Unisanta Science and Technology, 2021, 1, December
Published Online 2021 Vol.10 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Implementando IoT na Gestão de Ativos

André Luiz Dionísio, André Sergio Rodrigues, Fabiano Fernandes e Gabriel Gomes da Silva

UNISANTA– Universidade Santa Cecília – Faculdade de Engenharia – Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

E-mail: andre.dionisio@hotmail.com
Received June, 2021

Resumo: O presente artigo visa demonstrar de forma objetiva como a gestão de Ativos através do acompanhamento dos equipamentos por espectros de vibrações, podem gerar maior confiabilidade em um processo de produção.

Palavras chave: Ativos. Confiabilidade. Processo de produção. Gestão. Espectro de vibração.

Implementing IoT in Asset Management

Abstract: This article aims to objectively demonstrate how asset management through the monitoring of equipment by vibration spectra can generate greater reliability in a production process.

Keywords: Asset. Reliability. Production process. Management. Vibration spectrum.

1. Introdução

Os procedimentos da manutenção industrial e processos de fabricação estão em constante evolução a fim de reduzir os níveis de quebras e falhas em equipamentos e plantas. No decorrer das quatro revoluções industriais, novos procedimentos foram sendo implementados para melhorar a confiabilidade e disponibilidade de ativos. Durante o último século foi nítida a sequência de evoluções dos instrumentos para coleta de dados, métodos de análises e suas aplicações.

Hoje em dia é sabido que para alcançar resultados economicamente positivos é de suma importância contar com um departamento de manutenção maduro e atualizado, que possibilite a implementação de inovações para mitigar o surgimento de problemas crônicos.

Para Kardec e Nascif (2007 *apud*. OLIVEIRA, 2017, p. 8) a visão sistêmica do negócio e a mudança de paradigmas e conceitos levaram a grandes inovações no processo de gestão da manutenção.

O objetivo deste trabalho consiste em evidenciar a redução de gastos, otimização de processos de manutenção e ganho em disponibilidade de ativos por intermédio da implantação de tecnologias. Foco especial na internet das coisas – *IoT*, onde todas as coisas estão conectadas, os dados gerados são armazenados em nuvem e transmitidos via *wi-fi*, assim, reduzindo investimentos em infraestrutura como cabeamento de rede e servidores físicos.

Teles (2019) relata a importância da gestão de indicadores de manutenção, pois, servem como base para tomada de decisões e desenho de estratégias. Sem eles fica difícil saber se as decisões tomadas surtirão o efeito desejado.

O uso da tecnologia aliada a métodos sistêmicos de análise de falhas como o *FMEA*, viabilizam a assertividade dos investimentos, tornando possível determinar qual parte do equipamento deve ser monitorado em tempo integral e possibilitando a identificação precoce de possíveis falhas por meio da análise de vibrações.

2. Referencial Teórico

2.1 Análises de Ativos

A norma ISO 55000 (*apud*. ITEAM, 2018), define que a política da gestão de ativos visa estabelecer um conjunto de ações coordenadas para se extrair o máximo de valor

Copyright © 2021 ISESC.

dos investimentos de uma empresa, levando em consideração princípios capazes de alinhar os objetivos de gerenciamento às metas de negócios de uma organização e, assim, assegurar os melhores resultados.

2.2 Análises de Falhas Sistêmicas

Lopes (2013) define causas sistêmicas como as provocadas pelo próprio sistema, que se apresentam por meio de falhas em processos e causam a variabilidade existente.

Se existem muitas causas, o número de acidentes é alto, por isso os bons métodos de investigação devem acessar o sistema de gestão com a finalidade de identificar as vulnerabilidades e corrigir o que for necessário.

2.3 Análises de Vibrações

Wang & Williang (1995 *apud*. CUNHA, 2005, p. 39) definem que o princípio da análise de vibrações está baseado na ideia que as estruturas das máquinas excitadas pelos esforços dinâmicos dão sinais vibratórios cuja frequência é idêntica àquelas dos esforços que os tenham provocado; e a medida global tomada em algum ponto é a soma das respostas vibratórias da estrutura aos diferentes esforços excitadores.

2.4 Análises de Falhas Mecânicas

A NBR 5462 define falha como a incapacidade de um item em desempenhar uma função requerida.

Rampani (2019) relata que falha mecânica é a resultante de carregamentos estáticos geralmente ocasionados por cargas estáticas, isto é, carregamentos que são imutáveis no tempo e que podem produzir tração axial ou compressão, carga de cisalhamento, carga de flexão, carga torcional ou suas combinações.

3. Apresentação do Caso

Trata-se de um estudo de caso descritivo, retrospectivo de abordagem qualitativa e quantitativa a partir de fontes secundária de dados, extraídos de relatórios dos setores de manutenção, para a implantação de monitoramento *online* com foco em manutenção preditiva de uma caixa redutora do tipo Renk Zanini em uma usina siderúrgica.

3.1 Gestão de Ativos

Sabendo da importância do alinhamento dos objetivos de gerenciamento às metas de negócio da empresa para o bom funcionamento da gestão de ativos, se faz necessário buscar meios para prolongar a vida útil e disponibilidade.

Nesse contexto é de suma importância contar com departamento de manutenção maduro e eficiente, começando pela gestão e análise de dados até a execução da manutenção propriamente dita. Fernandes *et al*. (2003 *apud*. OLIVEIRA, 2017, p. 127), apresentam um sistema de customização de gestão de manutenção no Quadro 1, buscado avaliar a maturidade organizacional da manutenção.

O departamento de manutenção da instituição estudada era dividido em quatro setores:

Categorias de Medição	Estágio I: Incerteza	Estágio II: Despertar	Estágio III: Esclarecimento	Estágio IV: Sabedoria	Estágio V: Certeza
Compreensão e Atitude da Gestão	A Manutenção não é compreendida como uma ferramenta de gestão.	Reconhecimento de que a gestão da manutenção pode ser valiosa.	Enquanto realiza programas de melhoria da manutenção, aprende mais sobre gestão da manutenção e torna-se solidário.	Participativo e reconhece o seu papel.	Considera a gestão da manutenção uma parte essencial do sistema da empresa.
Resolução de problemas	Os problemas são combatidos à medida que ocorrem.	Ainda reativa, mas com peças de reposição disponíveis quando ocorrem falhas.	Problemas resolvidos pela entrada da manutenção, operações, engenharia e controlo de qualidade.	Preditiva usando técnicas de monitorização.	Problemas são prevenidos, aumento da disponibilidade e, portanto, da produtividade.
Postura da empresa relativamente à Manutenção	"Não sabemos porque temos problemas com a manutenção".	"É absolutamente necessário ter sempre problemas com a manutenção?"	"Nós identificamos e resolvemos problemas".	"Produtos de qualidade não podem ser feitos com equipamentos mal conservados, portanto, a qualidade da manutenção é uma rotina".	"Nós não esperamos avarias, pelo contrário, somos surpreendidos quando ocorrem".
CMMS	Nenhum CMMS é utilizado.	Sistema contém módulos de gestão de ativos e materiais.	Um módulo de monitorização da condição de eventos está integrado no sistema.	Capaz de gerar programações de atividades de manutenção preventiva. É usado para apoiar o processo de tomada de decisão.	Totalmente automatizada, a partir da deteção de falha para a geração de ordens de serviço com base em informações significativas e confiáveis.

Quadro 1. Grelha de maturidade organizacional da manutenção (Fonte: Oliveira, 2017).

Copyright © 2020 ISESC

- Manutenção corretiva,
- Manutenção preventiva,
- Manutenção preditiva e,
- Engenharia de manutenção.

Dentre estes, foram enfatizados o estudo no setor de manutenção preditiva, que monitorava 1428 ativos, sendo 497 de criticidade "A" nível "1".

A periodicidade de análise tinha variação entre mensal e bimestral e o sistema de coleta de dados era *offline*. Esse modo de coleta possui desvantagens, pois necessita de deslocamento até o local de instalação do equipamento gerando perda de tempo e expõe o responsável pela coleta a possíveis acidentes de trabalho.

Para melhorar a eficiência deste processo e reduzir os riscos as pessoas envolvidas, os conceitos de Industria 4.0 se tornam uma opção relevante.

Silveira (2021) comenta que os conceitos de Industria 4.0 englobam as principais inovações tecnológicas dos campos de automação, controle e tecnologia da informação, aplicadas aos processos de manufatura. Formado por nove pilares tecnológicos: Internet das coisas ou *IoT* (*internet of things*), *big data*, equipamentos autônomos, simuladores, integração de sistemas, *cyber security*, computação em nuvem, manufatura aditiva e realidade aumentada, que sustentam a Quarta Revolução Industrial.

Dentre esses, destacamos a *IoT*, termo utilizado para se referir a qualquer coisa conectada, incluindo praticamente tudo o que se possa imaginar, desde *smarphones* a lâmpadas, móveis, eletrodomésticos, equipamentos industriais, veículos e outros. Esta conectividade permite, por exemplo, que a lâmpada de uma casa acenda mesmo o proprietário estando em outro país.

Os impactos da *IoT* no mundo corporativo já são gigantescos. Nos mais variados segmentos é possível notar vantagens, como maior visibilidade em todo o processo de produção, redução dos custos de fabricação, interação com o cliente final, maior poder de análises de falhas entre outros. Os dispositivos conectados enviam dados para servidores de computação em nuvem, formando uma rede interligada entre os objetos conectados, estes dados recebidos são armazenados, analisados e posteriormente acessados por meio de alguma plataforma ou *software*.

Os equipamentos podem ser conectados através de sensores, formando uma espécie de malha, gerando grande volume de dados aumentando assim a capacidade de tomadas de decisões assertivas com o auxílio da inteligência artificial, levando a segurança operacional mais eficiente e menores gastos.

Com base nestes conceitos, a indústria estudada optou por realizar uma implantação piloto em uma caixa redutora que é componente crítico de uma máquina de laminação de fio. Foram instalados sensores de vibração, conectados a um transmissor *wi-fi*, e enviados para avaliação no setor de análise conforme apresentado na Figura 1.

3.2 Análise de Falhas Sistêmicas

Com o objetivo de manter os equipamentos disponíveis para geração de valor o maior tempo possível, a análise de falhas se apresenta como método fundamental na prevenção de paradas não planejadas.

Oliveira et al. (2010 *apud*. SCHMITT, 2016) ressaltam que a utilização de técnicas de análise possibilita a identificação dos fatores causadores das falhas. Dentre elas, os autores destacam: Análise de Causa Raiz da Falha (*Root Cause Analysis* ou *RCA*), Análise da Árvore de Falhas (*Failure Tree Analysis* ou *FTA*), Analise de Modos e Efeitos de Falhas (*Failure Modes and Effects Analysis* ou *FMEA*) e Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar

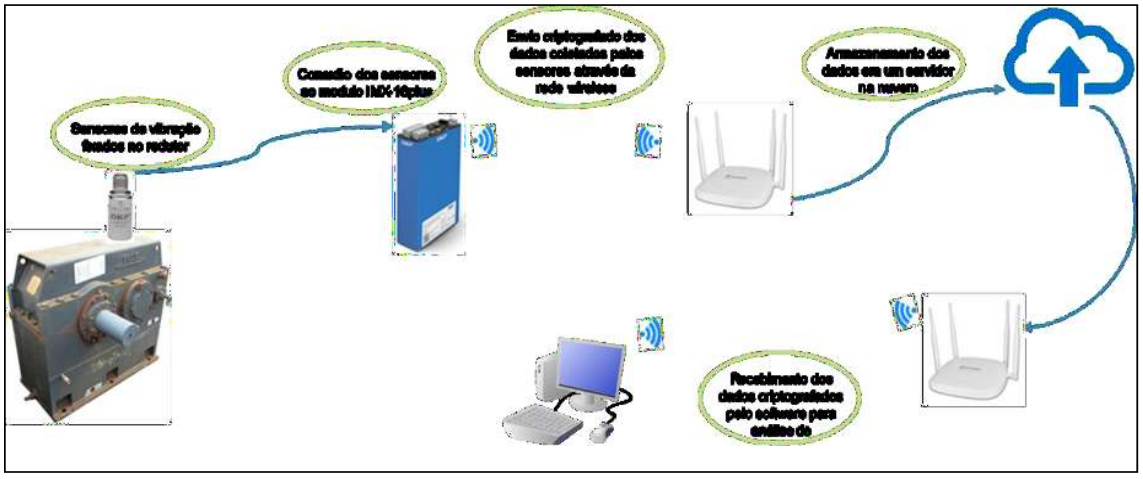


Figura 1. Fluxograma dos dados (Fonte: Autores).

Copyright © 2020 ISESC.

(DMAIC). Neste estudo foi utilizada a ferramenta *FMEA* para analisar os possíveis modos de falhas da caixa redutora.

Puente et al. (2002 *apud*. FERNANDES, 2006), relatam que o *FMEA* é útil para identificar as falhas atuais e potenciais e seus efeitos em sistemas e processos para definir ações que visem reduzir ou eliminar o risco associado a cada falha. Avalia a severidade de cada falha relativamente ao impacto causado aos clientes; a probabilidade de ocorrência e de detecção antes de chegarem às mãos dos clientes. Com base nestes três elementos, a *FMEA* leva à priorização de quais modos de falha acarretam os maiores riscos ao cliente e que, portanto, merecem atenção.

Para a execução de uma *FMEA*, o autor ressalta que primeiro é necessário identificar modos de falhas conhecidos e potenciais, seguidos pela identificação dos efeitos de cada modo de falha e a sua respectiva severidade. Depois identifica-se as causas possíveis para cada modo de falha e a sua probabilidade de ocorrência, bem como os meios de detecção do modo de falha e sua probabilidade de detecção. Por fim, é avaliado o potencial de risco de cada modo de falha e são definidas as medidas para sua eliminação ou redução. Então é possível definir ações que aumentem a probabilidade de detecção ou que reduzam a probabilidade de ocorrência da falha.

A severidade é um índice que não pode ser reduzido ou eliminado, pois depende apenas do nível de transtorno que o efeito da falha traz ao cliente. Para determinar o risco associado a cada modo de falha, é utilizada a metodologia Número de Prioridade de Risco (NPR) ou *Risk Priority Number* (*RPN*), multiplicando-se a pontuação da severidade pela ocorrência e pela detecção. O valor do *RPN* pode variar de 1 a 1000, os valores mais altos serão definidos como prioridade para as tratativas e ações de melhoria.

Cruz (2011, p. 12) comenta que para valores de *RPN* superiores a 100 recomenda-se ação imediata, assim como para valores de ocorrência superiores a 5 é recomendável atuar de modo paulatino. Ressalta ainda que de acordo com o Manual *FMEA* da norma QS9000, empregável no setor automobilístico, deverão ser definidas ações para pontuações que ultrapassem os 125 pontos, contudo, muitas empresas exigem a tomada de ações para todos os casos em que o RPN seja superior a 50.

Stamatis (2003 *apud*. FERNANDES, 2006), elenca os três tipos principais de FMEA, sendo: *FMEA* de sistema, *FMEA* de produto e *FMEA* de processo.

- *FMEA* de sistema é utilizada para avaliar as falhas nos estágios iniciais de conceituação e projeto. Enfoca as falhas do sistema em relação às suas funcionalidades e no atendimento das expectativas dos clientes, ou seja, está diretamente ligado à percepção do cliente em relação ao sistema.
- *FMEA* de produto é utilizada para avaliar possíveis falhas no projeto do produto antes da sua liberação para a manufatura. Enfoca as falhas do projeto em relação ao cumprimento dos objetivos definidos para cada uma de suas características e está ligado à capacidade do projeto em atender aos objetivos pré-definidos. Quando há necessidade de alterações no projeto do produto, são estabelecidas as prioridades para as ações de melhoria. O método auxilia na definição de testes, validação do produto, na identificação de características críticas e na avaliação dos requisitos e alternativas do projeto.

- *FMEA* de processo é utilizada para avaliar as falhas em processos antes da sua liberação para produção. Enfoca as falhas do processo em relação ao cumprimento dos seus objetivos pré-definidos e está diretamente ligado à capacidade do processo em cumprir esses objetivos. Define necessidades de alterações no processo, estabelece prioridades para as ações de melhoria, auxilia na execução do plano de controle do processo e na análise dos processos de manufatura e montagem.

Os equipamentos constituintes dos sistemas de produção utilizados nas indústrias são, geralmente, acionados por diferentes tipos de componentes motrizes, como por exemplo, motores elétricos.

Segundo Faria (2009, p. 17) "essas fontes de movimento rotativo, frequentemente, fornecem características de velocidade de rotação muito acima da requerida para a utilização nos processos industriais, assim surge à necessidade da aplicação de redutores de velocidade".

Redutores industriais são mecanismos para diminuir a velocidade e aumentar o torque, facilmente encontrado nos mais diversos setores industriais. São formados por um conjunto de engrenagens, que dependendo da quantidade de dentes, reduzem a velocidade do componente movido, conforme representado na Figura 2. A redutora é composta por diversos elementos, como engrenagens, rolamentos, eixos e chavetas, que podem ser diretamente atingidos por falhas.

No caso estudado foi de uma redutora do fabricante Renk Zanini. Por se tratar de um ativo de alta criticidade e servindo de exemplo para outros equipamentos com o

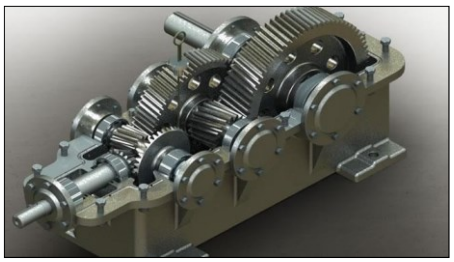


Figura 2. Redutora (Fonte: Indústria Hoje).

Copyright © 2020 ISESC

mesmo grau de severidade no processo foi elaborado um FMEA, apresentado na Tabela 1, abordando todas as falhas mecânicas que podem acontecer aos elementos envolvidos.

Com a elaboração da FMEA, foi possível identificar alguns problemas que podem ocorrer devido à vibração não monitorada. No item motor, o eixo empenado foi considerado como severidade 8, pois compromete todo o equipamento e a provável danificação dos demais elementos. Considerada por baixa ocorrência, classificada em 4, devido a ser uma falha com menor incidência.

A detecção também é de fácil percepção, pois o espectro de vibração vai mostrar anormalidades, e podendo ser detectado sensitivamente pelas oscilações.

3.3. Análise de Vibrações

A vibração é um fenômeno antigo e está presente em tudo, desde notas musicais até terremotos. A terra convive com constantes vibrações que podem ser medidas por meio de sismógrafos. Segundo Rao (2008, p. 1), as pessoas começaram a se interessar por vibração quando foram descobertos os primeiros instrumentos musicais, provavelmente apito e tambores, sendo Pitágoras o pioneiro na realização de experimentos.

Por ser um fenômeno tão presente no dia a dia, sua gestão se faz necessária, para garantir a confiabilidade de processo ou ativos.

Tabela 1. FMEA da caixa redutora (Fonte: Autores).

Item	Componente	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	Severidade	Causa da Falha	Ocorrência	Meio de Detecção	Detecção	RPN	Ações	Responsável	Prazo
Motor	Eixo	Transmitir rotação	Eixo empenado	Vibração de alta frequência, comprometendo eixo do motor e da redutora.	8	Falta de alinhamento dos eixos.	4	Observar vibração vertical com alta frequencia e/ou ir no equipamento e ouvir/sentir sua vibração.	4	128	Conferir alinhamento dos eixos periodicamente.	Manutenção	mensal
Redutora	Engrenagem	Transmitir rotação	Dente quebrado	Rotação com problemas.	8	Vibrações causaram rompimento onde havia concentradores de tensão.	4	Inspeção de vibração e lubrificação.	6	192	Projetor espelho para suportar choque moderado	Manutenção	mensal
Redutora	Rolamento	Transmitir rotação	Rolamento estourado	Rotação com problemas.	9	Rolamento mal lubrificado e trabalhando com vibrações acima do limite.	7	Inspeção nos rolamentos.	8	504	Projetor espelho para suportar choque moderado	Manutenção	mensal

Outro problema elencado como severidade alta e classificada em 8, foram as engrenagens com dentes quebrados, que impedem a transmissão de rotação para a outra engrenagem. As quinas dos dentes que são concentradores de tensão, podem causar trincas que se propagam com o tempo, provocando fratura. Por se tratar de uma falha já controlada pelo projeto, foi considerada de baixa ocorrência, porém, de difícil detecção, pois para evidenciá-la é necessário abrir o equipamento e analisar dente a dente, engrenagem por engrenagem.

Por fim o item rolamento, considerado 9 de severidade, pela possibilidade de emperrar e empenar o eixo desencadeando colapso sistêmico do equipamento se não corrigido a tempo. Sua ocorrência é comum em equipamentos que trabalham com rotação e sua detecção complexa, classificada como 8, por ser necessário desmontar todos os elementos e descobrir qual rolamento está comprometido e em qual eixo, demandando muito tempo para inspeção.

Nos resultados obtidos pelo *RPN*, ficou evidente a necessidade de planos de melhorias relacionados aos rolamentos, planos estes que serão abordados em maior nível de detalhamento no item 3.4, sobre a análise de falhas mecânicas.

Equipamentos em operação dão sinais vibratórios originados pelo esforço dinâmico, que são transmitidos pelas suas estruturas, assim permitindo que sejam captados.

Segundo Lenzi (1991 *apud*. ANTONIOLLI, 1999, p. 35) a análise das vibrações é o melhor parâmetro para avaliar as condições dinâmicas, como balanceamento, estabilidade nos mancais, tensões dinâmicas existentes em componentes, falhas incipientes em rolamentos e engrenagens, identificar desalinhamentos entre eixos e tolerância limite de funcionamento.

Price et al. (2001 *apud*. CUNHA, 2005, p. 39) comentam que o monitoramento da vibração provê informações sobre o comportamento macroscópico dentro da máquina, dessa forma é possível obter a assinatura vibratória da máquina quando nova ou em bom estado de funcionamento, servido de comparação para a identificação de novos esforços dinâmicos, consecutivos a uma degradação em processo de desenvolvimento.

Considerando que o início de uma avaria produz uma modificação na distribuição da energia vibratória, normalmente elevando o nível da vibração, é possível a identificação desta alteração quando é realizada a coleta deste sinal em pontos determinados do equipamento.

Copyright © 2020 ISESC.

É importante ressaltar que esta análise pressupõe princípios comparativos, tomando como base a assinatura vibratória ou referências de equipamentos semelhantes, conforme apresentado na Figura 3:

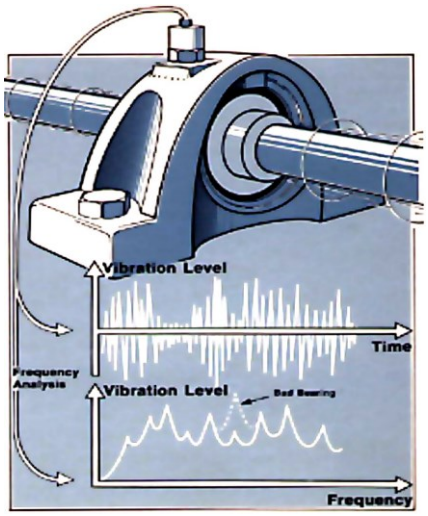


Figura 3. Defeito alterando a assinatura de vibração do equipamento (Fonte: Internet).

Glenn D. White, autor do livro *Introduction to Machine Vibration*, apresenta várias tabelas que auxiliam na interpretação de dados para cada situação resultante de problemas com vibração. Na Tabela 2, são apresentadas informações condensadas extraída dessas tabelas.

Teles (2019, p. 50) cometa que a norma ISO 10816 define quais são os níveis toleráveis de vibração para cada tipo de equipamento, representados na Tabela 3, tomando como referência sua potência, velocidade e tipo de fixação.

Na caixa redutora, objeto deste estudo, a coleta de dados *offline* era realizada através do aparelho Dynamix™ 2500, composto por um sensor de vibração acelerômetro de 500 mV/g, com resposta de frequência de 0,1 a 15 kHz, conectado ao aparelho e um pirômetro para detecção da temperatura dos mancais no momento da coleta.

O sistema de monitoramento online proposto fornecido pela empresa SKF (*Svenska Kullager Fabriken*), é conhecido como SKF *Multilog Online*, utilizando o *software* de análises espectrais *SKF @ptitude Observer*. Esse sistema possibilita a descarga de informações de maneira *online* e *offline* caso necessário.

O *software* busca os dados de vibração dos equipamentos diretamente nos servidores dentro de nuvens, tornando o sistema operacional mais ágil e eficiente. Os dados são enviados aos servidores através dos módulos de monitoramento *online* SKF IMx-16Plus conectados pela rede *wi-fi*, dispensando assim os gastos com construção de infraestruturas para passagem de cabos de redes para conexão.

O módulo IMx-16Plus apresentado na Figura 4, possui portas disponíveis para conexão de sensores de vibração e temperatura. Ao receber as informações dos sensores, ele realiza o tratamento primário desses dados e os codifica, para que possam ser enviados pela rede *wireless* sem que ocorra perda de informações ou gere interferências nos dados coletados.

Os sensores utilizados para coleta dos dados *online* são os mesmos utilizados para as inspeções *offline*. Foram utilizados 12 sensores de vibração, sendo posicionado um

Tabela 2. Resumo para identificação de frequências dos problemas (Fonte: Autores).

CAUSA	FREQUÊNCIA	AMPLITUDE	OBSERVAÇÃO
Correias Frouxas	1 x RPM	Instável	-
Desalinhamento	1-2-3-4 x RPM	Grande na direção axial	Desalinhamento entre os mancais
Desbalanceamento	1 x RPM	Proporcional ao desbalanceamento, maior no sentido radial	Comum aparecer no primeiro harmônico
Eixo Torcido	1 x RPM	Grande valores no sentido axial	A amplitude pode aparecer de modo pulsante
Engrenamento	Nº DENTES x RPM (ALTA)	Blips	Frequência entre 15.000 a 40.000 RPM
Falta de Rigidez	2 x RPM	Instável	Normalmente interfere no alinhamento
Folga em Mancais	0,5 x RPM	Grande no sentido vertical	Como a frequência é menor que 0,5 RPM, a fase pode ser variável
Lubrificação	ALTA	-	A amplitude é alterada em função da lubrificação
Rolamentos	ALTA	Blips	Frequência entre 15.000 a 40.000 RPM

Copyright © 2020 ISESC

Tabela 3. Critérios de severidade de vibrações recomendado para máquinas de uso geral com rotação entre 600 e 12000 RPM (Fonte: Teles, 2019).

Faixas de severidade de vibração radial			Julgamento da severidade da vibração categorizadas por classes de máquinas			
	mm/s	in/s	Classe I Máquinas Pequenas (> 15 Kw)	Classe II Máquinas Médias (15 Kw a 75 Kw)	Classe III Máquinas Grandes (298 Kw, de 10 a 200 rotações/segundo e montadas em suportes rígidos)	Classe IV Máquinas Grandes (298 Kw, de 10 a 200 rotações/segundo e montadas em suportes flexíveis)
Velocidade em RMS na faixa de 10 a 1000Hz (limites de faixa)	0,10	0,28	BOM			
	0,02	0,45				
	0,03	0,71				
	0,03	1,12				
	0,07	1,80		SATISFATÓRIO		
	0,11	2,80				
	0,18	4,50				
	0,28	7,10	INSTATISFATÓRIO			
	0,44	11,20				
	0,70	18,00				
	0,71	28,00	INACEITÁVEL			
	1,10	45,00				



Figura 4. Modulo IMx-16Plus (Fonte: SKF)

sensor em cada mancal de rolamento do redutor, conforme mostrado na Figura 5.

Com o sistema *online*, a coleta de dados foi realizadas a cada 10 minutos, proporcionando uma redução significativa no intervalo entre as inspeções.

No que tange a falhas originadas por rolamentos, Weber et al. (2009 apud. ROSSDEUTSCHER, 2018, p.35) relatam certas peculiaridades em sua identificação no espectro de vibração:

- As frequências características de falhas de rolamentos possuem uma peculiaridade especial: são assíncronas, não sendo múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo. Isso pode permitir a sua identificação, mesmo quando não se conhecem as características do rolamento que está sendo monitorado.
- Ao contrário da maioria das frequências de vibrações geradas por componentes mecânicos, essas são, verdadeiramente, frequências de defeitos, isto é, elas só estarão presentes nos espectros de vibração quando os rolamentos estiverem realmente defeituosos ou, pelo menos, quando seus 36 componentes estiverem sujeitos a tensões e deformações excessivas que poderão induzir uma falha.

Mobius (2017 apud. ROSSDEUTSCHER, 2018, p.35), frisa que as partes que compõe os rolamentos possuem comportamentos dinâmicos específicos, que geram quatro frequências básicas de defeitos, sendo:

- *Ball pass inner race* (*BPFI*): frequência de passagem da pista interna;

Copyright © 2020 ISESC.

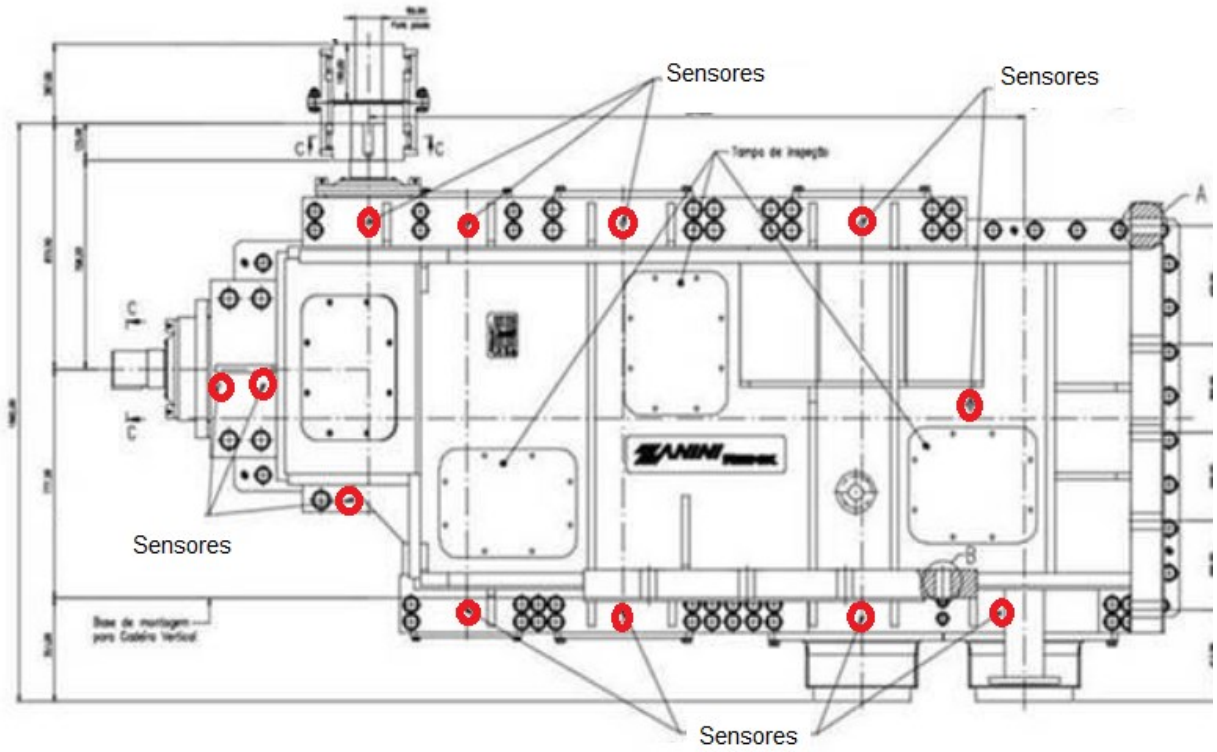


Figura 5. Posicionamento dos sensores de vibração. (Fonte: Autores)

- *Ball pass outer race* (*BPFO*): frequência de passagem da pista externa;
- *Fundamental train* (*FTF*): frequência fundamental (frequência de gaiola);
- *Ball spin* (*BSF*): frequência de passagem do elemento rolante.

3.4 Análise de Falhas Mecânicas

As falhas mecânicas podem ser de fácil percepção, como no caso de vazamentos, ruídos ou vibrações anormais; ou de difícil percepção, quando a identificação só é possível por meio de sensoriamento do equipamento.

Dinamox (2020) cita três fontes principais que originam a perda de utilidade de equipamentos: obsolescência, degradação ou desgaste de superfícies de componentes e acidentes, sendo o desgaste de componentes o maior causador de falhas.

Erros de projeto, seleção de materiais e imperfeições de materiais também são causadores de falhas.

Rampani (2019) ressalta que existem trincas em peças antes mesmo de o serviço começar, são resultantes dos processos de fabricação (usinagem, conformação, tratamentos térmicos, entre outros) e atuando como concentradores de tensão. Neste item o estudo será dirigido para o componennte com maior valor de *RPN* identificado no *FMEA* da caixa redutora, apresentado na Tabela 1: o rolamento.

Rolamentos são elementos de máquinas que são utilizados em equipamentos que tem movimentos rotativos. Ele é composto por um anel externo, anel interno, elementos rolantes (rolos ou esferas), vedações (alguns rolamentos não apresentam esse elemento) e gaiola conforme mostrado na Figura 6.

Teles (2019, p. 33), comenta sobre as cargas suportadas pelos rolamentos, sendo: radial, axial e combinadas, conforme ilustradas na figura 7.

Para Weber et al. (2009 apud. ROSSDEUTSCHER, 2018, p.35) os defeitos em rolamentos geralmente evoluem com certa lentidão e emitem sinais com bastante antecedência da falha final, onde os defeitos mais típicos que evoluem são os de riscos nas pistas, nos roletes ou esferas, *pitting*, trincas, corrosão, erosão e contaminação. A Figura 8 retrata possíveis formas de desgaste das pistas de rolamentos devido às cargas recebidas em trabalho.

Massoti (2011, p. 29) comenta que os rolamentos possuem modo de falha natural conhecido como fadiga subsuperficial, determinado pelo número de rotações estimada para apresentar os primeiros indícios de *flaking* (descamação).

Copyright © 2020 ISESC

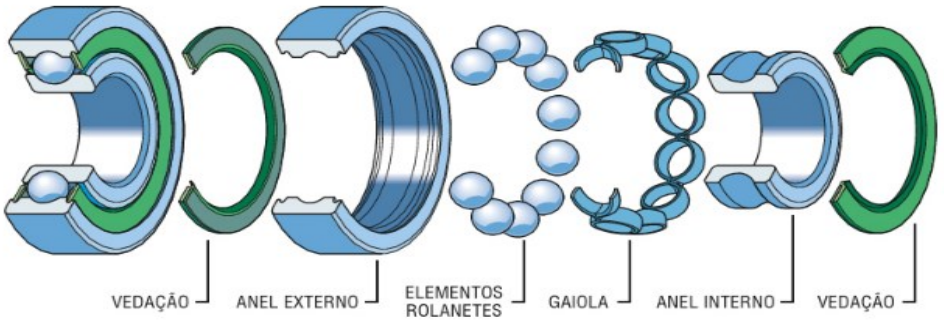


Figura 6. Composição física do rolamento.

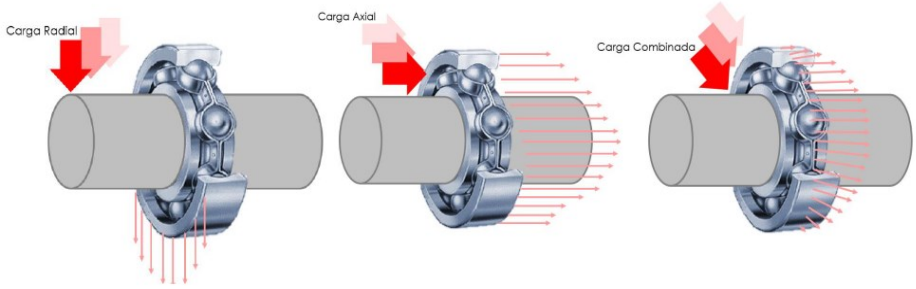


Figura 7. Cargas exercidas sobre rolamentos (Fonte: Teles, 2019).

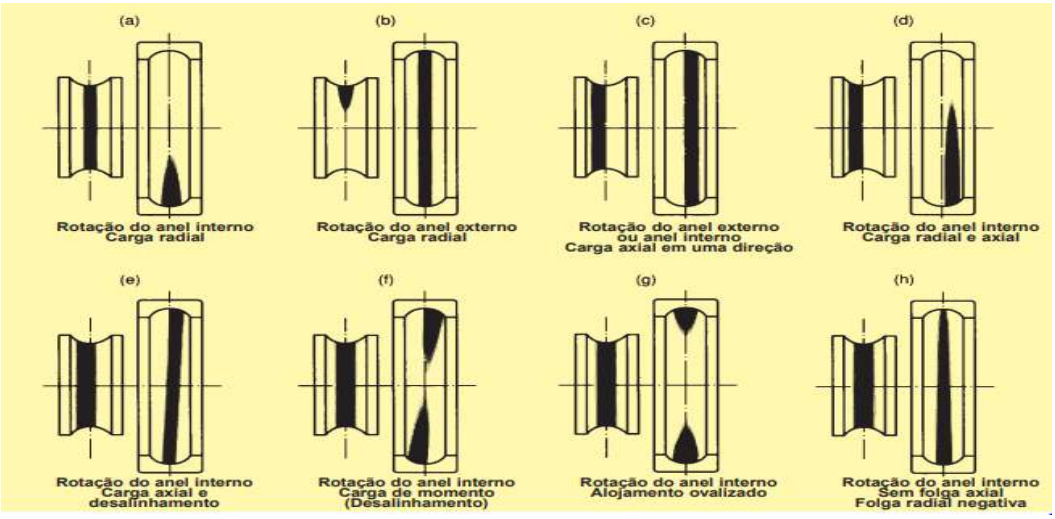


Figura 8. Desgaste de pistas interna e externa devido à carga recebida (Fonte: NSK).

A Figura 9 mostra o processo de evolução de *flaking*. Trincas por fadiga superficial podem ser provocadas por deficiência na lubrificação. Este fenômeno também é conhecido como *surface distress* e éstá mostrado na Figura 10. Massoti (2011, p.31) relata que essas micro-trincas superficiais evoluem até gerar fraturas e pequenos desprendimentos de material nas pistas de rolagem ou elementos rolantes.

Copyright © 2020 ISESC.

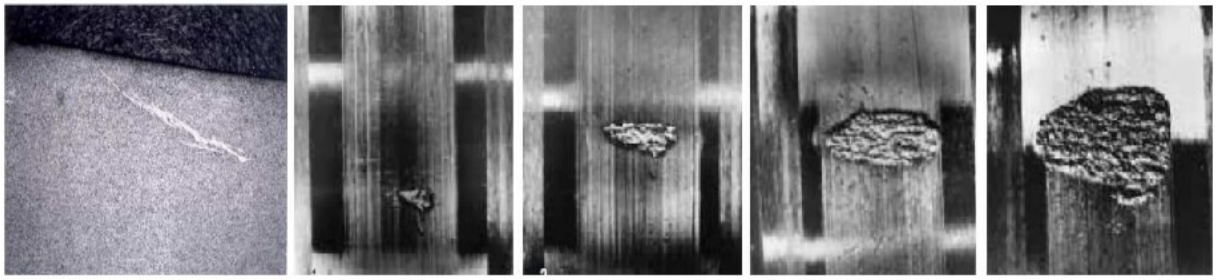


Figura 9. Evolução de *flaking* (Fonte: Massoti, 2011).

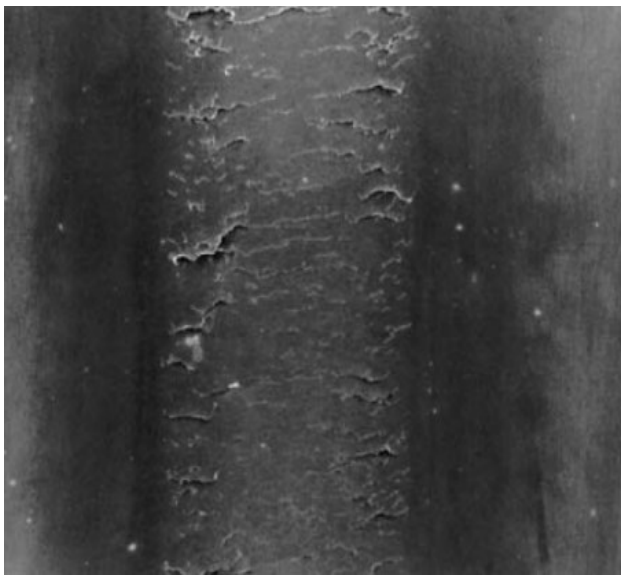


Figura 10. Desenvolvimento de micro trincas na pista de rolagem, por fadiga superficial (Fonte: Massoti, 2011).

4. Resultados e Discussões

A implantação do monitoramento de ativos de modo *offline* estava apresentando melhoras na redução de custos com o aumento da disponibilidade dos equipamentos. A Figura 11 apresenta um comparativo entre os anos 2019/2020, onde é precebido o aumento percentual dos valores economizados com a redução de paradas não programadas. Porém, o monitoramento *offline* necessita de deslocamento até a planta, gerando desperdício de movimentação, consequentemente desperdício de tempo conforme demonstrado na Tabela 4, sendo este um fator limitante na quantidade de análises realizadas por mês.

As paradas evitadas até o mês de outubro de 2020, já superavam o economizado em todo o ano de 2019, em contrapartida as paradas não evitadas apresentaram um crescimento de 2% em relação aos gastos não evitados.

Este aumento poderia ser menor com a redução do tempo entre as análises, a implementação do sistema online que proporciona agilidade na coleta dos dados. Assim, elevando o tempo destinado para análises, consequentemente possibilitando maior quantidade de análises por mês.

No Quadro 2 é apresentado um comparativo entre os métodos de monitoramento. O sistema *online* possibilitou a redução da ocorrência destas paradas, notificando os analistas caso ocorra qualquer anomalia em seus níveis normais de vibração em tempo real.

Copyright © 2020 ISESC



Figura 11. Economia do sistema *Offline* 2019/2020 (Fonte: Autores).

Tabela 4. Tempo necessário para realizar coleta de dados *offline (*Fonte: Autores).

Descrição da Atividade	Coleta de vibração	Tempo Gasto
TRAJETO DE IDA		10:29,8
PREPARATIVO PARA A COLETA		02:45,6
COLETA REDUTOR 3.7	mm/s	00:10,4
COLETA REDUTOR 3.7	g	00:14,0
COLETA REDUTOR 3.7	gSE	00:20,5
COLETA REDUTOR 3.7	Time	00:36,5
SEM BARRA		00:29,8
COLETA REDUTOR 3.8	mm/s	00:10,4
COLETA REDUTOR 3.8	g	00:14,0
COLETA REDUTOR 3.8	gSE	00:20,5
COLETA REDUTOR 3.8	Time	00:36,5
SEM BARRA		00:40,8
COLETA REDUTOR 3.9	mm/s	00:13,7
com barra sem coletar		00:22,6
SEM BARRA		00:35,0
COLETA REDUTOR 3.9	mm/s	00:10,4
COLETA REDUTOR 3.9	g	00:14,0
COLETA REDUTOR 3.9	gSE	00:20,5
COLETA REDUTOR 3.9	Time	00:36,5
COLETA REDUTOR 3.10	mm/s	00:07,0

Sistema *Offline*	Sistema *online*
Inspeções de 1 vez por mês.	Dados gerados a cada 10 minutos e 4.320 informações mensais.
Falha pode ocorrer entre o intervalo.	Rápida percepção de uma tendência de falha.
Trabalhador exposto ao ambiente.	Trabalhador acompanhando de forma remota
Não há notificação previa.	Notificação feita por inteligência artificial

Quadro 2. Comparação sistema *off × on (*Fonte: Autores).

A melhora em indicadores de manutenção passou a ser facilmente percebida, reduzindo o tempo médio para reparo (*Mean Time to Repair* ou *MTTR*) e o aumentando do tempo médio entre falhas *(Mean Time Between Failures ou MTBF*).

O conceito principal de coisas conectadas, vislumbra os sensores conectados 24h ou *fultime*. Os dados coletados são modelados e disponibilizados em um painel de controle, gerando alertas se detectado anomalias, permitindo aos analistas amplo controle do estado operacional dos equipamentos.

O sistema online mitiga acidentes de trabalho no trajeto da coleta, proporcionando maior disponibilidade de tempo para realização de análises, consequentemente elevando a eficiência do setor.

Copyright © 2020 ISESC.

Os conceitos tecnológicos propostos pela indústria 4.0 têm correlacionado diretamente com os cuidados aos funcionários mostrando-se bem alinhado com os princípios fundamentais da saúde e segurança industrial, pois quando se fala em projetos de atualização o foco não é apenas na redução de gastos e a atualização dos equipamentos, mas também na segurança ocupacional dos envolvidos nestas tarefas.

O *FMEA* se apresentou como ferramenta fundamental pra nortear investimentos em tecnologia, direcionado por exemplo, quais regiões dos equipamentos ou componentes de ativos devem receber sensores,, qual técnica preditiva deverá ser aplicada para elevar a confiabilidade do processo ou sistema.

Proporciona também otimização de estoque de sobressalentes, como no caso da possível identificação de falha potencial no rolamento. A aquisição de uma nova peça poderia ocorrer na véspera da manutenção planejada.

5. Considerações Finais

O uso das tecnologias como exemplo da *IoT* e a inteligência artificial, que são conceitos da indústria 4.0, torna processos mais seguros, ágeis e eficazes. A implementação do sistema *online* alinhado com os conceitos e métodos de análise de falhas geram mais confiabilidade no processo de produção e manutenção.

A implantação analisada tem possibilidade de gerar economia significativa para a empresa, potencializando o controle dos processos e equipamentos, viabilizando dados precisos e em tempo real, auxiliando na redução de perdas no processo, permitindo acompanhar se o equipamento está operando de acordo com o planejado e se o mesmo tem condições de operar de forma contínua.

A oportunidade de planejar a parada para realização de manutenções preventivas já é um fator valioso para minimizar o lucro cessante, o maior gerador de gastos para a empresa.

Referências

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT. NBR 5462: 1994**. Confiabilidade e Mantenabilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

2. ANTONIOLLI, E. B.. **Estudo comparativo de técnicas de medição e análise de vibrações para a manutenção preditiva em mancais de rolamentos**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianopolis, 1999. Disponível em: https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:m7V20HQBcaIJ:scholar.google.com/+tabela+para+analise+de+vibra%C3%A7%C3%B5es&hl=pt-BR&as_sdt=0,5. Acesso em: 22 ago. 2021.

3. CRUZ, B. P. O.. **Análise de riscos do trabalho ou actividade nas consultas externas do Hospital Pêro da Covilhã: avaliação de riscos através duma metodologia de análise ergonómica, adaptando e aplicando o método FMEA**. Dissertação (Mestrado em Ciências Sociais e Humanas) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2011. Disponivel em: https://ubiblio-rum.ubi.pt/bitstream/10400.6/3016/1/An%c3%a1lise%20de%20riscos%20do%20trabalho%20ou%20actividade%20nas%20Consultas%20Externas%20do%20Hospital%20P%c3%aaro%20da%20Covilh%c3%a3.pdf. Acesso em: 23 ago. 2021.

4. CUNHA, R. C.. **Redutor de velocidade através da técnica de partículas de desgaste de óleo lubrificante auxiliada pela análise de vibrações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2005. Disponivel em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/pos-graduacao/dissertacao_rccunha.pdf. Acesso em: 21 ago. 2021.

5. DYNAMOX. **Quais as falhas mecânicas mais comuns na industria e como preveni-las**. 2020. Disponível em: https://dynamox.net/blog/quais-as-falhas-mec%C3%A2nicas-mais-comuns-na-ind%C3%BAstria-e-como-preveni-las/. Acesso em: 23 ago. 2021.

6. FARIA, I.. **Seleção de um redutor de engrenagens para um agitador e planeamento das acções de manutenção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/2511/1/Faria_2009.pdf. Acesso em: 28 ago. 2021.

7. FERNANDES, J. M. R.; REBELATO, M. G.. Proposta de um método para integração entre QFD e FMEA. **Gestão & Produção**, v. 13, p. 245-259, 2006. São Carlos, SP. Disponível em: https://www.scielo.br/j/gp/a/5gLCZVqq5TMzxKp6sM7MJ6g/?lang=pt#. Acesso em: 23 ago. 2021.

8. ITEAM. **ISO 55000 e gestão de ativos: entenda a relação entre os dois**. 2018. Disponível em: https://iteam.com/iso-55000-e-gestao-de-ativos-entenda-a-relacao-entre-os-dois/. Acesso em: 20 ago. 2021.

9. LOPES, J.. **Causas especiais e sistêmicas - qual a diferença?** 2013. Disponivel em: http://www.interfaceshs.com.br/article/show/7. Acesso em: 20 ago. 2021.

10. MASSOTI, J. G. B.. **Metodologia para análise de defeitos em rolamentos e cálculo da vida remanescente à fadiga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011. Disponivel em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-02052011-121207/publico/Dissertacao_Joao_G_B_Massoti.pdf. Acesso em: 25 ago. 2021.

11. OLIVEIRA, M. A.. **Sistema de gestão da manutenção baseada no grau de maturidade da organização no âmbito da manutenção**. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial e Sistemas) – Universidade do Minho, Braga,

Copyright © 2020 ISESC

2017. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/48721/1/Tese%20de%20Doutoramento_Marcelo%20Albuquerque%20Oliveira_2017.pdf. Acesso em: 25 ago. 2021.

12. RAMPANI, M.. **Falha em equipamentos mecânicos**. 2019, Disponível em: https://eescjr.com.br/blog/falhas-em-equipamentos-mecanicos/. Acesso em: 21 ago. 2021.

13. RAO, Singiresu S. **Vibrações Mecânicas**, 4º ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

14. ROSSDEUTSCHER JUNIOR, J. L.. **Análise de vibração em rolamentos industriais.** Trabalho de Conclusão de Curso (TCC de Engenharia Mecânica) – Centro Universitário Unifacvest. Lages**,** 2018. Disponivel em: https://www.unifacvest.edu.br/assets/uploads/files/arquivos/0935b-tcc-joe-luiz-rossdeutscher-junior-eng.-mecanica-2018.pdf. Acesso em: 24 ago. 2021.

15. SCHMITT, J. C., LIMA, Camello C. R.. Método de Análise de Falhas utilizando a Integração das Ferramentas DMAIC, RCA, FTA e FMEA. **Revista ESPACIOS,** V. 37, n. 8, 2016. Disponível em: http://es.revistaespacios.com/a16v37n08/16370804.html. Acesso em: 21 ago. 2021.

16. SILVEIRA, C. B. **Industria 4.0: Oque é, e como ela vai impactar o mundo**. Disponível em: https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/. Acesso em: 21 ago. 2021.

17. TELES, J.. **Bíblia do RCM:** O guia completo e definitivo da manutenção centrada na confiabilidade na indústria 4.0. Editora Engeteles. Brasilia. 2019.

18. WHITE, G. D. **Introduction to Machine Vibration.** DLI Engineering Corp Winslow, 2008.

Copyright © 2020 ISESC.