máquina no plano radial.

- Desalinhamento:

Os tipos de desalinhamento são:

- Desalinhamento angular com frequência de excitação em 1x e 2x a RPM da máquina no plano axial;
- Desalinhamento paralelo com frequência de excitação em 1x e 2x a RPM da máquina no plano radial;
- Desalinhamento misto com frequência de excitação em 1x e 2x a RPM da máquina no plano radial e axial. Essa falha ocorre pelo desalinhamento de eixos entre a máquina movida e máquina motora, falha nos acoplamentos e engrenagens.

- Componentes Frouxos:

É a vibração gerada pela folga em componentes que deveriam estar fixos, podendo ser uma folga nos mancais, ou até mesmo na base de fixação da máquina. As folgas geralmente apresentam harmônicas da frequência natural (frequência de RPM da máquina).

Existem outras diversas falhas detectáveis pela análise de vibração. Segundo James E. Berry em Technical Associates of Charlotte (1993), podemos citar:

Eixo arqueado, rolamento enjambrado no eixo, ressonância, ronçamento do rotor, instabilidade no filme do óleo, falhas em rolamentos (pista interna, pista externa, gaiola e elementos rolantes), cavitação, falhas em engrenagens, correias frouxas e desalinhadas e problemas elétricos. Todos os defeitos citados possuem um espectro característico de vibração que auxilia o técnico no momento da análise.

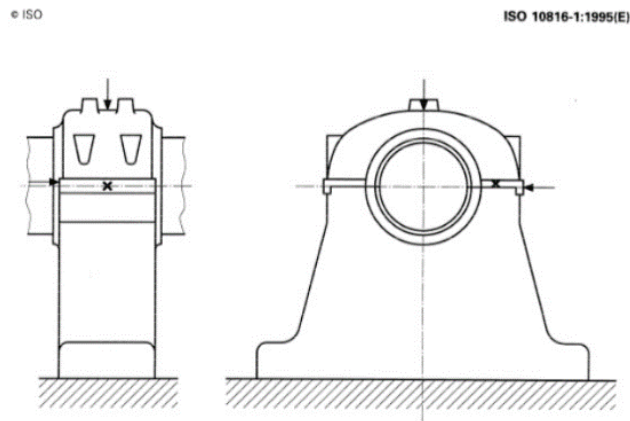
2.2.6 ISO 10816-1 E 10816-3

Existem normas internacionalmente padronizadas para avaliação da severidade de vibrações em diversos tipos de maquinário. Dentro do leque de ferramentas disponíveis para o analista de vibração quanto à análise de vibração global da máquina, uma das mais utilizadas está descrita na ISO 10816-1(1995). Esta norma define valores precisos de níveis aceitáveis de vibração, apresentando tabelas de classificação para cada tipo de maquinário, de acordo com sua potência nominal,

velocidade de rotação durante o trabalho, e outras especificações sobre sua fundação e utilização.

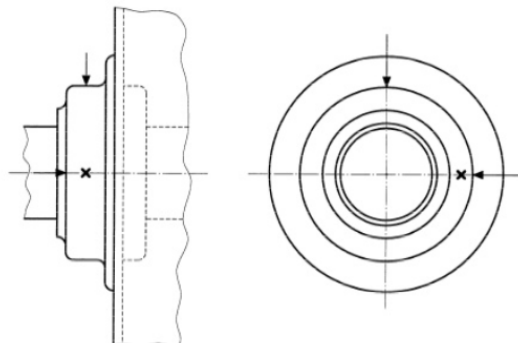
Sobre as medições em máquinas, a norma descreve ISO 10816-1(1995) quais as melhores posições para que os valores obtidos sejam precisos o suficiente para a análise posterior. Nesta seção existem demonstrações para medições em diversos equipamentos, como mancais na Figura 1, rolamentos na Figura 2, equipamentos elétricos na Figura 3 e motores na Figura 4.

Figura 1 - Medição em mancais.



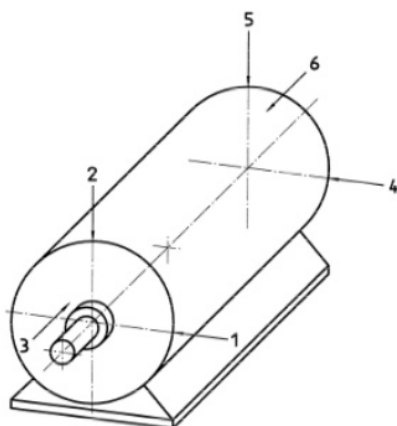
Fonte: ISO 10816-1(1995)

Figura 2 - Medição em rolamentos.



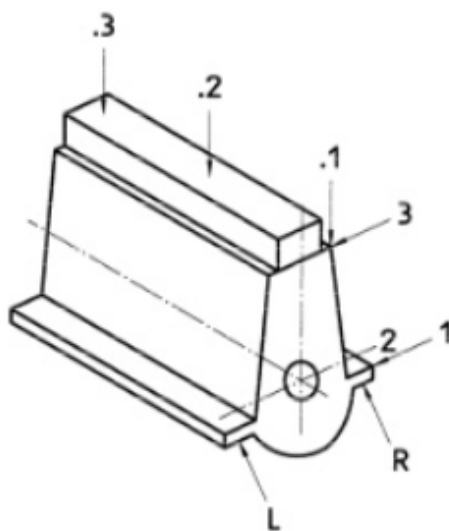
Fonte: ISO 10816-1(1995)

Figura 3 - Medição em equipamento elétrico.



Fonte: ISO 10816-1(1995)

Figura 4 - Medição em motores.



Fonte: ISO 10816-1(1995)

A medição deve ser feita em condições normais de operação do maquinário, ou na rotação máxima de operação em caso de máquinas que operam em velocidades variadas. Caso as medições apresentem valores inaceitáveis, porém as condições apontem que vibrações externas estejam interferindo na precisão dos valores obtidos, a máquina deve ser medida desligada para avaliação do grau de influência das vibrações externas (ISO 10816-1, 1995).

Caso as vibrações com a máquina parada sejam maiores que 25% dos valores obtidos durante as medições iniciais, medidas de correção devem ser tomadas para reduzir a vibração externa no equipamento (ISO 10816-1, 1995).

Nesta publicação, são apresentadas quatro classes de maquinário, e para cada categoria, valores diferentes para avaliação de vibração, como apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação das máquinas. Fonte: ISO 10816-1(1995).

ISO 10816-1	Vibrações mecânicas – Avaliação da vibração de máquinas através de monitoramento de partes não-rotativas
	<ul style="list-style-type: none"> • Classificação das máquinas: Classe I: partes individuais de motores e máquinas, integralmente conectadas à máquina completa em sua condição de operação normal (p. ex. motores elétricos de até 15 kW). Classe II: máquinas de tamanho médio sem fundação especial (motores elétricos de 15 kW a 75 kW), motores ou máquinas montados rigidamente sobre fundação especial (até 300 kW). Classe III: grandes turbinas ou motores grandes e outras máquinas grandes com massas rotativas montadas sobre fundação dura e pesada, e relativamente rígida. Classe IV: grandes turbinas ou motores grandes e outras máquinas grandes com massas rotativas montadas sobre fundações relativamente moles (p.ex. conjunto de turbogenerador e turbinas a gás com produção maior do que 10 MW).

Fonte: ISO 10816-1(1995)

Dentro das classes apresentadas, a norma também fornece níveis de vibração global aceitáveis, que devem ser utilizadas para avaliação da severidade da vibração, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de velocidade de acordo com a classe da máquina.

Velocity Severity		Velocity Range Limits and Machine Classes			
mm/s RMS	in/s Peak	Small Machines Class I	Medium Machines Class II	Large Machines	
				Rigid Supports Class III	Less Rigid Supports Class IV
0.28	0.02	Good	Good	Good	Good
0.45	0.03				
0.71	0.04				
1.12	0.06	Satisfactory	Satisfactory	Good	Good
1.80	0.10				
2.80	0.16	Unsatisfactory (alert)	Unsatisfactory (alert)	Satisfactory	Satisfactory
4.50	0.25				
7.10	0.40	Unacceptable (danger)	Unacceptable (danger)	Unsatisfactory (alert)	Unsatisfactory (alert)
11.20	0.62				
18.00	1.00				
28.00	1.56	Unacceptable (danger)	Unacceptable (danger)	Unacceptable (danger)	Unacceptable (danger)
45.00	2.51				

Fonte: 10816-3 (2009)

Para cada classe de equipamento e sua velocidade de operação, a norma ISO 10816-3(2005) apresenta níveis, desde “bom” até um nível inaceitável de vibração, que é um alerta para que o analista acione a manutenção para que ajustes sejam feitos na máquina.

2.3 CONCEITOS DA TERMOGRAFIA

Segundo Maldaque & Moore (2001), a termografia é uma técnica que detecta a radiação infravermelha que um objeto emite, que é invisível ao olho humano, transformando-a em imagens térmicas, e assim possibilitando convertê-las em leituras de temperatura. A termografia caracteriza-se por ser um modelo de inspeção sem contato e não invasiva, de rápida aplicação e utilizada em diversos setores na indústria, tais como: painéis elétricos, inspeções em subestações, acoplamentos, rolamentos, medição de níveis de tanques e aplicações prediais.

2.3.1 Parâmetros De Medição Da Termografia

Diversos parâmetros devem ser ajustados e considerados em uma inspeção termográfica, dentre eles podemos citar a emissividade, transmitância atmosférica,

corrente de carga, faixa de temperatura, entre outros a fim de precisar a leitura de temperatura de um corpo (FUPAI, 2005).

2.3.2 Instrumentos De Medição

O principal instrumento de uma inspeção termográfica é o termo visor, que converte a radiação infravermelha em imagens visíveis. Para a escolha de um termo visor é necessário avaliar aspectos como: faixa de temperatura a ser medida, distância e dimensão do objeto a ser inspecionado, temperatura ambiente e a tecnologia de detecção. Aliados a esses equipamentos, existem softwares que possibilitam otimizar a análise do técnico (FLIR Systems, 2016).

2.3.3 Como Realizar Uma Análise Termográfica

De acordo com a FUPAI (2005) em *Termografia Infravermelha*, o termo grafista deve fazer inicialmente a escolha do termo visor correto baseado no equipamento a ser inspecionado, ajustar os parâmetros para medição, se posicionar a frente do equipamento com distância e ângulo de medição adequado e, por fim registrar os dados em campo. Ao identificar anomalias, o técnico definirá o nível de criticidade baseado em normas internacionais, tais como:

NETA - NETA MTS-2001: Maintenance Testing Specification for Electric Power Distribution Systems

US NAVY - MIL STD-2194 (SH): Infrared Thermal Imaging Survey Procedure for Electrical Equipment.

NMAC: Nuclear Maintenance Applications Center - Infrared Thermography Guide (NP-6973).

Nuclear: Nuclear Industry Guidelines. IR-F/H/V-200, Rev 1.

CES Guidelines: Overhead Electrical Wiring.

Após analisados os níveis de criticidade, será emitido um relatório com as seguintes informações: condição climática, data e hora da inspeção, localização, equipamento, condição de carregamento, avaliações e sugestões (FUPAI, 2005).

2.3.4 Tipos De Defeitos Identificados Pela Termografia

A termografia permite a identificação de diversos tipos de defeito e desgastes, porém as análises mais comuns identificam problemas tais como: oxidação de componentes, mal contato em componentes elétricos, desgastes em componentes mecânicos, falha de lubrificação, infiltração predial, falhas em subestações, entre outros (FUPAI, 2005).

2.4 CONCEITOS DE ULTRASSOM

A técnica de ultrassom na área de manutenção preditiva é relativamente recente, pois percebe-se que artigos e pesquisa nesse contexto começaram a surgir com mais frequência nos últimos 15 anos. Porém, o princípio e a ideologia da manutenção preditiva são bem perceptíveis na utilização do ultrassom como método de detecção de vazamentos de ar comprimido em meios industriais (Ferreira, 2020).

O ponto central do uso de ultrassom num ambiente fabril é identificar e diminuir o volume de ar comprimido perdido por vazamentos nos equipamentos e nas linhas de distribuição, a fim de diminuir o gasto com a energia elétrica que foi utilizada para gerar e armazenar com qualidade esse ar comprimido. Desperdício que pode chegar em até 30% da energia utilizada pelo sistema de ar comprimido da fábrica (US DOE, 2016).

Utilizando a relação de energia elétrica utilizada para o acionamento do compressor, e o preço dessa energia em kWh da região, é possível estimar o custo da perda de ar comprimido para diâmetros diferentes de vazamento (Air Solutions, 2018). A Tabela 3 ilustra alguns valores aproximados de custo anual, de acordo com o diâmetro do furo do vazamento.

Tabela 3 - Vazamento x perda de potência.

VAZAMENTO X PERDA DE POTÊNCIA							
Ø do furo em mm	Área em mm ²	m ³ /min a 6 bar	pcm	HP	Kw	w	R\$ Custo Anual
1	0,7854	0,0630	2,224824	0,556206	0,414763	415	545,00
2	3,1416	0,2520	8,899297	2,224824	1,659051	1.659	2.180,00
3	7,0686	0,5670	20,02342	5,005854	3,732866	3.733	4.905,00
5	19,635	1,5750	55,62061	13,90515	10,36907	10.369	13.625,00
8	50,2656	4,0320	142,3887	35,59719	26,54482	26.545	34.880,00
9	63,6174	5,1030	180,2108	45,05269	33,59579	33.596	44.145,00
10	78,54	6,3000	222,4824	55,62061	41,47629	41.476	54.500,00
12	113,0976	9,0720	320,3747	80,09367	59,72585	59.726	78.480,00

Fonte:

https://asmtreinamentos.com.br/downloads/pneumatica/Ar_Comprimido_%20Vazamentos.pdf
(2018)

2.4.1 Instrumentos De Medição De Ultrassom

De maneira similar a análise de vibrações, os detectores ultrassônicos utilizam tradutores piezoelétricos para transformar as ondas mecânicas provocadas pelo som em pulsos elétricos que podem ser lidos por um programa, sendo que a diferença entre estes equipamentos está na faixa de frequência em que operam, já que o detector ultrassônico precisa identificar ondas de frequência muito mais altas (UE SYSTEMS).

Equipamentos modernos de ultrassom são capazes de identificar ondas na faixa de 20kHz a 100kHz (UE Systems), inaudíveis para o ser humano. Porém, um amplificador interno traduz o som recebido e o envia aos fones de ouvido do equipamento, esquema observável na Figura 5, afim dar ao técnico de manutenção um retorno audível das suas medições, facilitando assim a detecção de vazamentos.

Figura 5 - Kit do Detector Ultrassônico JORC.



Fonte: http://www.sgspartners.com.br/pdf/locator_pdf5.pdf

2.4.2 Parâmetros De Medição De Ultrassom

Utilizando de um equipamento ultrassônico, o técnico de manutenção tem ampla versatilidade para identificar os mais diversos tipos de vazamento, podendo quantificar a vazão do escape e até mesmo o custo por minuto dessa perda na linha de ar comprimido (Ferreira, 2020).

Um estudo da UE Systems listou os tipos de vazamentos mais custosos em um ambiente fabril:

- 1 – Vazamentos em conexões;
- 2 – Mau dimensionamento da pressurização nas linhas;
- 3 – Equipamentos com alimentação de ar maior do que a necessária;
- 4 – Conexões angulares;
- 5 – Linhas e encanamentos de má qualidade, desgastados ou mau dimensionados;

6 – Restrições antigas ou obsoletas, como filtros entupidos ou passagens para drenagem;

7 – Sistema de armazenamento de ar insuficiente;

8 – Uso inapropriado do ar comprimido;

9 – Vazamento em bombas;

A partir do conhecimento das principais causas de vazamentos, o técnico de manutenção responsável pelas análises de ultrassom pode criar uma rota de inspeção que contemple todo o sistema de ar comprimido da fábrica, evitando assim gastos desnecessários e melhorando a eficiência das máquinas que utilizam este recurso (Almeida, 2016).

2.4.3 Estimativa De Custo Dos Vazamentos

A estimativa dos gastos de um sistema de ar comprimido com as fugas e vazamentos pode ser feita utilizando uma correlação de diversos fatores. Primeiro, é necessário estimar a vazão da fuga a partir do nível das ondas ultrassônicas detectadas no equipamento. Alguns equipamentos do mercado vêm com tabelas e planilhas que auxiliam o técnico nesta tarefa (Ferreira, 2020).

A partir da estimativa da vazão, e tendo em mãos os dados técnicos de todo o sistema de geração e armazenagem (incluindo compressores, secadores, tanques etc.), é possível estimar a quantidade de energia elétrica gasta para compensar a perda de pressão do vazamento (Air Solutions, 2018).

Porém, de acordo com Almeida (2016), diversos fatores podem influenciar em uma estimativa imprecisa dessa vazão. Sons externos no ambiente, distância de medição e a própria geometria do furo de escape podem causar distorções que dificultam a precisão do processo.

Em casos em que é necessária uma maior precisão de estudo de custo dessa manutenção, uma auditoria energética pode ser implantada. Fazendo um levantamento da utilização de recursos energéticos da empresa, é possível analisar precisamente os custos de energia do sistema de ar comprimido, ao longo do curso de implementação da análise ultrassônica de vazamentos (Ferreira, 2020).

3 METODOLOGIA

O estudo de caso foi realizado a partir de atividades remuneradas na empresa Leadec Brasil, do Grupo Leadec, que fornece serviços técnicos de manutenção para a planta da montadora de automóveis da Ford, na cidade de Taubaté – SP. Os serviços oferecidos pela empresa são manutenção mecânica, elétrica, refrigeração, lubrificação, predial e serralheria.

3.1 DEFINIÇÃO DO LOCAL E MATERIAL DE ESTUDO

Os estudos foram conduzidos dentro da planta da empresa Ford Motor Company, localizada na cidade de Taubaté. A fábrica conta com uma divisão interna de 4 setores principais, sendo eles, fábrica de motores, fábrica da fundição, fábrica de transmissões e Casa de Força/Utilidades, sendo de responsabilidade da Leadec Serviços a manutenção de equipamentos como exaustores, torres de resfriamento, chillers, ventiladores centrifugos, circuitos de alimentação/iluminação, tanques de combustível etc.

Um estudo anterior foi conduzido com o objetivo de coletar informações com os gestores, para a identificação dos equipamentos da planta.

Em relação às análises vibracionais, além da identificação, o estudo inicial também visava enquadramento nos grupos de severidade e normas (ISO 10816-1 e 10816-3), classificar equipamentos quanto criticidade e definir frequências de medição, parametrizar pontos de medição nos softwares de monitoramento, e antecipar os planos e procedimentos de manutenção.

Os casos apresentados foram escolhidos por um parâmetro de criticidade, que avalia uma série de fatores, tais como:

- Risco de acidentes devido a mal funcionamento ou falha no equipamento;
- Custo da queda de produção em função da falha do equipamento;
- Custo e tempo da manutenção corretiva no equipamento;
- Avaliação do valor gasto no desperdício de recursos;

3.1.1 Apresentação Dos Objetos De Estudo

A partir dessa visão, concluiu-se que os objetos de estudo seriam divididos principalmente pela técnica de preditiva empregada. Além disso, no caso das análises

vibracionais, foram selecionados dois equipamentos, pois observou-se propostas e resultados distintos durante a condução do estudo.

3.1.1.2 Eixo Gleason 0660000429

O centro de usinagem GLEASON 0660000429, apresentado na Figura 6 é, responsável pela usinagem de eixos e engrenagens da transmissão automotiva, e está localizada na área de Transmissões da empresa. O eixo ferramenta dessa máquina tem como função acoplar a ferramenta e realizar o desbaste. Seu estudo foi conduzido no período janeiro a dezembro 2019.

Figura 6 - Eixo Gleason 0660000429.



Fonte: Próprio autor

3.1.1.3 Disjuntor 02Q03

O disjuntor 02Q03, mostrado na figura 7, localiza-se na central de água gelada (CAG) da fábrica, e é responsável pela proteção do circuito do motor ventilador de uma torre de resfriamento. A sua termografia foi conduzida como serviço de rotina e

os resultados foram encaminhados para a área de manutenção responsável no período de abril de 2019.

Figura 7 - Disjuntor 02Q03.



Fonte: Próprio autor

3.1.1.4. Pfauter 716210

O Pfauter 716210, como se observa na Figura 8, é uma cortadora de engrenagens, e localizada na área de Transmissões.

Figura 8 - PFAUTER 716210.



Fonte: Próprio autor

É responsável por uma das etapas no processo de fabricação do câmbio automotivo. A análise ultrassônica do equipamento foi realizada como inspeção de rotina, e os resultados foram encaminhados para a área de manutenção responsável no período de maio de 2018.

3.2 EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS PARA COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

Foram utilizados equipamentos específicos para a coleta e análise dos dados dos objetos de estudo. Os aparelhos foram escolhidos por serem voltados para a área de manutenção preditiva, tendo funções de criação de rotas e cadastramento de equipamentos que facilitam o trabalho do técnico quando este tipo de trabalho é conduzido ao longo de muitos meses.

3.2.1 Skf Microlog Cmx 75 E 70

Os vibrômetros da fabricante SKF, modelos Microlog CMXA 75 e 70 foram utilizados na criação das rotas e coletas de dados vibracionais do Eixo Gleason 0660000429. Ambos os vibrômetros contam com acelerômetros magnéticos, para evitar filtros nos sinais de medição, como pode ser observado no modelo 75 da Figura 9. O visor presente no equipamento permite que o técnico visualize as medições em tempo real, além de ter acesso às informações da máquina analisada e seu histórico, tudo no mesmo aparelho.

Figura 9 - SKF Microlog CMXA 75.



Fonte: Próprio autor

O equipamento é compatível com o Software @ptitude Analyst, fornecidos pela própria SKF, e permite ter informações carregadas e descarregadas direto do computador para o aparelho, incluindo rotas e rotinas de inspeção.

3.2.2 Câmera Termográfica Flir - Modelo T400

A câmera Termográfica FLIR T400 foi utilizada na identificação de superaquecimento nos objetos de estudo, apontando possíveis falhas de equipamentos e riscos de acidentes.

Como se observa na Figura 10, o visor na câmera dá resposta em tempo real da imagem termográfica, contendo as temperaturas dos corpos, o que aumenta muito a eficiência no trabalho do técnico em campo.

Figura 10 - Câmera Termográfica FLIR T400.



Fonte: User's manual FLIR T4xx series (2016)

3.2.3 Instrumento Ultrassônico Ue Systems - Ultraprobe P15000

O aparelho utilizado nas análises de ultrassom da equipe foi o ULTRAPROBE P15000, escolhido pela sua versatilidade na detecção de diversos tipos de ruído. O equipamento conta com diversos módulos para se adequar a qualquer tipo de ambiente, como se observa na Figura 11, e fones de ouvido que permitem ao técnico um retorno audível das ondas sonoras.

Figura 11 - UE SYSTEMS - ULTRAPROBE P15000.



Fonte: <https://www.maintworld.com/News/A-Powerful-Solution-for-Total-Plant-Inspections> (2016)

3.2.4 Software Ue System – Spectralyzer

O programa disponibilizado pela UE Systems, comercialmente chamado de Spectralyzer, foi utilizado para análise das gravações de ultrassom realizadas, a fim de classificar e quantificar os vazamentos encontrados. O Software conta com um sistema de plotagem de tendência a partir do histórico do local analisado.

Além disso, um recurso muito utilizado pela equipe foi o de comparação de sons, onde o software dispõe de uma biblioteca de sons de amostra para comparação do ruído gravado, facilitando assim a classificação da gravação.

3.2.5 Software @Ptitude Analyst – Skf

O software da SKF é utilizado para as análises dos dados coletados pelos vibrômetros da marca, sendo compatível com máquinas Windows 7 em diante.

O @ptitude Analyst possui recursos de plotagens de gráficos como: amplitude, tendência, espectro, cascata de espectro, entre outras plotagens. Estes recursos são essenciais para os diagnósticos preditivos.

Dentro do Software, o técnico tem acesso a um banco de dados de elementos de máquina, organizados por tipo, fabricante e modelo. Esse recurso é extremamente

útil para a análise de vibrações, já que os valores globais de vibração coletados podem ser diretamente comparados com os dados fornecidos pelas suas respectivas fabricantes. Além disso, é possível inserir novas informações no banco de dados, como o detalhamento de outras máquinas não listadas.

O software também conta com outros recursos importantes, como criação de modelos de relatórios técnicos, criação de rotas de inspeção e histórico das rotinas de coleta de dados

3.2.6. Software Flir Thermacam Quickreport

As imagens termográficas foram analisadas no Software fornecido pela FLIR. Nele, o técnico pode mover um cursor para verificar a temperatura de toda a imagem captada, alterar as paletas de cor, e adicionar informações sobre as condições de umidade do ar e temperatura ambiente no dia de registro das imagens.

3.3 METODOLOGIA DE MEDIÇÕES E COLETA DE DADOS

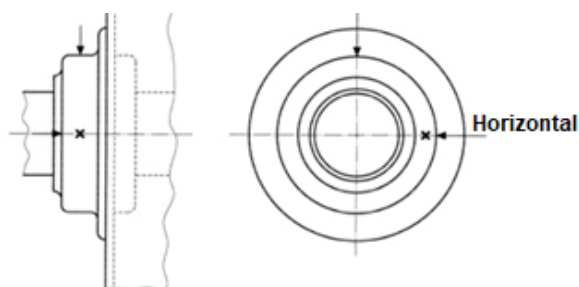
Para a coleta de dados, foram seguidos os procedimentos padrão adotados pelas normas internacionais e manuais dos fabricantes. Para análises de vibração, adotou-se o procedimento indicado na norma ISO10816-1 (1995).

As coletas de dados de termografia e ultrassom seguiram a padronização do fabricante dos equipamentos de medição.

3.3.1 Metodologia De Coleta De Dados Vibracionais

Todo o local foi isolado conforme as orientações de segurança, e as proteções da máquina foram removidas para ter acesso aos rolamentos que seriam medidos nas duas extremidades. A máquina em questão, Gleason 0660000429, era recém adquirida e estava passando por inspeção de rotina, já que não deveria apresentar dados vibracionais alarmantes com tão pouco tempo de uso. A equipe decidiu utilizar a norma ISO 10816-1(1995) e seguiu o padrão descrito para rolamentos, demonstrado na Figura 12.

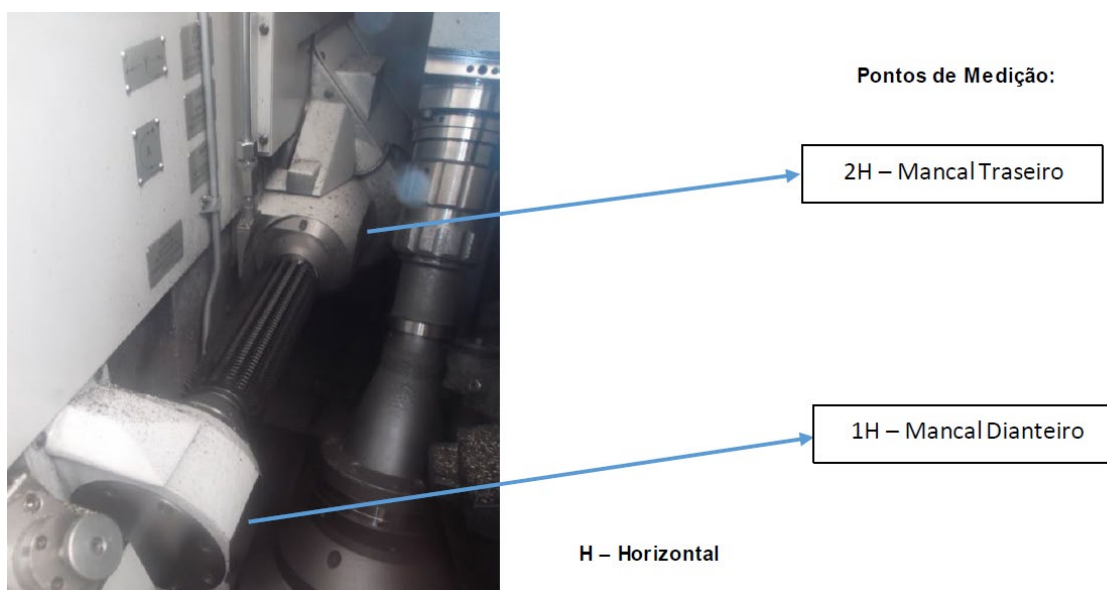
Figura 12 - Coleta de dados em rolamentos.



Fonte: ISO 10816-1(1995)

Optou-se por medições somente nas posições Horizontal 1(1H) e Horizontal 2 (2H), como observa-se na Figura 13, pela maneira em que se apresentavam os rolamentos acoplados à máquina. Os resultados de uma medição vertical neste caso não trariam dados úteis a se avaliar.

Figura 13 - Posições de medição (Eixo Gleason).



Fonte: Próprio autor

A máquina foi programada para operar em máxima rotação (2500RPM), utilizando modo MDA. O acelerômetro utilizado foi o de base magnética, fixado na carcaça externa.

O analisador de vibração demonstra os valores vibracionais e gera um gráfico de espectro durante a inspeção, que no primeiro momento gerou um alerta para o operador pelo alto valor de envelope no equipamento.

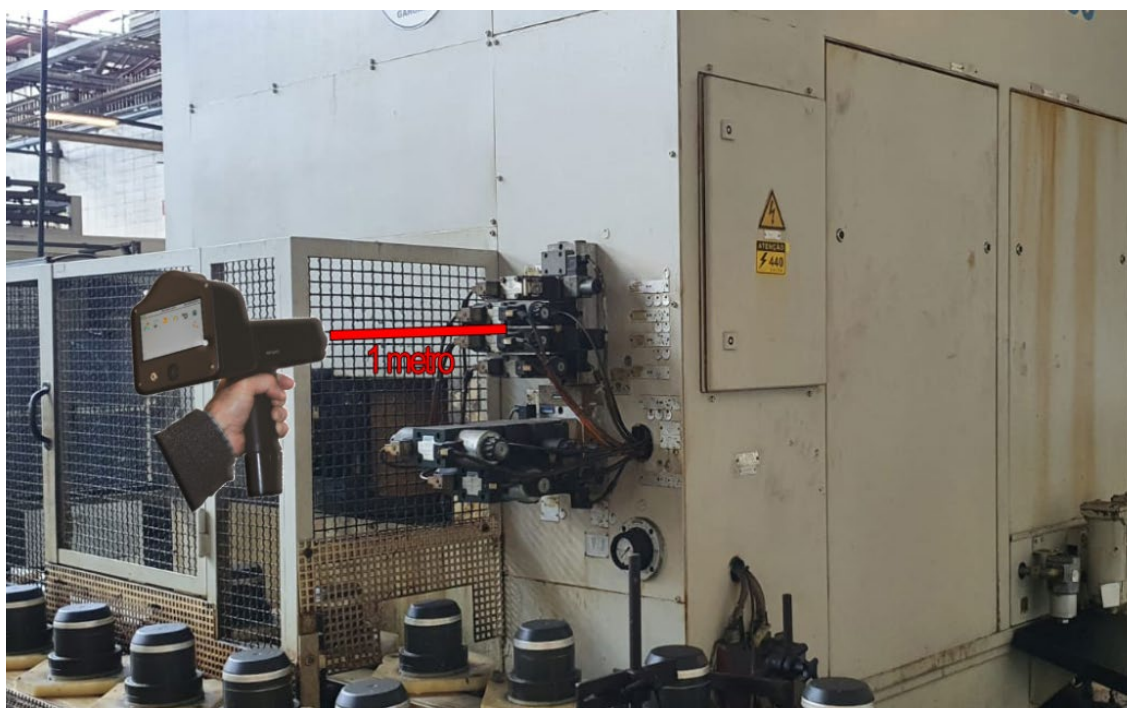
Após coletados os dados vibracionais da máquina em funcionamento, foram então eram carregados no software de análise @ptitude Analyst.

3.3.2 Metodologia De Coleta De Dados Ultrassônicos

Os dados ultrassônicos foram coletados seguindo as instruções de manuseio da própria fabricante do equipamento, durante inspeções de rotina para a localização de possíveis vazamentos em máquinas que utilizam atuadores pneumáticos.

O equipamento Ultraprobe P15000 foi apontado em direção ao objeto de estudo a uma distância de 1 metro, como ilustrado na Figura 14, e foi realizada uma varredura em todas as válvulas, conexões, engates e pontos mais susceptíveis a vazamentos.

Figura 14 - Coleta de dados ultrassônicos.



Fonte: Próprio autor

Após varredura, o instrumento de medição apontou um ruído típico de vazamento em uma das válvulas da PFAUTER 716210.

Após encontrado o vazamento, o local foi identificado com uma etiqueta numerada para rastreio e o ponto de fuga pintado com tinta. As informações como ruído em dB, componente da fuga, classificação do vazamento e definição da máquina por processo foram salvas no equipamento, e posteriormente descarregadas no computador para análise no Software.

3.3.3 Metodologia De Coleta De Imagens Termográficas

De maneira similar à coleta ultrassônica, as imagens coletadas no Disjuntor 02Q03 foram parte de uma inspeção de rotina. Para a análise termográfica, o técnico de manutenção seguiu as instruções dadas própria fabricante do equipamento de medição, no caso a câmera termográfica FLIR - T400. Uma representação da técnica de medição pode ser observada na Figura 15.

Figura 15 - Inspeção termográfica Disjuntor 02Q03.



Fonte: Próprio autor

Operando à uma distância de aproximadamente 1 metro, foram registradas as temperaturas de todos os disjuntores responsáveis pela proteção de circuitos dos motores nas torres de resfriamento.

As imagens coletadas foram salvas no equipamento e descarregadas no computador, a fim de realizar uma análise mais detalhada a partir do software FLIR Thermacam QuickReport.

Após a inspeção vibracional no Eixo Gleason apresentar valores de espectro alarmantes, a equipe de manutenção solicitou uma termografia no mesmo, para confirmar possíveis falhas críticas nos rolamentos. As imagens termográficas do eixo foram obtidas no mesmo dia da sua análise vibracional.

3.4 METODOLOGIA DE ANÁLISE VIBRACIONAL

Apesar de fundamentais para diversos tipos de maquinário industrial, as normas ISO 10816-1 e 10816-3 não foram determinantes nas análises do Eixo Gleason, pois estas fornecem parâmetros genéricos e com poucos detalhes sobre o uso e tipo de equipamento. Portanto, adotou-se o método de classificação da Tabela Charlotte para a análise do eixo.

Por esse motivo, a equipe passou a adotar as normas e parâmetros de segurança da tabela Charlotte, enquadrando o eixo como um “Fuso em operação de Acabamento”. Durante as análises vibracionais do Eixo Gleason, foi observado que o ruído emitido pelo equipamento denotava uma possível falha nos rolamentos da máquina.

A partir dessas informações, além dos níveis globais de vibração, passou-se a analisar o equipamento utilizando o parâmetro de envelope, fazendo uma análise específica para identificação de vibrações alarmantes em rolamentos.

3.4.1 Análise Vibracional De Envelope

O recurso de medição em envelope está presente nos equipamentos da marca SKF, e esta técnica possibilita a detecção de impulsos de sinais de defeito, tais como as produzidas por falhas de rolamentos, muito mais cedo que as técnicas de análise "tradicionais".

Para análise de rolamentos, os parâmetros de tradicionais são muitas vezes insuficientes, e por essa razão os analisadores da SKF contam com um parâmetro capaz de detectar vibrações harmônicas de frequências muito mais altas do que as que se analisam normalmente nos parâmetros globais de velocidade e aceleração. Esse recurso é denominado “envelope”, e é comumente utilizado na análise vibracional de rolamentos.

Todo sinal de vibração gera harmônicos. Se a faixa dinâmica do coletor de dados for suficientemente alta, então os sinais podem ser vistos como múltiplos de várias ordens da frequência fundamental. Se a faixa dinâmica for baixa, então os harmônicos dos sinais estão submersos em ruídos, muitas vezes chamados de "sujeira". A chave para detectar defeitos de rolamentos está em capturar as baixas amplitudes dos harmônicos dos defeitos do rolamento sem incluir os sinais de altas amplitudes decorrentes dos sinais da vibração rotacional.

3.5 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE ULTRASSOM

As análises de ultrassom foram conduzidas com o intuito de analisar o custo do desperdício de energia elétrica devido a vazamentos no sistema de ar comprimido. Para tanto, o cálculo que se propõe a estimar este valor precisa levar em consideração a potência elétrica perdida nos compressores e o preço dessa energia em kWh.

Primeiramente, para determinar a vazão de fuga, utilizou-se as instruções da UE Systems no seu guia de detecção de vazamentos de ar. Como se observa na Tabela 4, o guia dispõe de uma gama de estimativas de vazão (CMF), de acordo com a pressão (PSIG) e intensidade do ruído gravado em decibéis(dB).

Tabela 4 - Guess-timator UE Systems.

DIGITAL READING	100 PSIG	75 PSIG	50 PSIG	25 PSIG	10 PSIG
10 dB	0.5	0.3	0.2	0.1	0.05
20 dB	0.8	0.9	0.5	0.3	0.15
30 dB	1.4	1.1	0.8	0.5	0.4
40 dB	1.7	1.4	1.1	0.8	0.5
50 dB	2.0	2.8	2.2	2.0	1.9
60 dB	3.6	3.0	2.8	2.6	2.3
70 dB	5.2	4.9	3.9	3.4	3.0
80 dB	7.7	6.8	5.6	5.1	3.6
90 dB	8.4	7.7	7.1	6.8	5.3
100 dB	10.6	10.0	9.6	7.3	6.0

Fonte: UE Systems - Compressed Air Ultrasonic Leak Detection Guide (2005)

Para utilizar a Tabela 3 como um guia e demonstrar o consumo de energia elétrica que foi desperdiçado no compressor, a equipe adotou as condições de uso, operação e tempo de utilização idênticas ao modelo da Tabela. Além disso, foram observadas que as especificações do compressor eram semelhantes ao compressor usado como exemplo.

Considerando que as condições de operação do compressor instalado no estudo eram similares as condições dadas no exemplo da Tabela 3, e utilizando uma interpolação para estimar a vazão de fuga na peça, é possível estimar os gastos anuais decorrentes do vazamento.

A fórmula se dá por uma simples multiplicação do custo de kWh do período de análise, com o valor da potência gasta pela compressor para compensar a perda de pressão do vazamento. Esse valor então é multiplicado novamente pelas horas anuais de trabalho.

4 ANÁLISES E DESENVOLVIMENTO DE PLANO DE MANUTENÇÃO

Os resultados obtidos durante as medições foram analisados e direcionados às equipes de manutenção, a fim de providenciar soluções cabíveis para os problemas latentes observados.

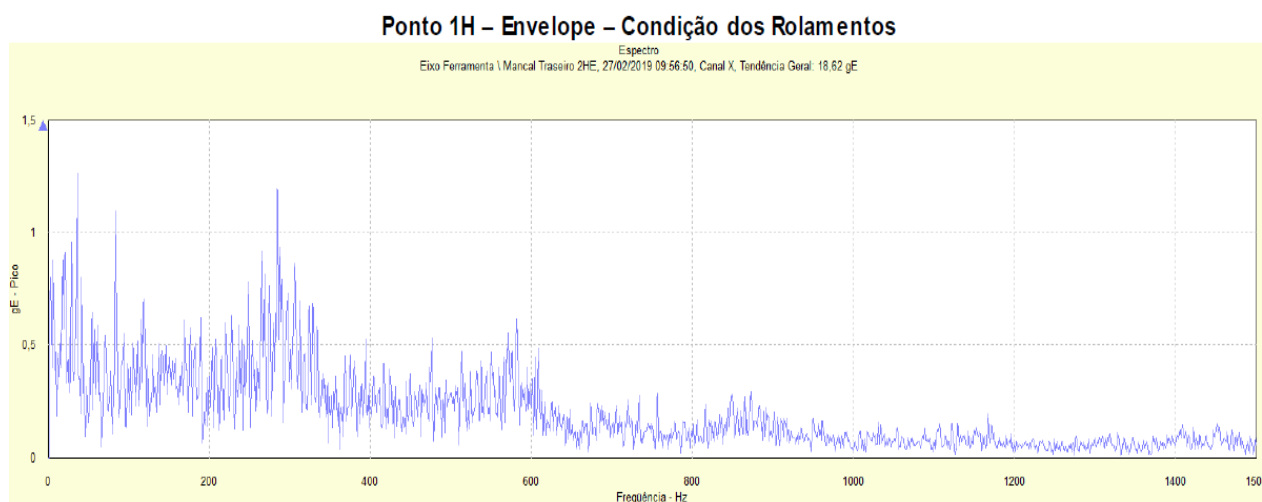
Com exceção do Eixo do centro de usinagem Gleason 0660000429, os objetos de estudo tiveram seu plano de manutenção executados logo após a análise ser recebida pela equipe de manutenção, e os resultados das soluções tomadas foram notados imediatamente.

4.1 EIXO GLEASON 0660000429 - ANÁLISE VIBRACIONAL E TERMOGRÁFICA

Foram coletados os dados de medição vibracional com os equipamentos operando em condições normais de produção (2500RPM). As medições foram realizadas na posição H (horizontal). Para a fixação do acelerômetro na estrutura da máquina, foram utilizadas bases magnéticas, para evitar filtros nos sinais de medição. As medições ocorreram em 27/02/2019 no horário entre 07:00 e 12:00.

Como observado no gráfico da Figura 16, no parâmetro de envelope (gE) do ponto 1H, foi registrado um valor de tendência geral de 18,62. Este valor pode ser considerado muito fora do limite estipulado pelas normas adotadas da tabela Charlotte.

Figura 16 - Espectro de Envelope em 1H.



Fonte: Próprio autor

Adotando o padrão publicado pela Technical Associates of Charlotte em *Analysis II - Concentrated vibration signature analysis and related condition monitoring techniques*, identificou-se uma falha em estado crítico no rolamento dianteiro (1H) pelo elevado valor de envelope (gE), apresentado na Tabela 5, registrando uma condição mais de doze vezes a recomendada pela literatura.

Tabela 5 - Comparação de dados com tabela Technical Associates of Charlotte (1997)

Tipo de Máquina	Valor RMS de Velocidade de Vibração (mm/s)			
	Bom	Aceitável	Alarme 1 (Alerta)	Alarme 2 (Perigo)
Máquinas Ferramentas				
Fuso em Operação de Acabamento	Até 1	1 a 1,5	1,5	2
Ponto	Range Recomendado	Valores gE		
Mancal Dianteiro – 1H	< 1,5 mm/s	18,620		
Mancal Traseiro – 2H	< 1,5 mm/s	8,793		

Fonte: Próprio autor

Além disso, o rolamento traseiro (2H) também apresentou valor acima do limite, porém após a termografia, constatou-se que a vibração elevada no rolamento traseiro se deu pela falha inicial do rolamento dianteiro.

A constatação de problema no rolamento dianteiro foi confirmada por análise termográfica realizada no mesmo dia, nas mesmas condições de trabalho. Conforme imagem termográfica na Figura 17, pode-se observar um superaquecimento na região do mancal dianteiro, e juntamente ao ruído anormal de operação, contatou-se uma falha em estágio crítico.

Figura 17 - Termografia Rolamentos eixo Gleason 0660000429.



Fonte: Próprio autor

Após análise dos problemas relacionados ao eixo do centro de usinagem Gleason 0660000429, foram emitidas chamadas de manutenção com urgência para a máquina, requisitando os seguintes trabalhos:

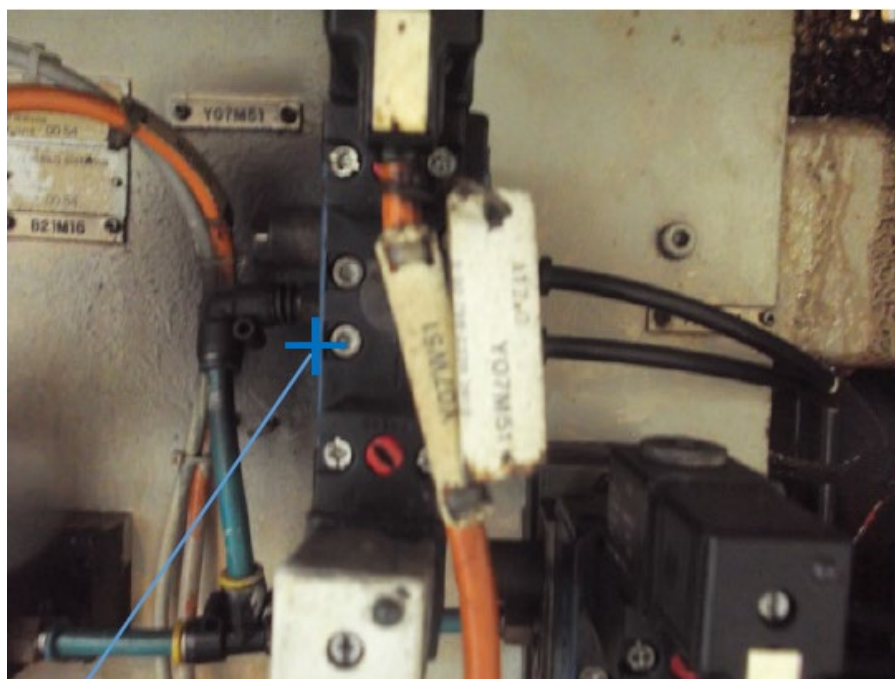
- Substituir os rolamentos do eixo ferramenta
- Verificar possíveis folgas
- Verificar eficiência do sistema de lubrificação
- Recondicionar equipamento

As medidas corretivas foram prontamente tomadas e as atividades da máquina monitoradas nos meses seguintes, juntamente com um estudo vibracional a contínuo a fim de constatar melhora nos parâmetros do eixo.

4.2 VAZAMENTO PFAUTER 716210

O vazamento identificado na cortadora de engrenagens Pfauter 716210 foi registrado pelo equipamento ultrassônico Ultraprobe 15000, em uma válvula de ar pneumática, conforme a Figura 18. A inspeção foi realizada no dia 17/05/2018.

Figura 18 - Ponto de fuga de ar Pfauter 716210.



Situação Observada

Ponto de Fuga

Vazamento de ar válvula Pneumática

Fonte: Próprio autor

O ruído emitido pela fuga de ar comprimido estava na faixa dos 62 dB, e conferindo o histórico de manutenção da máquina, constatou-se que esse vazamento se deu por falta de manutenção.

Para obter uma demonstração do valor anual de perda financeira com este vazamento, primeiramente foi feita uma interpolação dos valores da Tabela 4, obtendo assim os valores de vazão demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Vazão aproximada de fuga de ar (m³/min).

Pressão (bar)					
6,89		6,00		5,17	
Leitura Digital do Ruído(dB)	Vazão (m ³ /min)				
60	0,101940640				0,084950540
62	0,111002032		0,103089782		0,095710942
70	0,147247602				0,138752548

Fonte: Próprio autor

Após obtenção da vazão, considerando as condições de operação de preço do kWh próximo aos valores publicados no artigo da Air Solutions (2018), foi possível estimar um valor aproximado de quanto esse vazamento custaria anualmente pela queda de pressão, forçando o compressor a trabalhar mais. A estimativa está demonstrada na Tabela 7.

Tabela 7 - Demonstração de custo anual estimado do vazamento.

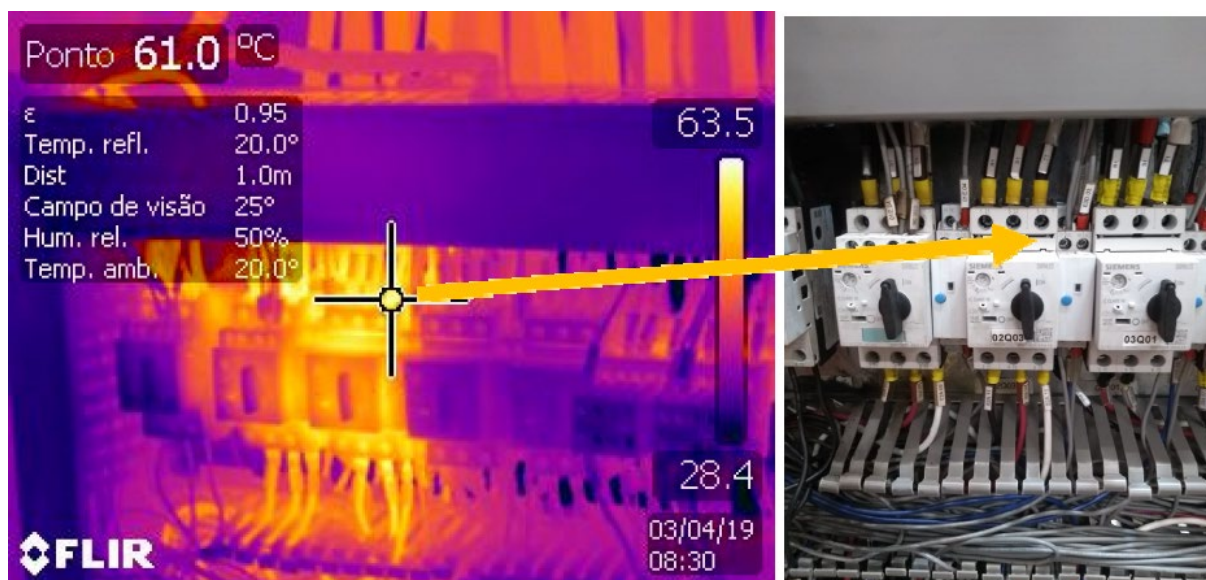
Vazão (m ³ /min)	Custo Anual	
0,0630	R\$	545,00
0,1031	R\$	891,81
0,2520	R\$	2.180,00

Fonte: Próprio autor

As informações sobre localização e identificação do vazamento foram encaminhadas ao setor responsável de manutenção. O problema foi prontamente solucionado pela manutenção corretiva, que sanou o vazamento e substituiu o componente danificado.

4.3 SUPERAQUECIMENTO DO DISJUNTOR 02Q03

A inspeção termográfica de rotina realizada no dia 03/09/2019 constatou um superaquecimento no disjuntor 02Q03, com pico de ~61° C, como pode se observar na Figura 19.

Figura 19 - Termografia disjuntor 02Q03.

Fonte: Próprio autor

Após análise, concluiu-se que o superaquecimento poderia ser um sintoma da pouca manutenção nas torres de resfriamento, e que poderia causar acidentes entre os funcionários, além anular o propósito do equipamento, que seria proteger os motores ventiladores de possíveis curtos e outros danos elétricos.

Após notificação da área de manutenção responsável, foi recomendada a troca do disjuntor o mais rápido possível.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Toda as inspeções de rotina com utilização de equipamentos termográficos e ultrassônicos mostraram-se positivas em relação aos objetivos propostos.

As análises ultrassônicas, utilizadas na localização e saneamento do vazamento de ar comprimido na cortadora de engrenagens Pfauter 716210, mostraram-se eficientes e com resultados rápidos. Utilizando interpolações para estimativa do custo anual de um único vazamento, e equipe técnica de preditiva demonstrou que as ações tomadas para aplicar inovações na área de manutenção podem trazer uma diminuição considerável nos gastos totais da empresa.

Além disso, a diminuição na quantidade de fuga de ar comprimido dentro da fábrica aumentou de maneira significativa a sensação de segurança e bem-estar dos funcionários responsáveis pelas operações das máquinas no ambiente.

De maneira similar, a inspeção termográfica no disjuntor 02Q03 também aumentou a confiança dos funcionários em um ambiente fabril mais seguro, que procura evitar acidentes por falhas elétricas de equipamento.

Outro benefício evidente da termografia foi a prevenção do dano que poderia ter sido causado ao sistema elétrico de resfriamento de água, caso o disjuntor deixasse de funcionar abruptamente. A substituição desse equipamento foi definitivamente uma solução muito mais simples e segura em comparação a um possível curto-circuito em todo o sistema.

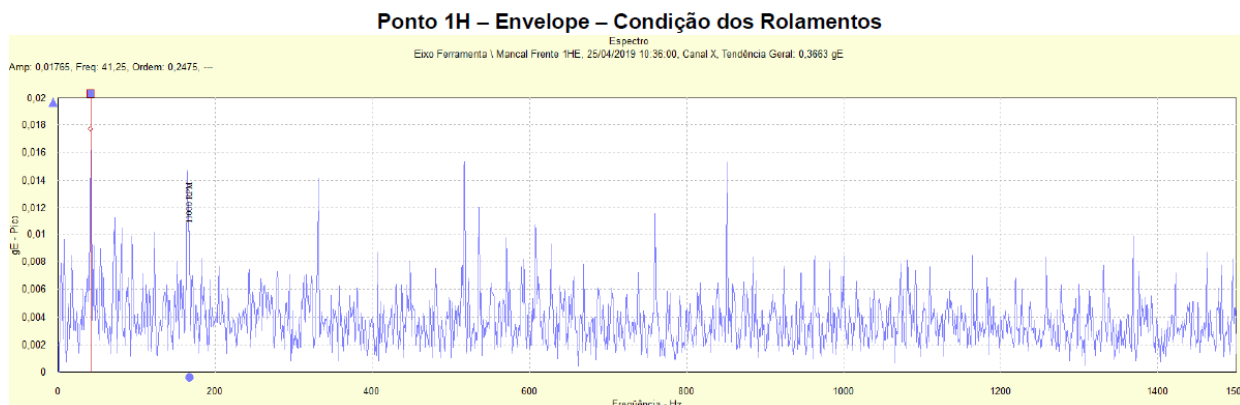
5.1 RESULTADOS EIXO GLEASON 0660000429

Após as análises e recomendações sobre o eixo do centro de usinagem Gleason 0660000429, a equipe de manutenção corretiva executou os seguintes trabalhos necessários para acondicionamento da máquina: substituição dos rolamentos do eixo ferramenta, verificação de possíveis folgas, verificação de eficiência do sistema de lubrificação.

A máquina então voltou as suas condições normais de operação e continuou a ser monitorada para possíveis constatações de melhoria.

No dia 26/04/2019, foi conduzida uma inspeção de rotina para verificação das condições dos rolamentos substituídos e estado geral da máquina. A Figura 20 apresenta o espectro de envelope medido no rolamento dianteiro.

Figura 20 - Espectro de Envelope em 1H.



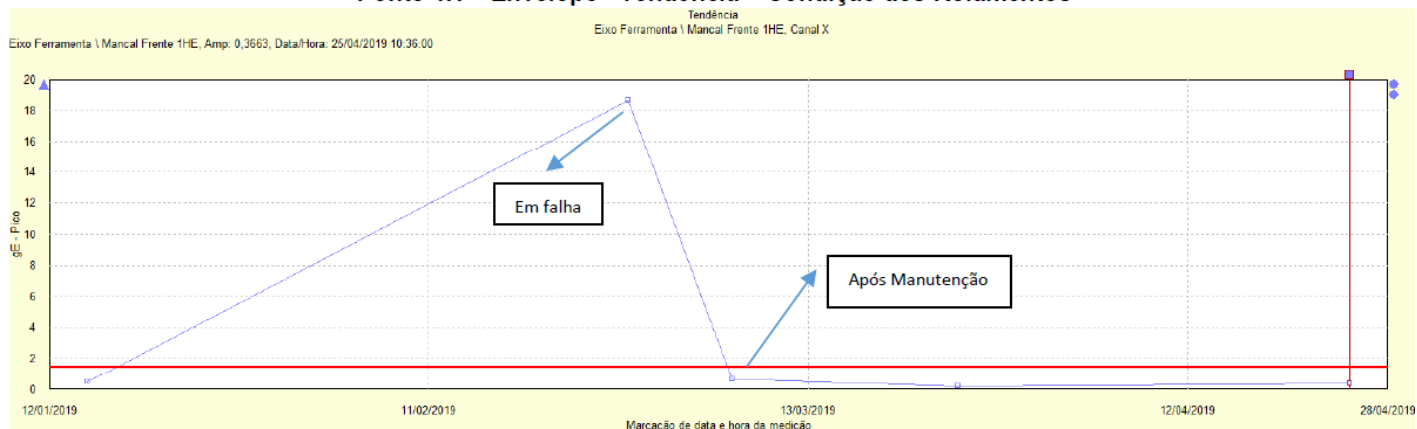
Fonte: Próprio autor

O gráfico aponta uma tendência geral de 0,36 (gE) no parâmetro de envelope de acordo com o equipamento da SKF. No parâmetro envelope, bem como os valores globais e análise do espectro apresentaram valores satisfatórios de operação.

Após manutenção os valores no parâmetro envelopem caíram de 18,620(gE) para 0,363 (gE).

Comparando com os dados obtidos antes das ações tomadas pela equipe de manutenção, fica evidente que a tendência de falha do equipamento foi erradicada.

O gráfico de tendência do equipamento, ilustrado na Figura 21, deixa evidente que as técnicas de análise vibracional em máquinas rotativas têm resultados absolutamente positivos quando utilizados de maneira correta.

Figura 21 - Tendência de envelope em 1H.**Ponto 1H – Envelope - Tendência – Condição dos Rolamentos**

Fonte: Próprio autor

De acordo com o setor de engenharia da fábrica, a manutenção corretiva aplicada no equipamento antes da sua falha crítica foi infinitamente mais barata que a sua para inesperada por falha, e muito menos danosa à produção pois pôde ser agendada em um horário em que não seria crucial o seu funcionamento.

6 CONCLUSÕES

Este estudo de caso concluiu que a implementação de técnicas de manutenção preditiva nas rotinas de inspeção trouxe resultados extremamente positivos para o setor de serviços manutencistas da Leadec Brasil.

As análises vibracionais se provaram efetivas na redução de desperdício de recursos, recomendando uma manutenção agendada mais simples e barata, e prevenindo a substituição parcial ou total do eixo do centro de usinagem Gleason 0660000429 por falhas nos rolamentos. O alerta gerado pelo técnico de preditiva permitiu que a manutenção da máquina não prejudicasse a produção, e evitou acidentes que poderiam ser causados por uma pane catastrófica na máquina.

O time de manutenção também entendeu que a termografia, como técnica de manutenção preditiva, é um excelente recurso para identificar diversos tipos de problemas comuns em ambiente fabril, como desgastes em componentes mecânicos e mal funcionamento de sistemas elétricos. As melhorias também se provaram significativas no quesito de segurança no ambiente de trabalho, e sensação de bem-estar dos funcionários. Além disso, constatou-se que a implementação das rotinas de inspeção termográficas foi extremamente simples e prática, dado o seu relativo baixo custo e alta portabilidade dos instrumentos de medição.

O processo de inspeção por ultrassom provou-se um método muito efetivo para identificação de vazamentos de ar comprimido, e apresentou diversas vantagens no dia a dia da fábrica.

Observando numa óptica de manutenção do sistema que gera o ar comprimido, a diminuição dos vazamentos trouxe um alívio para os compressores, e conseqüentemente uma necessidade menor de manutenção.

Os gastos com energia elétrica decorridos de vazamentos de ar se provaram significativos e uma grande economia para a empresa. Somados aos custos da manutenção das flutuações no sistema de ar, decorrentes de fuga de ar comprimido, constatou-se que a economia gerada pela implementação de inspeção por ultrassom trouxe resultados financeiros consideráveis.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As técnicas de manutenção preditiva utilizadas nesse estudo de caso se mostraram muito positivas em diversos setores do ambiente fabril. Com isso em mente, sugere-se que pesquisas futuras sejam feitas com o objetivo de observar os impactos a longo prazo dos equipamentos e máquinas que são gerenciados a partir da implementação dessas técnicas.

Além disso, a equipe de manutenção responsável pelo estudo também incentiva que sejam realizadas pesquisas sobre o custo a longo prazo das rotinas de inspeção e de equipamentos, além da manutenção e remuneração dos funcionários especializados em preditiva, que são necessários para executar as técnicas de maneira correta.

Entende-se que, apesar de benéfica, a implementação da manutenção preditiva não é sempre uma questão simples, e a equipe propõe que sejam feitos estudos para identificar e demonstrar quais os melhores e piores cenários para implementação das rotinas e técnicas de manutenção preditiva na indústria.

8 REFERÊNCIAS

AIR SOLUTIONS. **Ar comprimido: Tudo o que você precisa saber sobre vazamentos**. Boas Práticas em Ar Comprimido. 2018. Disponível em: <https://asmtreinamentos.com.br/downloads/pneumatica/Ar_Comprimido_%20Vazamentos.pdf>. Acesso em: fev. 2021.

ALMEIDA, C. M. **Inspeção de Vazamentos em Rede de Ar Comprimido Utilizando Ultrassom: Aspectos Teóricos e Estudo de Caso**. TCC (Especialização) - Poll, UFRJ, RJ, 2016.

A VOZ DA INDÚSTRIA. Câmeras termográficas na indústria: entenda as aplicações. **A Voz da Indústria**. ago. 2019. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/inovação/câmeras-termográficas-na-indústria-entenda-aplicações>>. Acesso em: mar. 2021.

BERRY, James E. **Vibration Signature Analysis I**. Technical Associates of Charlotte. Inc. Charlotte, NC.1993.

BERRY, James E. **Vibration Signature Analysis II**. Technical Associates of Charlotte. Inc. Charlotte, NC.1997.

BRITTO, R. de; PEREIRA, M. A. **Manutenção autônoma: estudo de caso em empresa de porte médio do setor de bebidas**. In: VII SEMEAD, Seminário de Estudos de Administração da USP – Universidade de São Paulo, 2003.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFICIENCIA **Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

CES Guidelines - **Overhead Electrical Wiring**. Rogers, 2002.

COLLACOTT, R. A. **Vibration Monitoring and Diagnosis – Techniques for Cost effective Plant Maintenance**. 2 ed. New York, John Wiley& Sons, 1999.

FERREIRA, Natália Aparecida. **O Uso da Técnica Ultrassônica na Eficiência Energética de Sistemas de Ar Comprimido**. 2020. TCC (Pós-graduação em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2020.

FLIR SYSTEMS. **User's manual FLIR T4xx series**. 2016.

FUPAI. **Termografia Infravermelha**. 2005.

HOLANDA, Sandra Maria Santos. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

ISO 10816-1, **Mechanical Vibration - Evaluation of machine Vibration by measurements on non-rotating Parts - Part 1**, 1995.

ISO 10816-3, **Mechanical Vibration - Evaluation of machine Vibration by measurements on non-rotating Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ**, 2009.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: Função Estratégica**. 3.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2009.

MAINT WORLD. News. *In: A powerful solution for total plant inspections*. fev. 2016. Disponível em: <https://www.maintworld.com/News/A-Powerful-Solution-for-Total-Plant-Inspections>. Acesso em: fev. 2021.

MALDAGUE, X. P. V.; MOORE, P. **Infrared and Thermal Testing**. ASNT, v. 3, 2001.

MIRSHAWKA, Victor. **Manutenção Preditiva – Caminho para Zero Defeitos**, Ed. McGrawHill. São Paulo, 1991.

NASCIF, Júlio. **Manutenção Preditiva: Caminho para a excelência**. **TECÉM TECNOLOGIA EMPRESARIAL LTDA**. 2009.

NEPOMUCENO, Laur Xavier. **Técnicas de Manutenção Preditiva**. Editora Edgard. 1 ed. São Paulo: Blücher, 1989. 1 v.

NETA - NETA MTS-2001, "**Maintenance Testing Specification for Electric Power Distribution Systems**", NETA - International Electrical Testing Association, (Snell, 2001).

NMAC – **Nuclear Maintenance Applications Center - Infrared Thermography Guide (NP-6973)**, EPRI Research Reports Center. (Snell, 2001).

NUCLEAR - **Nuclear Industry Guidelines**. IR-F/H/V-200, Rev 1. Rogers, 2002.

SKF USA INC. **SKF Microlog GX Series**. Revisão E. 2016. Disponível em: <https://www.skf.com/binaries/pub45/Images/0901d196804fcaad-PUB-CM32298500E-PT-Microlog-GX-405-UM_tcm_45-277270.pdf>. Acesso em: fev. 2021.

UE SYSTEMS. **Compressed air ultrasonic leak detection guide**. 2005.

UE SYSTEMS, **Manual de instrução Ultraprobe 15000**. Disponível em: <<https://www.uesystems.com/wp-content/uploads/manual-pt-UP15000.pdf>>. Acesso em fev/2021.

US DOE - United State Department of Energy. **Improving Compressed Air System Performance - A Sourcebook for Industry**. 3ª ed, 2016. Disponível em <[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/03/f30/Improving%20Compressed%20Air%20Sourcebook %20version%203.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/03/f30/Improving%20Compressed%20Air%20Sourcebook%20version%203.pdf)>. Acesso em fev.2021.

US NAVY - MIL STD-2194 (SH) "**Infrared Thermal Imaging Survey Procedure for Electrical Equipment**". Naval Sea Systems Command 02/1988; (Snell 2001).

WHITE, Glenn D. **Introduction to Machine Vibration**. DLI Engineering Corp. Winslow, Agosto de 2008.