

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Matheus Rufato Duarte**

**O ESTADO DA ARTE DA MANUTENÇÃO PREDITIVA: OPINIÃO DE  
ESPECIALISTAS**

**JUIZ DE FORA  
2020**

**Matheus Rufato Duarte**

O ESTADO DA ARTE DA MANUTENÇÃO PREDITIVA: OPINIÃO DE  
ESPECIALISTAS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de Engenharia  
da Universidade Federal de Juiz de Fora,  
como requisito parcial para a obtenção do  
título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: DSc., Luiz Henrique Dias Alves

JUIZ DE FORA

2020

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Duarte, Matheus Rufato.  
O ESTADO DA ARTE DA MANUTENÇÃO PREDITIVA: OPINIÃO DE ESPECIALISTAS / Matheus Rufato Duarte. -- 2021.  
87 p. : il.

Orientador: Luiz Henrique Dias Alves  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2021.

1. Manutenção Preditiva. 2. Técnicas de Análise. 3. Técnicas de Medição. 4. Técnicas de Gerenciamento. 5. Horizonte da Manutenção. I. Alves, Luiz Henrique Dias , orient. II. Título.

**Matheus Rufato Duarte**

O ESTADO DA ARTE DA MANUTENÇÃO PREDITIVA: OPINIÃO DE  
ESPECIALISTAS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de Engenharia  
da Universidade Federal de Juiz de Fora,  
como requisito parcial para a obtenção do  
título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 17 de março de 2021

BANCA EXAMINADORA



---

DSc., Luiz Henrique Dias Alves – Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Eng., Fabrício da Costa Coelho



---

Dr. Carlos Renato Pagotto  
Universidade Federal de Juiz de Fora

JUIZ DE FORA

2020

Dedico este trabalho à minha filha. Minha maior motivação, por ela posso superar qualquer que seja o desafio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus que me guia e ilumina meus passos e Nossa Senhora que me abençoa e me protege.

Agradeço também aos meus pais, Gilmar e Nilda, pela oportunidade e a confiança. Por acreditarem em mim e apoiarem nos momentos mais conturbados, fornecendo tudo que estava ao alcance deles para me ajudarem nessa caminhada.

Agradeço a minha irmã Camila e meu cunhado Gustavo, por estarem ao meu lado e cuidarem de mim, sem nunca poupar esforços para me ajudar.

A minha recém-formada família, minha namorada Liliane e minha filha Eliza, toda minha gratidão, pelo companheirismo, amor e incentivo. Por serem fonte de motivação.

Meus amigos, também minha eterna gratidão. Por serem ouvidos nos momentos mais desesperadores, por todo acolhimento e paciência. Por todos os conselhos.

Ao meu orientador, fonte de inspiração e admiração. Pela compreensão e ajuda em momentos atípicos no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim a todos que de alguma forma contribuíram nessa caminhada, com meu desenvolvimento pessoal e profissional.

## RESUMO

O presente trabalho trata-se de uma revisão do estado da arte da manutenção preditiva explorando sua história até chegarmos a metodologia de predição, apresentando assim seus principais conceitos e técnicas. Nesse documento está contido informações sobre análise de predição através do estudo por vibrações, termografia e tribologia, contendo as principais fontes de defeitos que levam a cada um desses tipos de investigação, os métodos de estudo utilizados, principais técnicas de medição, os instrumentos mais utilizados e vantagens e desvantagens de cada método. Posteriormente é apresentado as melhores técnicas para se planejar e analisar as informações obtidas nas metodologias anteriormente apresentadas, demonstrando que executar uma análise e um planejamento eficaz é tão importante quanto aplicar um método preditivo. Também é mostrado os melhores conceitos e métodos de gerenciamento e controle, apontado seus principais indicadores e filosofias empregadas para tal. Muito do processo de melhoria continua passa por aqui, já que é nesse momento que grande parte do planejamento se perde, portanto, é o controle que faz com que todo o processo seja cíclico e garante a evolução do mesmo com o tempo. Após é apresentado nesse trabalho o horizonte da manutenção preditiva, com uma busca pelo que há de mais moderno e o que se espera como sendo o futuro da mesma, olhando para conceito de indústria 4.0. Por fim as informações sobre teorias de manutenção preditiva, impactos dessas aplicações e tendências foram submetidas a uma análise da relevância, por meio de um *survey* com gestores de manutenção de importantes empresas do sudeste brasileiro, empregando para tal a escala de Likert. Na qual foram obtidos resultados satisfatórios que corroboram com o autor sobre a importância do tema aqui apresentado.

**Palavras-chave:** Manutenção Preditiva. Métodos de Estudo. Técnicas de Medição. Técnicas de Análise. Técnicas de Gerenciamento. Instrumentos de Medição. Horizonte da Manutenção.

## ABSTRACT

The present work is a review of the state of the art of predictive maintenance exploring its history until we reach the prediction methodology, thus presenting its main concepts and techniques. This document contains information on prediction analysis through the study of vibrations, thermography and tribology, containing the main sources of defects that lead to each of these types of investigation, the study methods used, main measurement techniques, the most used instruments and advantages and disadvantages of each method. Subsequently, the best techniques for planning and analyzing the information obtained in the previously presented methodologies are presented, demonstrating that performing an analysis and effective planning is as important as applying a predictive method. Also shown is the best concepts and methods of management and control, pointing out their main indicators and philosophies employed for this purpose. Much of the process of continuous improvement goes through here, since it is at that moment that much of the planning is lost, is the control that makes the whole process is cyclical and ensures the evolution of the same over time. Subsequently is presented in this paper the horizon of predictive maintenance, with a search for what is most modern and what is expected to be the future of it, looking at the concept of industry 4.0. Finally, information on predictive maintenance theories, impacts of these applications and trends were subjected to an analysis of relevance, through a survey of maintenance managers from important companies in southeastern Brazil, using the Likert scale for this purpose. In which satisfactory results were obtained that corroborate with the author on the importance of the theme presented here.

**Keywords:** Predictive Maintenance. Study Methods. Measurement Techniques. Analysis Techniques. Management Techniques. Measuring Instruments. Maintenance Horizon.



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
1.2. Justificativa	10
1.3. Objetivos	11
<b>1.3.1. Objetivos Específicos</b>	<b>11</b>
1.4. Metodologia	12
1.5. Escopo	14
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>15</b>
2.1. Gestão da Manutenção	15
<b>2.1.1. Tipos de Manutenção</b>	<b>16</b>
2.1.1.1. Manutenção Corretiva	17
2.1.1.2. Manutenção Preventiva	18
2.1.1.3. Manutenção Preditiva	18
2.1.1.4. Manutenção Detectiva	19
<b>3. O ESTADO DA ARTE EM MANUTENÇÃO PREDITIVA</b>	<b>20</b>
3.1. Técnicas de Manutenção Preditiva	20
<b>3.1.1. Manutenção Preditiva por Análise de Vibrações</b>	<b>20</b>
3.1.1.1. Fontes de Vibração	21
3.1.1.2. Método do Estudo	23
3.1.1.3. Técnicas de Medição	25
3.1.1.4. Instrumentos para Medição de Vibrações	27
3.1.1.5. Vantagens e Desvantagens da Análise em Vibrações	31
<b>3.1.2. Manutenção Preditiva por Análise Térmica</b>	<b>33</b>
3.1.2.1. Fontes de defeito em análises termográficas	33
3.1.2.2. Método do Estudo	34
3.1.2.3. Técnicas de Medição	37

3.1.2.4. Instrumentos para Medição de Temperatura	40
3.1.2.5. Vantagens e Desvantagens da Análise Termográfica	43
<b>3.1.3. Manutenção Preditiva por Análise Tribológica</b>	<b>43</b>
3.1.3.1. Fontes de defeito em análises Tribológicas	44
3.1.3.2. Método de Estudo	46
3.1.3.3. Técnicas de Medição	50
3.1.3.4. Instrumentos para Medição Tribológica	57
3.1.3.5. Vantagens e desvantagens da Análise Tribológica	58
3.2. Técnicas de Planejamento e Análise	59
3.3. Técnicas de Controle e Gerenciamento	64
<b>3.3.1. Principais Indicadores de Manutenção</b>	<b>64</b>
<b>3.3.2. Métodos e Conceitos de Gerenciamento</b>	<b>68</b>
3.4. O Horizonte da Manutenção Preditiva	71
<b>4. CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>75</b>
<b>5. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA DE CAMPO</b>	<b>77</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>84</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>85</b>

## 1. Introdução

Manutenção já um conceito conhecido pela humanidade a séculos, ganhando mais relevância pós revolução industrial no século XIX, surgindo a necessidade de aprimorar técnicas para tal atividade, mesmo que no seu início sendo tratada de forma secundária dentro das indústrias, a disponibilidade dos equipamentos foi se tornando cada vez mais necessárias, também começou a se notar o aprimoramento de outros atributos com técnicas de manutenção bem executadas.

Com a falta de manutenção o equipamento além de não executar sua função em plena capacidade pode parar de funcionar por falhas ou quebras. Isso pode ocasionar uma diminuição ou interrupção de uma produção na qual ele pode estar empregado ou mesmo na produção energética na qual o equipamento se faz necessário, qualquer que seja a utilização, sua falha ou quebra ocasionará perdas financeiras ou aumento nos custos.

Para evitar tais problemas um plano de manutenção se faz necessário, nesse caso o plano de manutenção de forma preditiva se torna a melhor opção, o mesmo prediz o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as condições necessárias para que este seja aproveitado em suas melhores condições.

Existem várias técnicas de manutenção preditiva com diversas aplicabilidades, além de grande variação de tecnologias e metodologias de gerenciamentos que se adequam as mais diversas situações e ambientes, com avanços constantes e inovações que prometem mudar a forma com que fazemos manutenção.

Diversas empresas já fazem uso da manutenção preditiva, algumas com tecnologias bem inovadoras e interessantes. Com cases que comprovam o quanto pode ser impactante aplicar planos de manutenção bem elaborados, impactos esses que influenciam não só a manutenção em si, mas também em toda uma filosofia de produção pautadas pela metodologia *lean – six sigma*.

## 1.2. Justificativa

Pesquisas documentais sobre o estado da arte devem ser apreciadas e valorizadas, pois são de suma importância para construção do conhecimento e desenvolvimento de inovações sobre o tema. A riqueza de informações que podemos resgatar e extrair que possibilitam a ampliação e compreensão do conhecimento justificam o estudo, nos permitindo um acesso ao compilado de informações que observa o processo de maturação e evolução das práticas, conceitos e conhecimentos.

No ambiente empresarial o planejamento de manutenção é fundamental para competitividade e sucesso em suas atividades. Planos mal elaborados ou mal executados, seja por incompatibilidade da técnica aplicada com a realidade da produção ou por falta de mão de obra especializada para executar o plano, geram impactos graves nos resultados da empresa, afetando sua produtividade e seus lucros.

Dessa forma manutenção bem elaborada e executada é essencial, tendo a preditiva como o que há de melhor entre as práticas aplicadas, pois permite antever a falha. Quando se utiliza de uma gestão da manutenção preditiva os ganhos vão além de produtividade, com o aumento da vida útil dos equipamentos, redução de falhas, menos custos e acidentes. Além da empresa poder se planejar melhor e dispor de uma rotina com mais disponibilidade do seu maquinário.

Se faz ainda mais necessário esse estudo quando analisamos o ambiente empresarial que comete a grande falha de associar manutenção apenas a gastos e acabam subvalorizando sua importância e sua capacidade de potencializar toda cadeia produtiva.

Torna-se também necessário apresentar as diversas técnicas que se tem dentro da manutenção preditiva, além das suas diferentes aplicabilidades.

### 1.3. Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo fazer uma revisão bibliográfica do estado da arte de manutenção preditiva e comparar com a percepção de especialistas do setor metal mecânico brasileiro.

#### 1.3.1. Objetivos Específicos

- Investigar o que há de mais moderno sobre o tema;
- Apresentar os principais equipamentos de controle;
- Apresentar as melhores técnicas de gerenciamento;
- Investigar melhores técnicas de manutenção preditiva;
- Coletar opiniões via *survey* de especialistas na área de manutenção sobre a aplicabilidade da manutenção preditiva em empresas brasileiras

#### 1.4. Metodologia

Para execução desse trabalho será feita uma pesquisa documental, apoiada por análise de relevância do assunto, através de um *survey* com gestores de manutenção de importantes empresas do sudeste brasileiro. Onde será feita uma pesquisa descritiva, sem o objetivo de comprovar ou refutar hipóteses exploratórias sendo essa qualitativa, com os dados recebem tratamento interpretativo e interferência maior da subjetividade do pesquisador, além de não ter a intenção de possuir caráter de aplicação momentânea.

Inicialmente será localizado os textos e documentos pertinentes e avaliado a sua credibilidade, assim como sua representatividade. Também serão avaliados o contexto histórico no qual o documento foi produzido, o documento terá delimitação segundo o sentido das palavras e dos conceitos, atentando aos conceitos-chaves presentes no texto e avaliado a importância e o seu sentido segundo o contexto em que eles são empregados. Dessa forma poderá ser feito a análise dos documentos produzindo e reelaborado os conhecimentos ali presentes e criando assim novas formas de interpretá-lo e compreendê-lo.

Posteriormente as informações sobre teorias de manutenção preditiva, impactos dessas aplicações e tendências serão submetidas a uma análise quantitativa, apenas para identificação da sua relevância, por meio de um *survey* com gestores de manutenção de importantes empresas do sudeste brasileiro. Para essa pesquisa empregou-se a escala de Likert (RENSIS LIKERT, 1932). Likert trata-se de uma escala de resposta psicométrica muito usada em questionários que levantam a opinião de gestores e especialistas sobre um determinado tema e sua relevância. Barnette (2000) descreve que *Likert* é a escala mais usada em pesquisas de opinião. Ao responderem a um questionário baseado nesta escala, os entrevistados apontam seu nível de concordância com uma afirmação.

A escala apresenta vários formatos. Mas, se destaca o formato que salienta a concordância, conforme apresentado no quadro 01:

Quadro 01 – Escala para atribuição de valores aos conceitos nominais

OPINIÃO SOBRE A AFIRMAÇÃO	PONTUAÇÃO
Discordo totalmente	1
Discordo parcialmente	2
Indiferente	3
Concordo parcialmente	4
Concordo totalmente	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Toda a análise documental envolvendo observação direta extensiva, por meio de questionários, pode gerar erros. Tucker-Seeley (2008) relata que pesquisadores se esforçam, mas não conseguem, uma medição livre de erros. Infelizmente, a medição perfeita não existe. Dois tipos de erros associados à pesquisa de levantamento, em geral, e à medição, em particular, são erros aleatórios e erros sistemáticos (ou não aleatórios). O primeiro, erros aleatórios, são erros sem qualificação. O erro aleatório (também conhecido como variação aleatória) representa diferenças em uma variável devido ao acaso, em vez do que a umas/ das outras variáveis em estudo. Embora variações aleatórias tendam a se anular mutuamente no longo prazo, esses tipos de erro não estão sob o controle do pesquisador e, portanto, não foram examinados nesta pesquisa. O segundo tipo de erros, erros não aleatórios, são aqueles que são consistentes ou não aleatórios e, portanto, podem ser controlados ou eliminados pelo pesquisador.

Para determinar a confiabilidade dessa pesquisa, empregou-se o coeficiente *alfa de Cronbach* (Matthiensen, 2011). Esse coeficiente mede a correlação entre respostas em um questionário por meio das análises das respostas dadas pelos especialistas. O coeficiente  $\alpha$  é calculado a partir da variância da pontuação das respostas individuais de um questionário que utiliza a mesma escala de medição. Para tal foi utilizado o *software IBM SPSS*. E por fim o resultado encontrado é julgado segundo o critério de LANDIS, J.R., KOCH, G.G (1977) que estabelece uma relação do *alfa de Cronbach* com uma avaliação de relevância.

## 1.5. Escopo

O presente trabalho foi elaborado a partir das mais diferentes origens de pesquisas, contendo artigos e livros que construíram os primeiros conceitos desenvolvidos sobre a manutenção preditiva, até experiências práticas com o que há de mais moderno sobre predição de avarias. Sendo assim foi avaliado não só o contexto geográfico e social dos documentos como também seu contexto histórico, para assim formular o estado da arte atual da manutenção preditiva.

Parte-se da premissa que técnica de predição é a metodologia ideal para ser utilizada quando pensamos em alta performance e que será a técnica associada a indústria 4.0 e aos conceitos de *lean-six sigma*. Tem-se também como premissa que conceitos como *Intelligence Artificial*, *Deep Learning*, *Machine Learning*, *Internet of Things* e *Big Data* estão intimamente ligadas ao futuro da indústria e automaticamente ao da manutenção preditiva.

Como critério de avaliação da relevância desse documento foi realizado um *survey*, com gestores experientes da indústria metal mecânica brasileira. Posteriormente foi utilizado de uma escala *Likert* e do *Alpha de Cronbach*, aonde o mesmo foi avaliado segundo critério de Landis.

Com base no exposto espera-se do presente trabalho uma reunião das mais importantes informações no que se refere a manutenção preditiva, passando pelo seu marco histórico, posteriormente pelo seu estado da arte e finalizando com as expectativas do futuro da mesma. Espera-se também segundo o critério de Landis para o *Alpha de Cronbach* um resultado que o mesmo chama de substancial.



## **2. Marco teórico**

### **2.1. Gestão da Manutenção**

Manutenção é uma palavra derivada do latim, significa “manter o que se tem”, a partir do momento em que o homem desenvolveu as primeiras máquinas para a produção de bens a manutenção surge, com a necessidade de preservar esse maquinário. Nos primeiros passos da revolução industrial no século XIX a manutenção já era um fato, porém tratada como fator secundário à operação, sendo executada pelos próprios operadores, com o advento do fordismo, implantação da produção em série, as indústrias passaram a estabelecer programas mínimos de produção e, em consequência, sentiram necessidade de criar equipes com conhecimento técnico específico e que pudessem efetuar reparos em máquinas no menor tempo possível, predominantemente direcionadas a manutenção corretiva. Tal modelo só foi modificado com a segunda guerra mundial, na década de 30, onde não apenas reparar falhas mas impedir que elas acontecessem passou a ser preocupação, a partir desse ponto, processos para prevenção de avarias foram desenvolvidos, com equipamentos sendo monitorados com base em tempo e depreciação, dando início a manutenção preventiva. Com esse cenário engenharia e gestão da manutenção se desenvolveram e aliada a inovações tecnológicas a manutenção se modernizou, com conceitos como terotecnologia técnica que relaciona estudos de confiabilidade, ciclo de vida de equipamentos com análises financeiras e técnico-econômicas. Sendo a manutenção o centro de qualquer avaliação terotecnológica.

Para Smith (2005), a manutenção tem como objetivo preservar as capacidades funcionais de equipamentos e sistemas em operação. Para Nepomuceno (1999), a manutenção deve ter seu embasamento primordialmente em um plano bem elaborado, que deve ser estudado com cuidado e objetividade e que leva em consideração todos os elementos da instalação, mesmo os mínimos detalhes da organização e da metodologia empregada, visando a obtenção de lucro.

De forma geral a manutenção possui um papel essencial para garantir a continuidade e a eficiência da produção. Com o passar dos anos a gestão dessa manutenção evoluiu de forma conjunta com os processos produtivos, despontando

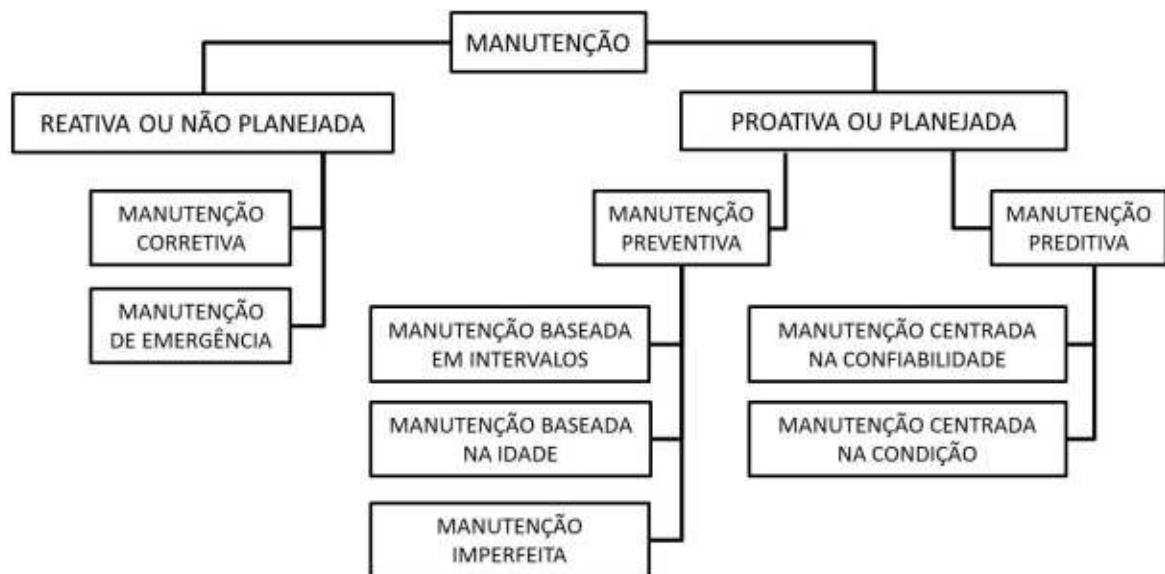
como uma consequência à redução de custos, podendo esses serem diretos, em função de possíveis quebras ou falhas no maquinário ou até indiretos, em função de não cumprimento de normas e regras preestabelecidas ou até mesmo não cumprimento de prazos ocasionando multas.

A manutenção aporta valor à organização produtiva quando realizada de forma adequada, ou seja, seus objetivos sejam definidos em concordância com o negócio da organização, levando as empresas a descobrir a importância de um plano estruturado de manutenção por meio da aplicação dos conceitos de confiabilidade (FUENTES, 2006).

### **2.1.1. Tipos de Manutenção**

Conforme Viana (2006), alguns fatores devem ser levados em consideração para a definição da melhor estratégia de manutenção industrial, sendo eles a recomendação do fabricante que consiste em informações sobre conservação, periodicidade de manutenção, ajustes e calibrações, procedimentos para correção de falhas, entre outros. A segurança do trabalho e meio ambiente, devido a necessidade de obedecer às exigências legais a fim de obter a integração perfeita entre homem/máquina/meio ambiente. Características do equipamento, observando o tempo médio entre falhas, a vida mínima, o tempo médio de reparo, etc. E o Fator econômico, como custos de manutenção, recursos humanos, material, interferência na produção e perdas no processo. Posteriormente a avaliação desses principais fatores é possível definir o modelo de plano de manutenção mais adequado. Sendo eles: corretiva, preventiva e preditiva, podemos também citar aqui a detectiva. Pode-se ver um diagrama esquemático desses modelos na figura 1:

Figura 1 – Diagrama das filosofias da manutenção



Fonte: KOTHAMASU, HUANG e VERDUIN (2009).

#### 2.1.1.1. Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva ocorre após o equipamento ser levado a falha através de exaustão de algum componente levando a paralisação do mesmo (não programada) ou quando algum defeito implica em desempenho inferior ao esperado (programada), segundo Viana (2006) esse tipo de manutenção é uma intervenção imediata a fim de evitar consequências graves ao equipamento, ao trabalhador e ao meio ambiente.

Sabendo que uma máquina parada compromete toda a produção, a manutenção corretiva é a primeira atitude a ser tomada para que esta produção volte ao normal quando ocorre a quebra inesperada (Monteiro, 2010).

O reparo feito após o início da falha leva a um desempenho degradado, pois o reparo real pode ser feito antes ou depois da falha funcional, ou seja, se está ciente da possibilidade de falha funcional antes que esta possa ocorrer. Entretanto, a manutenção só ocorrerá numa oportunidade de agendamento do reparo, ou quando ocorrer a falha funcional (NARAYAN, 2012).

Segundo Kardec e Nascif (2010) a manutenção corretiva, apesar de ser considerada simples, gera altos custos, principalmente de estoque de peças sobressalentes, trabalho extra e baixa disponibilidade de produção.

### **2.1.1.2 Manutenção Preventiva**

A manutenção preventiva se caracteriza por substituir ou ajustar os componentes de uma máquina antes que se ocorra as falhas, todas as tarefas a serem realizadas devem ser numa base regular, com tarefas específicas planejadas para manter o equipamento e mantê-lo em condições de funcionamento.

Segundo Pinto e Xavier (1999), a Manutenção Preventiva caracteriza-se pela intervenção no equipamento, bloqueando com antecedência as causas potenciais de falhas através de ações em intervalos fixos de tempo.

As atividades de manutenção preventiva estão relacionadas a dados históricos dos equipamentos e, na falta desses dados, as informações dos operadores e conhecimento a respeito da relação entre falhas e tempo de uso podem ajudar na definição apropriada da tarefa (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

Kardec e Nascif (2010) citam que esse modelo de manutenção representa o menor custo por indisponibilidade, porém se não bem dimensionado pode ocasionar o maior custo em peças e serviços.

### **2.1.1.3 Manutenção Preditiva**

A manutenção preditiva tem como base a previsão da falha no equipamento por meio de estudos prévios e acompanhamento de parâmetros, que permitem o ajuste ou substituição dos componentes de máquina antes que essa avarie ou trabalhe fora da sua faixa ideal de produtividade. Dessa forma evitando paradas inesperadas ou desnecessárias e ajustes mais precisos que resultam em redução nos custos de manutenção.

Manutenção preditiva, que é o uso de medições e instrumentação para prever e diagnosticar possíveis falhas de um equipamento. Esses tipos de ações são também conhecidos como manutenção baseada em condições (DHILLON, 2002).

A diferença em relação à manutenção preventiva é que, neste caso, não há uma programação fixa de manutenção, mas determinada por alguma informação vinda do próprio equipamento no qual será realizada a manutenção, tornando esta

programação uma manutenção adaptativa (KOTHAMASU; HUANG; VERDUIN, 2009).

Dentro da manutenção preditiva está a Manutenção Baseada na Condição (Condition-Based Maintenance - CBM), que busca avaliar a condição de um equipamento através de monitoramento periódico ou contínuo com o objetivo de realizar a manutenção em um ponto programado no tempo, quando a atividade de manutenção é mais rentável, mas antes de ocorrer uma falha do equipamento em serviço (GULATI, 2012).

Planos de manutenção tem como objetivo manter os equipamentos em operação, sendo executado de forma preditiva não só os mantém disponíveis para a linha de produção como também melhora a produtividade, a qualidade dos produtos e como consequência o lucro.

#### **2.1.1.4 Manutenção Detectiva**

Segundo Engeman (2018), a manutenção detectiva é realizada em sistemas de proteção ou comando para detectar falhas ocultas ou não perceptíveis à equipe de operação ou manutenção. Temos como exemplo o circuito que comanda a entrada de um gerador em um hospital no caso de falta de energia, esse deve sofrer manutenção detectiva, a fim de garantir seu perfeito funcionamento no momento de necessidade.

Alguns equipamentos podem apresentar falhas com efeitos ditos indiretos, ou seja, aqueles que não afetam diretamente a produtividade com pausas ou atrasos. Esses podem criar problemas futuros até mais graves, com impactos a segurança e ao ambiente, portanto são nessas máquinas que a manutenção detectiva se faz necessária, aumentando a disponibilidade do equipamento e consequentemente seu ciclo de vida.

É importante frisar que esse modelo de manutenção atua em sistemas de proteção e comando, em geral de forma automática, feitos para proteger outros componentes que são essenciais para linha de produção ou funcionamento de sistemas de forma geral.

### **3. O Estado da Arte em Manutenção Preditiva**

#### **3.1. Técnicas de Manutenção Preditiva**

##### **3.1.1. Manutenção Preditiva por Análise de Vibrações**

Soeiro (2008), descreve a vibração ou oscilação como qualquer movimento que se repete, de maneira regular ou irregular, depois de um intervalo de tempo. Ainda de acordo com Soeiro (2008), a vibração é um processo de troca de energia mecânica, nas formas de energia cinética (associada a velocidade), energia potencial (associada a deformação e à gravidade).

As vibrações começaram a ser utilizadas como fonte de informação para possíveis falhas em 1939 com T.C Rathbone em seu paper intitulado de "Vibration Tolerance" onde ele monitorou as vibrações de máquinas rotativas para a gestão de ativos. De lá para cá esse modelo de análise mudou muito, principalmente com o advento dos microcomputadores, que facilitaram a análise e o armazenamento dos dados provenientes das medições, sendo possível hoje até o controle remoto desses dados.

De modo geral vibrações são então perdas de energia para o meio, como consequência redução de trabalho produzido, como é citado por Mara (2004, p.3), uma máquina ideal não produz qualquer vibração, pois toda a energia é canalizada para a execução do trabalho a ser realizado. Na prática, entretanto, os elementos que compõem as máquinas, em geral, interagem entre si e, devido à presença de atrito, ação de forças cíclicas, etc., dissipam energia na forma de calor, ruído e vibrações.

Dessa forma Vibrações são fenômenos naturais no dia a dia e inerentes a qualquer máquina, porém elas podem indicar alguma falha ou desgaste na mesma. Essas falhas podem ser detectadas com a variação do espectro de vibrações, que são uma representação gráfica da amplitude da resposta de vibração em função da frequência. Como cada máquina possui suas próprias características e

consequentemente seu próprio espectro, a definição de qual é o espectro que representa a máquina trabalhando dentro de sua forma ideal serve para identificar quando a mesma está caminhando para ter uma possível falha.

#### **3.1.1.1. Fontes de Vibração**

Um equipamento possui várias fontes de vibração que culminam em uma perda de eficiência e prejuízos. Alguns dos mais comuns que são os causadores de praticamente a totalidade das vibrações não-naturais são o desbalanceamento, desalinhamento, folgas generalizadas, dentes de engrenagens, campo elétrico desequilibrado e corrente elétrica.

As vibrações indesejadas trazem consequências graves como acidentes, desgaste prematuro de componentes, quebras inesperadas, paradas na produção, aumento dos custos de manutenção e por possuir inúmeras fontes dessas vibrações torna-se de extrema importância esse tipo de análise.

A apostila de manutenção preditiva da Cargill do Brasil (2003), apresenta os três principais parâmetros com os quais a vibração pode ser medida, sendo eles o deslocamento, velocidade e aceleração. O deslocamento é utilizado para identificar vibração por desbalanceamento e desalinhamento. A velocidade é utilizada para identificar vibração por desbalanceamento, desalinhamento, folgas, falta de rigidez, excentricidade, problemas elétricos, vibração hidráulica, vibração hidrodinâmica, correias defeituosas, rolamentos defeituosos, engrenagens defeituosas. Já a aceleração é utilizada para identificar vibração por desbalanceamento, desalinhamento, folgas, além de problemas elétricos e problemas em rolamentos. Para ilustrar melhor o exposto, tem-se o quadro 2:

Quadro 2 – Identificação de Vibração

Causas	Amplitude	Frequência	Fase	Observações
Desbalanceamento	Proporcional ao desbalanceamento. Maior na direção radial.	1 x RPM	Marca de referência única	Mais comum causa de vibração
Desalinhamento de acoplamentos ou rolamentos e eixo dobrado	Maior na direção axial, 50% ou mais do que a vibração radial	1 x RPM – Usualmente 2 e 3 x RPM – Algumas vezes	Único, duplo ou triplo	Melhor encontrado pelo aparecimento de grande vibração axial. Use comparadores ou outro método para um diagnóstico positivo. Se o mancal tiver desalinhado e o acoplamento não, balanceie o rotor
Rolamento de anti-fricção ruins	instável, use medição de velocidade, se possível	RPM muito alto a maioria das vezes	Errático	Tendo como responsável provavelmente o ponto mais próximo de maior vibração de alta frequência
Excentricidade	Usualmente não é grande	1 x RPM	Única marca	Se em engrenagem possuir maior vibração em linha com os centros de engrenagens. Se estiver no motor ou gerador, a vibração desaparece quando a energia é desligada. Se estiver na bomba ou soprador, tente equilibrar.
Engrenagens ruins ou ruído nas mesmas	Baixa, use medição de velocidade, se possível	RPM muito alto	Errático	
Frouidão mecânica		2 x RPM	Duas marcas de referência. Um pouco errático.	Normalmente acompanhado de desequilíbrio e / ou desalinhamento
Correias de transmissão ruins	errático ou pulsante	1, 2, 3 e 4 x RPM de correias	Uma ou duas dependendo da frequência. Usualmente instável.	A luz estroboscópica é a melhor ferramenta para interromper o defeito da correia.
Elétrico	Desaparece quando a força é ligada	1 x RPM ou 1 ou 2 x frequência síncrona	Único ou enraizamento de marca dupla	Se a amplitude de vibração cair instantaneamente quando a energia for desligada, a causa é elétrica.
Forças aerodinâmicas e hidráulicas		1 x RPM ou número de pás no ventilador ou impulsor x RPM		São raros os casos de problemas dessa natureza, exceto em casos de ressonância.
Forças Recíprocas		1, 2 e Ordens superiores x RPM		Inerente a máquinas recíprocas e só pode ser reduzido através de mudanças de design ou isolamento

Fonte: Adaptado de MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008).



### 3.1.1.2. Método do Estudo

O método mais comumente utilizado para análise de frequências de vibrações e do físico e matemático Jean Baptiste Fourier (1768-1830), o mesmo desenvolveu a transformada de Fourier que permite calcular o espectro de frequências composto de “m” valores distintos a partir de “n” amostras do sinal no domínio do tempo, conforme a equação 1:

$$X(m) = \frac{1}{N_a} \sum_{n=0}^{N_a-1} x(n) e^{-i2\pi \left(\frac{nm}{N_a}\right)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde  $X(m)$  é o resultado da transformada de um sinal discretizado no domínio do tempo com m bandas discretas.  $N_a = a \cdot m$ , é o número de amostras a serem coletadas para formação de um espectro de frequências, onde a maioria dos analisadores adota  $a = 2,56$  (M.T. de ALMEIDA, 1990).

Conforme anteriormente citado a vibração pode ser medida em termos de deslocamento, velocidade e aceleração dessa forma esses parâmetros podem ser expressos considerando suas características senoidais compostas que são similares a de uma senóide simples, conforme as equações 2, 3 e 4:

$$x(t) = x_0 \sin(\omega t) \quad \text{Equação 2}$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = \omega x_0 \cos(\omega t) \quad \text{Equação 3}$$

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} = -\omega^2 x_0 \sin(\omega t) \quad \text{Equação 4}$$

Sendo:

$x(t)$  - Deslocamento

$\frac{dx(t)}{dt}$  - Velocidade

$\frac{d^2x(t)}{dt^2}$  - Aceleração

$x_0$  - Amplitude do deslocamento

Segundo Baldissarelli e Fabro (2019), a amplitude de uma vibração define a sua severidade e pode ser classificada de várias formas, como, relação entre o nível pico-a-pico, nível de pico, nível médio e nível RMS de um sinal senoidal.

O valor pico-a-pico indica a máxima amplitude da onda e é usado, por exemplo, onde o deslocamento vibratório da máquina é parte crítica na tensão máxima de elementos de máquina.

O valor de pico é particularmente usado na indicação de níveis de impacto de curta duração.

O valor médio, por outro lado, é usado quando se quer se levar em conta um valor da quantidade física da amplitude em um determinado tempo, de acordo com a equação 5:

$$Vm = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} f(t) dt \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$Vm$  - Valor médio

$\Delta t$  – Intervalo de tempo

$f(t)$  – Grandeza de vibração que deseja mensurar

Baldissarelli e Fabro (2019) cita que o RMS é conhecido como valor eficaz, está diretamente relacionado com nível de energia da vibração. Ele indica o potencial dano associado ao movimento vibratório, conforme a Equação 6:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} f(t) dt} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

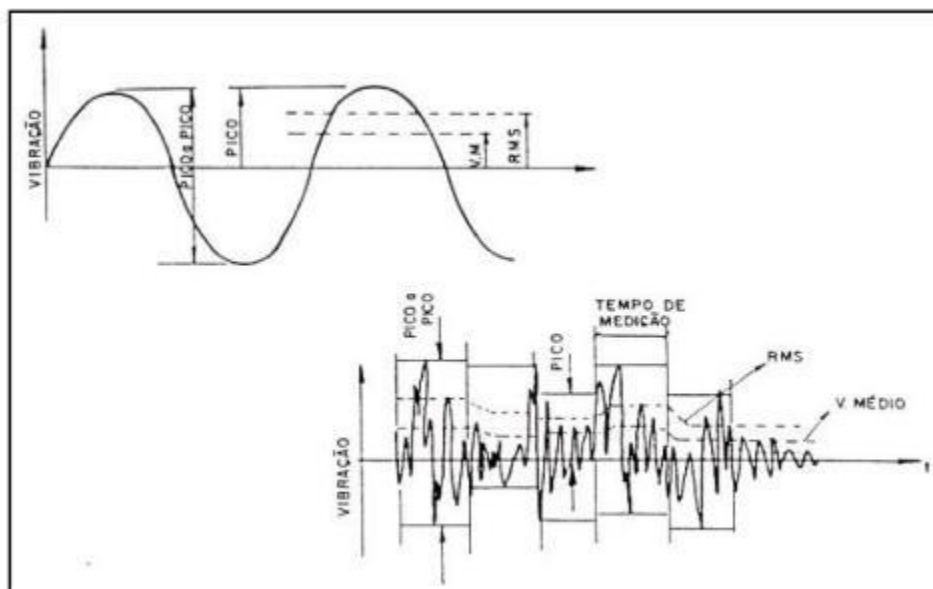
RMS - Raiz quadrada média do sinal senoidal (*Root Mean Square*)

$\Delta t$  – Intervalo de tempo

$f(t)$  – Grandeza de vibração que deseja mensurar

Conforme o que foi apresentado pode-se visualizar como são os sinais aqui citados na figura 2:

Figura 2 – Comparativo entre os sinais apresentados



Fonte: Baldissarelli e Fabro (2019).

### 3.1.1.3. Técnicas de Medição

Segundo SOEIRO (2008), alguns pontos devem ser levados em conta para definir qual a melhor forma de se obter as frequências de vibração, sendo elas:

A faixa de frequências e amplitudes que se trata de dos principais parâmetros que são determinantes na escolha do instrumento adequado é a faixa de frequências. Em baixas frequências a amplitude de deslocamento geralmente é alta, nesses casos os vibrômetros, também conhecidos por sismômetros, que medem o deslocamento de um corpo vibratório, são indicados para fazer a medição. Já em altas frequências as amplitudes de deslocamento são baixas e as amplitudes da aceleração são altas, nestes casos os acelerômetros são mais indicados para as medições. Os medidores de velocidade são de aplicação geral, pois apresentam desempenho significativo em baixa e em alta frequência.

O tamanho da máquina ou estrutura, pois instrumentos com grandes massas comparadas com as massas dos objetos de medição podem ter influência na medição das vibrações.

Condição de operação da máquina, equipamentos que funcionam em condições severas, operando em ambientes corrosivos ou abrasivos, por exemplo, podem impedir que instrumentos sofisticados sejam utilizados. É importante que os instrumentos não sejam danificados durante a medição, pois isto pode alterar os valores medidos.

E por fim o tipo da análise dos dados, a forma com que os dados gerados serão analisados é fundamental para a escolha do instrumento de medição. Vários detalhes no processo de medição estão condicionados pela análise que será realizada. Isto pode fazer com que determinado instrumento possa ser escolhido, por apresentar os dados de uma forma mais apropriada para análise pretendida.

Existem várias técnicas de execução da manutenção preditiva conforme o quadro 3:

Quadro 3 – Técnicas preditivas

<b>Técnicas</b>	<b>Categorias</b>
Energia acústica Ultrassom, emissão acústica	Radiações ionizantes Raios X Gama grafia
Fenômenos de viscosidade (Líquidos penetrantes)	Energia eletromagnética Partículas magnéticas Correntes parasíticas
Análise de vibrações Nível global, espectro de vibrações Pulso de choque	Inspeção visual Endoscopia ou boros cópia Detecção de vazamentos
Análise de temperatura – termometria Termometria convencional Indicadores de temperatura Pirometria de radiação Termografia	Análise de Óleos lubrificantes ou isolantes Viscosidade, número de neutralização acidez ou basicidade, teor de água insolúvel, contagem de partículas metais por espectrometria por infravermelha cromatografia gasosa, tensão interfacial, rigidez dielétrica, ponto de fulgor.
Verificações de geometria Metrologia convencional Alinhamento de máquinas rotativas	Ferrografia Ferrografia quantitativa Ferrografia analítica

<p>Forças</p> <p>Célula de carga teste de pressão, teste hidrostático, teste de vácuo, detecção de trincas.</p>	<p>Ensaio elétrico Corrente, tensão, isolamento perdas dielétricas, rigidez dielétrica, espectro de corrente ou tensão</p>
---	--

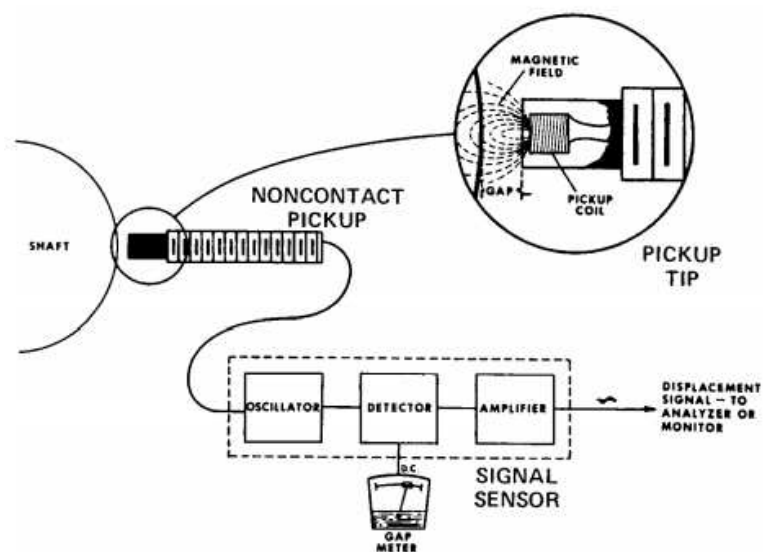
Fonte: Adaptado de Kardec (2002).

### 3.1.1.4. Instrumentos para Medição de Vibrações

#### Sondas de deslocamento

Os sensores de deslocamento são também chamados de sensores de deslocamento sem contato por serem montados com um pequeno espaço entre o mesmo e a superfície do objeto em estudo, pode-se visualizar o funcionamento desse tipo de equipamento conforme a figura 3. Esse tipo de sondas são projetadas para medir o movimento real do eixo de uma máquina em relação a sonda, portanto, esta deve ser montada rigidamente e uma estrutura estacionária para obter dados precisos. Segundo a empresa de tecnologia *Lion Precision* esses aparelhos trabalham com resposta de frequência acima de 10 kHz até 80 kHz e resoluções tão baixas quanto nanômetros, esses sensores indicam a localização instantânea precisa do objeto, mesmo quando ele está se movendo em alta velocidade.

Figura 3 – Diagrama esquemático de um sensor de deslocamento sem contato



Fonte: MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J; (2008).

Como os sensores não estão montados no objeto, eles não alteram a massa do objeto ou suas características ressonantes. Como a saída não é afetada pela frequência da vibração, as medições são mais precisas em todo o espectro de frequências.

A principal limitação desse dispositivo é o seu custo de implementação. Segundo MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J; 2008., o custo típico para instalar uma única sonda, incluindo uma fonte de alimentação, condicionamento de sinal e assim por diante, será em média \$ 1000. Se cada uma máquina em seu programa requer 10 medições, o custo por máquina será de cerca de US \$ 10.000. Considerando os valores atuais de mercado para o cenário brasileiro esses valores estariam por volta dos R\$ 3000 e considerando a mesma lógica, para 10 medições o custo seria de R\$ 30.000 por máquina. Portanto o uso de transdutores de deslocamento para todas as máquinas da fábrica aumentará drasticamente o custo inicial do programa.

### **Transdutores de velocidade**

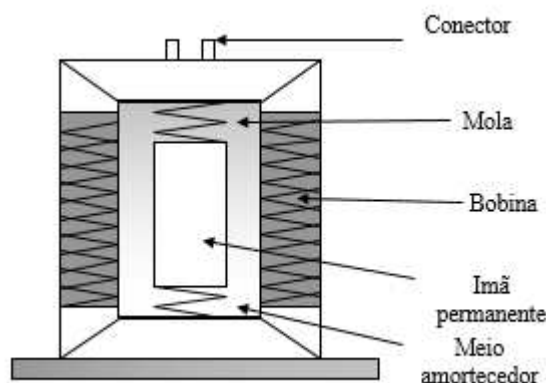
MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008) os transdutores de velocidade são sensores eletromecânicos projetados para monitorar o revestimento ou vibração relativa. Ao contrário da sonda de deslocamento, os transdutores de velocidade medem a taxa de deslocamento, não o movimento real.

Os transdutores de velocidade consistem geralmente de bobinas suspensas em molas. A bobina é deslocada em um campo homogêneo de um ímã permanente através da vibração mecânica. A tensão induzida na bobina é proporcional ao número de interseções de linhas de força por unidade de tempo, ou seja, proporcional a velocidade da bobina. Os dados de velocidade são normalmente expressos em termos de pico de ips e talvez sejam o melhor método de expressar a energia criada pela vibração da máquina.

Esse tipo de transdutores também possuem uma faixa de frequência de trabalho, limitada a 2000 Hz. Possui também limitações quando a sua sensibilidade a danos mecânicos e térmicos, além da necessidade de recalibração local, para evitar distorção dos dados, segundo MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008) no mínimo, os transdutores de velocidade devem ser recalibrados pelo menos a cada 6 meses.

Esses tipos de sensores são muito indicados para baixas frequências devido a sua alta sensibilidade, também possuem a vantagem por possuir alto sinal de saída com resistência interna baixa e sensor ativo sem fonte de alimentação externa. Segue uma ilustração da mesma na figura 4:

Figura 4 – Ilustração esquemática de um transdutor de velocidade.



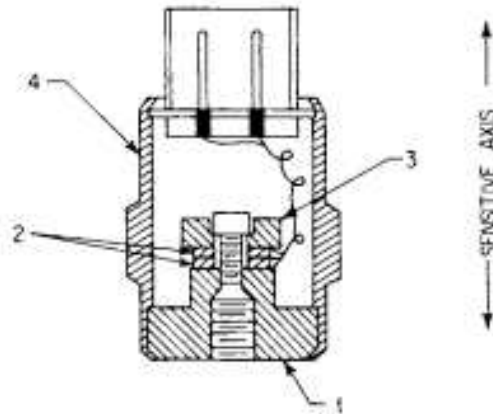
Fonte: Mathias, Mauro H., UNESP (2011).

## Acelerômetros

Acelerômetros são basicamente transdutores de aceleração, na figura 5 e 6 (Pág. 30) vê-se esquemas desses tipos de equipamentos, em geral utilizam um cristal piezoelétrico para converter energia mecânica em sinais elétricos, colocado entre a cobertura da cabeça do sensor e a massa sísmica do sensor. Ao ser submetido a uma aceleração a massa exerce por inércia uma força no cristal e a diferença de potencial que aparece entre os terminais preso ao cristal é proporcional à aceleração medida.

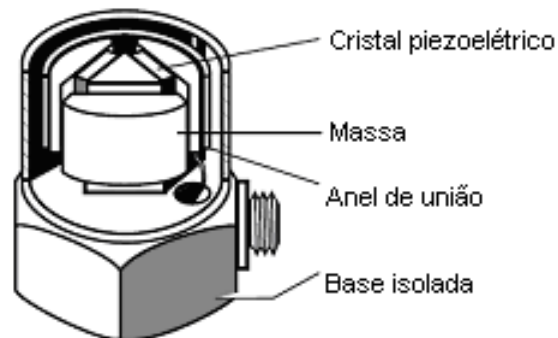
Os sensores de aceleração piezoelétrico medem a aceleração absoluta do movimento, assim os dados adquiridos com este tipo de transdutor são vibração relativa, não deslocamento real, e são expressos em termos de g. Os modernos equipamentos eletrônicos de condicionamento de sinais com auxílio de integradores e diferenciadores permitem avaliar a partir dos acelerômetros os três parâmetros de monitoramento de vibração. Dessa forma os acelerômetros têm talvez o melhor método para determinar a força criada pela vibração da máquina.

Figura 5 – Diagrama esquemático de um acelerômetro. (1) Base, (2) Cristal piezoelétrico, (3) Massa, (4) Capa



Fonte: MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008).

Figura 6 – Esquema de um acelerômetro



Fonte: Mathias, Mauro H., UNESP (2011).

Os acelerômetros possuem uma ampla faixa de frequência de trabalho, o que permite se empregado nos mais diversos projetos, além de ser extremamente compacto. Porém possuem sensor passivo, o que acaba requerendo uma fonte externa de alimentação, possui também baixa sensibilidade na faixa inferior de frequência e é suscetível a danos térmicos, mas com a utilização técnicas de montagem temporária, como o tempo de aquisição de dados é curto, o dano térmico é raro.



### 3.1.1.5. Vantagens e Desvantagens da Análise em Vibrações

A manutenção preditiva vem se destacando desde meados dos anos 90, se mostrando extremamente eficaz, com resultados muito positivos em relação a redução do custo com manutenção, aumento de produtividade, aumento da vida útil dos equipamentos, aumento da qualidade do produto final e conseqüentemente aumento do lucro.

Na análise por vibrações tem-se vantagens como o fato de poder executar o processo de medição sem parar o equipamento/produção, além de alto poder de detecção para os mais diversos modos de falha, além das vantagens que os processos preditivos de modo geral apresentam, Maran (2011) aponta alguns desses principais pontos:

- Eliminação da maioria dos aspectos negativos da manutenção corretiva e preventiva;
- Total integração com o planejamento dos recursos;
- Reforça as ações preventivas/constante avaliação dos riscos;
- Somente são realizados os reparos necessários;
- Reduz as interrupções de funcionamento;
- Reduz o risco de falhas catastróficas;
- Previne e diminui a taxa de falhas;
- Aumenta a vida útil do ativo e diminui seu custo de ciclo de vida;
- Aumenta a capacidade de programação de serviços permitindo melhor aproveitamento de recursos e pessoal;
- Melhora o desempenho/eficiência;
- Diminui perdas de energia e insumos;
- Aumenta a confiabilidade e disponibilidade;
- Aumenta a produtividade;
- Melhora a qualidade dos produtos;
- Reduz os custos com mão de obra e peças;
- Melhor aproveitamento da eficiência geral das instalações.

A manutenção preditiva com análise em vibrações, que consiste em um processo pelo qual as falhas em componentes móveis de um equipamento, são

descobertas pela taxa de variação das forças dinâmicas geradas. Tais forças afetam o nível de vibração, que pode ser avaliado em pontos acessíveis das máquinas, sem interromper o funcionamento dos equipamentos. Todos os componentes comuns, possuem diferentes frequências de vibração, que podem ser isoladas e identificadas, a amplitude de cada componente deverá permanecer constante ao longo do tempo, caso não ocorram, conclui-se que um ou mais componentes começaram a falhar. O quadro 4 apresenta a relação do modo de falha com os métodos de detecção:

Quadro 4 – Modo de falha versus método de detecção

Modo de falha Método de Detecção	Desbalanceamento	Desalinhamento	Rolamento anormal	Mancal anormal	Redução de velocidade anormal	Folgas	características
Pressão				X			Não muda em pequenas falhas
Fluxo				X			Não muda em pequenas falhas
Temperatura		X	X	X			Resposta lenta
Deterioração do óleo			X	X	X		Uso de laboratório
Vibração	X	X	X	X	X	X	Eficaz para muitas causas

Fonte: Adaptado de Stone, Tumer e Van Wie (2005).

As desvantagens apresentadas pela manutenção preditiva por vibrações são de forma simples as que afetam praticamente todo tipo de manutenção preditiva, Maran (2011) aponta os seguintes:

- Necessidade de bom treinamento e certificação para o pessoal técnico;
- Difícil aplicação a ativos com características pouco conhecidas;

- Risco na determinação dos intervalos de inspeção para acompanhamento da evolução de um defeito após sua detecção.
- Oferece riscos à determinação dos parâmetros de alerta, alarme e máximos admissíveis antes da falha;
- Exige muito planejamento de serviços e administração de materiais.

### **3.1.2. Manutenção Preditiva por Análise Térmica**

Temperatura é uma grandeza física escalar de fácil compreensão, a avaliação de variação dessa grandeza pode ser uma poderosa arma para compreender o que está acontecendo com um equipamento, permitindo identificar uma possível alteração, na sua condição como um todo ou apenas de alguns componentes, que afetariam sua capacidade de trabalho.

Portanto a Termografia surge como uma importante técnica de inspeção que possibilita o monitoramento do equipamento fornecendo dados para uma análise de tendência através do espectro infravermelho produzido pelo mesmo, conhecido como termograma, que consiste em imagens térmicas da máquina ou de seus componentes específicos.

A termografia é a técnica preditiva que permite o acompanhamento de temperaturas e a formação de imagens térmicas, conhecidas por termogramas (Kardec; Nascif, 2009).

#### **3.1.2.1. Fontes de defeito em análises termográficas**

O termograma apresenta os espectros de temperatura do equipamento estudado, de modo geral quando a temperatura sai da faixa de trabalho definida como ideal, sabe-se que aquele componente está apresentando algum defeito. Dessa forma quando se faz esse tipo de análise para manutenção comumente se encontra as seguintes fontes de falha:

### **Frouidão mecânica**

Frouidão mecânica. Afrouxamento mecânico ocorre com mais frequência. Uma conexão frouxa resultará em fadiga por estresse térmico devido ao uso excessivo. Clipes de fusível são um bom exemplo, o aquecimento e resfriamento constantes criam uma conexão ruim. Uma medição precisa de temperatura ou o uso de uma isotérmica identificará uma condição frouxa. Quando a isotérmica é reduzida a um único pixel, ou temperatura, ela identifica a origem da condição solta. Falha de componente. (MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J; 2008)

### **Problemas de carga**

O excesso de carga sobre determinado componente ou máquina pode gerar sobre carga de trabalho ou estresse térmico causando também dessa forma uma avaria ao componente em estudo.

### **Falha de componente**

Compreender a nomenclatura do problema pode identificar falha de componente. Especificamente, o componente real será a fonte de calor. Por exemplo, um fusível estressado pelo calor em uma montagem trifásica parecerá mais quente do que os outros dois. (MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J; 2008)

#### **3.1.2.2. Método do Estudo**

Segundo Albuquerque; Fortes; de Souza (2011) a técnica da termografia, nos aspectos que se referem ao calor incidente sobre o equipamento termográfico, toma por base os fenômenos da emissão e da propagação da energia fotônica radiante, correspondente à faixa infravermelha (IV) do espectro eletromagnético (da ordem de 0,8 a 1000  $\mu\text{m}$ ), naturalmente emitida pelos corpos, e o processo de sua detecção.

No processo termográfico, após se propagar, esta energia radiante é detectada por dispositivo transdutor (fotocondutivo, fotovoltaico ou térmico), sensível a comprimentos de onda nessa faixa: o detector de IV. Sinal elétrico é gerado por este dispositivo (em decorrência da radiação incidente), sendo em seguida eletronicamente

processado para a obtenção das imagens térmicas ou os registros digitais de temperatura.

Para essa análise da emissão de calor considera-se que o todo corpo está acima do zero absoluto (- 273 °C). É sabido que o valor da energia do fóton emitido é função inversa do comprimento de onda da radiação eletromagnética, já a temperatura em K da superfície emissora tem relação direta com o mesmo comprimento de onda de máxima emissão. Tem-se então, na equação 7, a lei do deslocamento de Wien para um corpo negro:

$$\lambda_{\text{máx}} T = \frac{h \cdot c}{4965 \cdot k} = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{k} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$\lambda_{\text{máx}}$  = comprimento de onda correspondente à radiância espectral máxima;

h = constante de Planck ( $6,625 \times 10^{-34}$  J.s)

c = velocidade da luz no vácuo;

k = constante de Boltzmann ( $1,3806503 \times 10^{-23}$  J . K<sup>-1</sup>);

T = temperatura do corpo negro, em K.

Podemos concluir através dessa lei que a radiância espectral máxima se dá com o aumento da temperatura e com comprimentos de onda progressivamente mais curtos. Também deve-se pontuar a equação que define a energia total radiada para um corpo negro, dada pela lei de Stefan-Boltzmann, sendo ela (Equação 8):

$$e = \sigma \cdot T^4 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

e = Valor da radiância total;

$\sigma$  = constante de Stefan ( $5,67 \times 10^{-8}$  W. m<sup>-2</sup>);

T = temperatura do corpo negro, em K.

Outros parâmetros também de suma importância para o entendimento do processo de análises termográficas citado por Albuquerque; Fortes; de Souza (2011) são:

### Temperatura do objeto emissor:

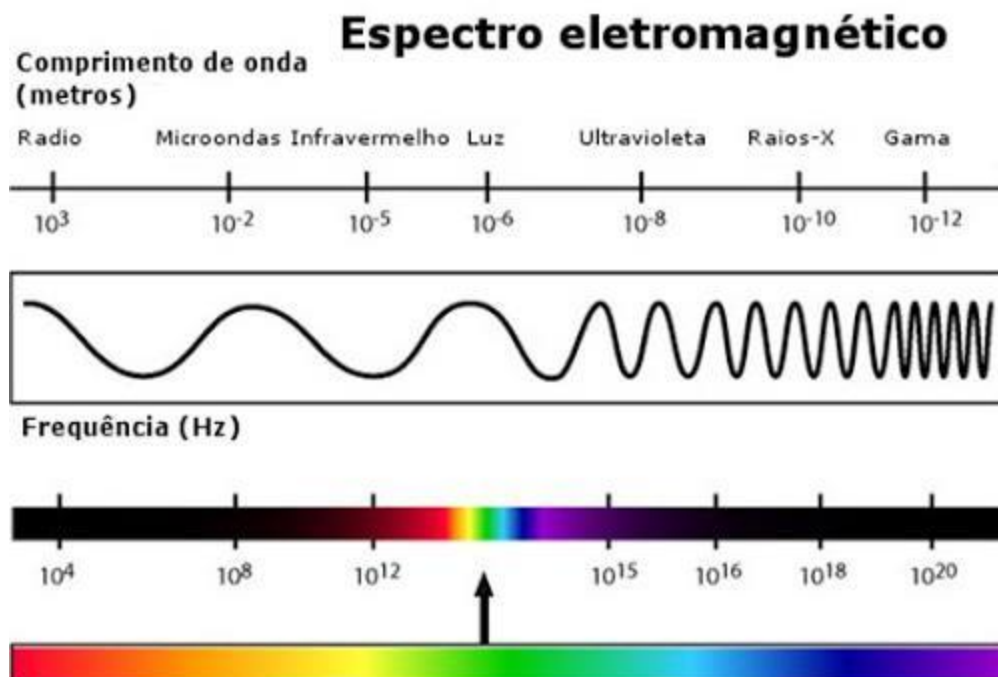
Parâmetro que mede indiretamente a energia cinética média dos átomos e moléculas. Sempre que existir gradiente de temperatura no interior de um sistema, haverá transferência de energia no sentido das mais altas para as mais baixas temperaturas.

### Emissividade do objeto emissor:

É um índice relativo à energia radiada de um objeto; para uma dada temperatura, é definida pela relação entre a emitância radiante do corpo considerado e a emitância radiante do corpo negro. O valor da emissividade é função direta da natureza do material, em sua superfície, e da sua temperatura.

Todo objeto quando aquecido emite energia eletromagnética, dessa forma quanto maior for a temperatura do mesmo mais energia ele emite, essa pode ser representada dentro de um espectro, que consiste em um conjunto contendo todas formas de energia irradiada, indo das ondas de rádio até os raios gama, conforme a figura 7:

Figura 7 – Representação do espectro eletromagnético



Fonte: Retirado do StoaWiki – USP (2021).

O ponto mais alto da onda é chamado de crista e o mais baixo é conhecido como vale. A distância entre as cristas ou entre os vales é chamada de comprimento de onda e a frequência é o número de cristas ou vales que passam por um determinado ponto por segundo. Conforme a frequência da onda aumenta, o comprimento de onda diminui e quanto mais curto o mesmo for mais energia é contida.

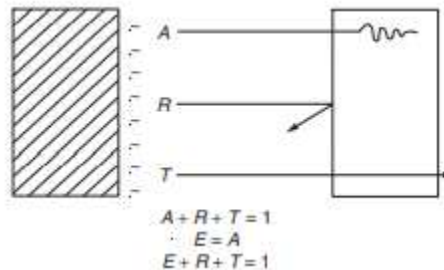
Um exemplo citado por MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008): uma placa de aço que sai do forno quente terá comprimentos de onda curtos, você pode sentir o calor e ver o brilho vermelho da laje. Os comprimentos de onda tornaram-se mais curtos de crista a crista e a energia emitida aumentou, entrando na faixa visível do espectro. Por outro lado, (energia infravermelha) quando a bobina é resfriada existe uma perda de energia dessa forma comprimento de onda aumentou de crista a crista e diminuiu em frequência.

### **3.1.2.3. Técnicas de Medição**

Para se realizar a medição da temperatura do equipamento se utiliza da tecnologia infravermelha que se baseia no fato apresentado de que todos os objetos, considerando temperatura acima do zero absoluto, emitem radiação ou energia. E através dessa radiação emitida pelos componentes e com os instrumentos corretos pode ser observado esses espectros de temperaturas.

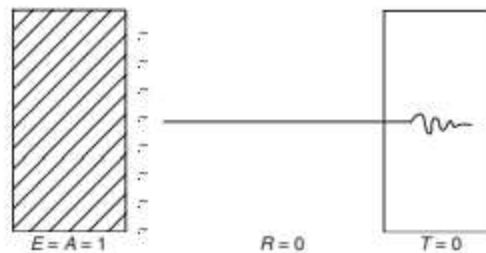
Alguns fatores podem influenciar na medição, como as condições da superfície (pinturas ou revestimentos), as condições ambientais ao redor, sendo vapor d'água, poeira no ar, além da iluminação e outros fatores atmosféricos. Todos esses fatores podem distorcer a radiação infravermelho medido pelo equipamento. Os conceitos de emissão infravermelha para diferentes corpos pode ser melhor compreendido nas figuras 8, 9 e 10:

Figura 8 – Emissões de energia. Todos os corpos emitem energia dentro da banda infravermelha. Isso fornece a base para imagens infravermelhas ou termografia. A = energia absorvida. R = energia refletida. T = energia transmitida. E = energia emitida



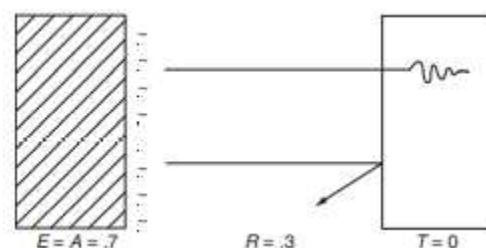
Fonte: MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008).

Figura 9 – Emissões de corpo negro. Um corpo perfeito ou negro absorve toda a energia infravermelha. A = energia absorvida. R = energia refletida. T = energia transmitida. E = energia emitida



Fonte: MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008).

Figura 10 – Emissões de corpo cinza. Todos os corpos que não são corpos negros irão emitir alguma quantidade de energia infravermelha. A emissividade de cada máquina deve ser conhecida antes de implementar um programa termográfico. A = energia absorvida. R = energia refletida. T = energia transmitida. E = energia emitida

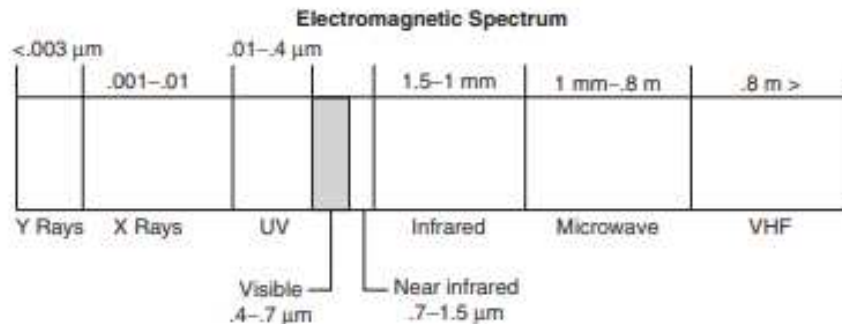


Fonte: MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008).



O olho humano é incapaz de ver a luz da energia infravermelha, portanto para realizar um estudo dessa natureza é necessário processar essas imagens digitalmente transformando-as em termogramas, onde cada pixel tem um valor de temperatura de acordo com uma escala, detectando dessa forma temperaturas anormais que indicam um problema no equipamento. Essas medições podem ocorrer sem a interrupção da operação/produção, com tais informações colhidas pode-se planejar o reparo do equipamento. Na figura 11 podemos observar o espectro eletromagnético e a faixa perceptível pelo olho humano:

Figura 11 – Espectro eletromagnético



Fonte: MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008)

Para a representação dos comprimentos de onda relativo ao espectro emitido que são usados no estudo termográfico, são utilizados níveis de cinza ou de cores. Tanto na escala de cinza, também chamada de monocromática, quanto na escala de cores, policromática, a cor preta é associada a região mais “fria” e a cor branca a região mais “quente”. Como pode ser visto na Figura 7:

Figura 12 – Imagens térmicas policromática e monocromática respectivamente



Fonte: Retirado e adaptado do site instrutemp (2021).

Óticas de coleta, detectores de radiação e alguma forma de indicador são os elementos básicos de um instrumento infravermelho industrial. O sistema óptico coleta a energia radiante e a concentra em um detector, que a converte em um sinal elétrico. A eletrônica do instrumento amplifica o sinal de saída e o processa em uma forma que pode ser exibida.

#### 3.1.2.4. Instrumentos para Medição de Temperatura

Os instrumentos de medição convertem a energia infravermelha emitida em uma informação mais palpável, podendo ser a temperatura pontual de uma superfície ou uma imagem. Esses instrumentos fornecem alguns filtros especiais que tem como objetivo atenuar os impactos que o ambiente pode gerar sobre os dados. No entanto, o usuário deve reconhecer os fatores ambientais que poderão afetar a precisão no aferimento dos dados, podendo assim tomar as atitudes necessárias para reduzir o impacto delas na análise final. Segundo o MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008) de modo geral existem três tipos de instrumentos que podem ser usados para manutenção preditiva: termômetros infravermelhos ou radiômetros pontuais, scanners de linha e sistemas de imagem.

### **Termômetros infravermelhos.**

Os termômetros infravermelhos ou radiômetros pontuais, também chamado de pirômetros infravermelhos são projetados para fornecer a temperatura real da superfície em um único ponto relativamente pequeno em uma máquina ou superfície, esse termômetro consegue medir altas temperaturas de um corpo ou do meio, sem estar em contato com ele. Por isso, esses termômetros infravermelhos representam o equipamento mais seguro que existe para a medição de objetos muito quentes, que não podem ser encostados ou que são de difícil acesso ou estão em movimento.

MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008) cita que dentro de um programa de manutenção preditiva, o termômetro infravermelho de ponto de uso pode ser usado em conjunto com muitos dos instrumentos de vibração baseados em microprocessador para monitorar a temperatura em pontos críticos em máquinas ou equipamentos da fábrica. Esta técnica é normalmente usada para monitorar as temperaturas da tampa do mancal, temperaturas do enrolamento do motor, verificações pontuais das temperaturas da tubulação do processo e aplicações semelhantes. É limitado porque a temperatura representa um único ponto na máquina ou estrutura. No entanto, quando usados em conjunto com os dados de vibração, os dados infravermelhos do ponto de uso podem ser uma ferramenta valiosa.

### **Scanners de linha**

“Este tipo de instrumento infravermelho fornece uma varredura unidimensional ou linha de radiação comparativa. Embora esse tipo de instrumento forneça um campo de visão um pouco maior, ou seja, área da superfície da máquina, ele é limitado em aplicações de manutenção preditiva”. MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008)

### **Termovisor (Sistema de Imagem)**

Da mesma forma que o termômetro esse tipo de dispositivo fornece a temperatura de uma superfície sem entrar em contato com a mesma, porém o usuário pode visualizar o perfil de emissão térmica de uma ampla área simplesmente olhando

através da ótica do instrumento que converte a emissão de radiação infravermelha em um termograma.

Há uma variedade de instrumentos de imagem térmica no mercado, desde scanners relativamente baratos, em preto e branco, até sistemas totalmente coloridos baseados em microprocessador. Dessa forma existem aparelho mais baratos que apenas produzem o termograma em tempo real e não oferecem a capacidade de armazenar e recuperar imagens térmicas. Essa incapacidade de armazenar e recuperar dados térmicos anteriores limitará um programa de manutenção preditiva de longo prazo.

A aplicação dos aparelhos varia de acordo com a necessidade do usuário, o termômetro é mais limitado e conseqüentemente mais barato, mas pode ser uma excelente arma de manutenção preditiva para auxiliar outros processos mais complexos, já o termovisor é um equipamento completo para manutenção termográfica, mais caro, com grandes variações em seu preço, podendo ir de um com escala monocromática e sem armazenamento interno de dados para um policromático dotado de processadores mais eficazes e com um armazenamento e pré-processamento dos dados.

Vale ressaltar também que para o uso desses equipamentos é necessário um conhecimento prévio, tanto para interpretar seus dados, quanto para preparar os filtros que reduzirão o impacto do ambiente nas leituras e entender quando os mesmos foram prejudicados por não representar com fidelidade a realidade.

Segundo o MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008) a inclusão da termografia em um programa de manutenção preditiva permitirá que você monitore a eficiência térmica de sistemas de processos críticos que dependem de transferência ou retenção de calor; equipamento elétrico; e outros parâmetros que irão melhorar a confiabilidade e eficiência dos sistemas da planta. As técnicas de infravermelho podem ser usadas para detectar problemas em uma variedade de sistemas e equipamentos da planta, incluindo aparelhagem elétrica, caixas de engrenagens, subestações elétricas, transmissões, painéis de disjuntores, motores, envelopes de edifícios, rolamentos, linhas de vapor e sistemas de processo que dependem de retenção ou transferência calor.

### **3.1.2.5. Vantagens e Desvantagens da Análise Termográfica**

No que se referem suas vantagens, a termografia infravermelha permite uma exploração aprofundada e menos subjetiva dos sujeitos e objetos de estudo, possibilitando a identificação de um quadro visual para comparação de temperaturas, bem como a capacidade da identificação de deteriorações nos produtos por meio de componentes aquecidos (SILVA; TARALLI; MELZ, 2015).

Além disso, o método de análise termográfica caracteriza-se por ser não destrutivo, passivo e sem contato direto com o equipamento em estudo por meio da radiação infravermelha emitida pelas superfícies. De acordo com Silva, Taralli e Melz (2015), a técnica permite a detecção de defeitos em materiais e possui compatibilidade com diversos softwares para a interpretação das imagens.

Para Silva (2017) o uso da termografia infravermelha nos setores industriais apresenta muitas vantagens, destacando a possibilidade de detecção rápida de problemas, aumento dos rendimentos e da segurança dos sistemas, a redução dos custos de manutenção, custos operacionais e associados à imprevistos. A termografia pode auxiliar no diagnóstico do mau uso de materiais e peças, falhas de projeto, componente tendendo a avaria ou fora da condição ideal de trabalho.

Quanto às desvantagens da termografia infravermelha, Silva, Taralli e Melz (2015) destacam a limitação da detecção de apenas temperaturas superficiais, as interferências das condições do ambiente nas medições, bem como a dificuldade na interpretação das imagens de determinados materiais devido sua emissividade. Altos valores de implementação, treinamento especializado e limitações quando desrespeito a algumas falhas também são algumas desvantagens que podemos citar.

Silva (2017) corrobora com as desvantagens citadas destacando a necessidade do envolvimento de profissionais capacitados nos projetos, com conhecimentos técnicos específicos sobre o uso desta tecnologia.

### **3.1.3. Manutenção Preditiva por Análise Tribológica**

Segundo a definição do dicionário tribologia vem do grego Τριβο (Tribo - esfregar) e Λογος (Logos - estudo) é uma subárea da física cujo objeto de estudo é o

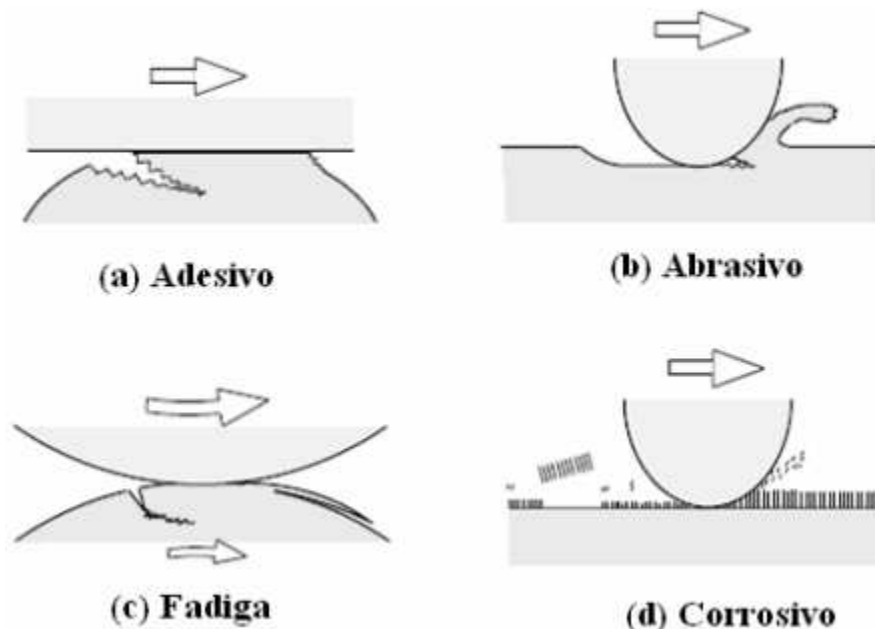
fenômeno do atrito e suas implicações, especialmente em relação à seleção de lubrificantes ou à aplicação de lubrificação para reduzir seus efeitos.

A tribologia reúne os conhecimentos adquiridos na física, na química, na mecânica e na ciência dos materiais para explicar e prever o comportamento de sistemas físicos que são utilizados em sistemas mecânicos. O que unifica a tribologia não são os conhecimentos básicos, mas sim a área de aplicação. Assim como os campos do conhecimento que formam a tribologia existiam antes dela, os estudos dos fenômenos de lubrificação, atrito e desgaste antecedem muito a 1966. (Sinatora, 2005).

### 3.1.3.1. Fontes de defeito em análises Tribológicas

A tribologia tem o desgaste como uma das partes principais do seu estudo, podemos assim citar quatro modos de se desgastar um equipamento mostrados na figura 13:

Figura 13 – Representação dos quatro modos de desgaste



Fonte: RADY, POLYANA A.; SANTOS, LÚCIA V.; BONETTI, LUIZ F.; TRAVA-AIROLDI, VLADIMIR J. (2007).

Podemos ainda descrever melhor os quatro modos de desgaste da seguinte forma:

**Desgaste adesivo (a)** – É o desgaste gerado devido à ligação das superfícies dos sólidos em contato que levam a transferência de material entre as mesmas. Essa ligação promove uma deformação plástica na região de contato gerando uma trinca que pode se propagar levando à geração de um terceiro corpo.

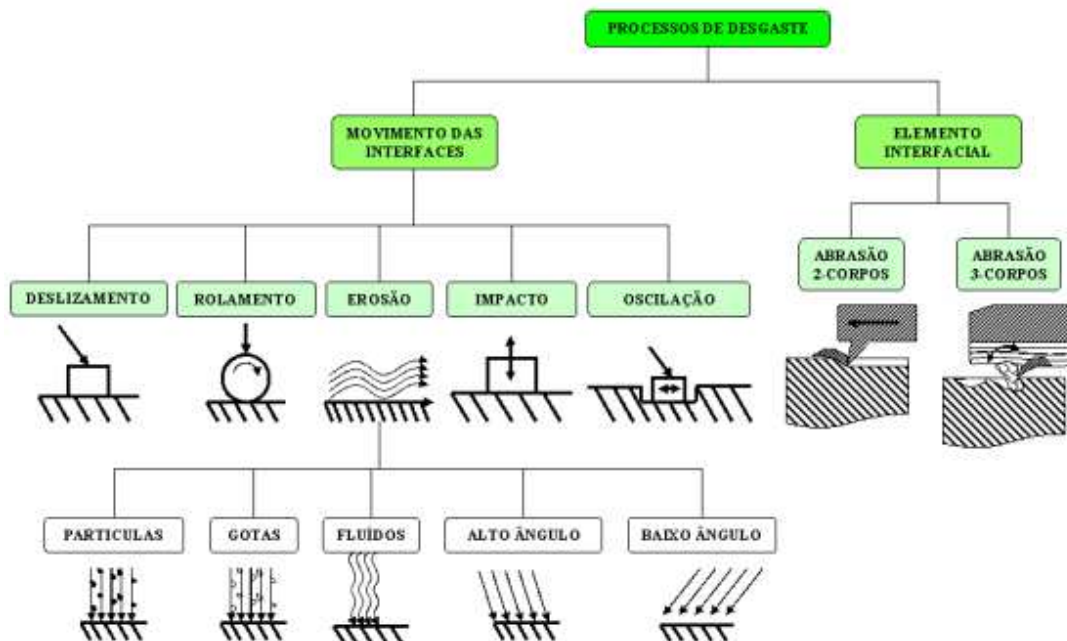
**Desgaste abrasivo (b)** – É o desgaste devido às partículas duras presentes na superfície, como o carboneto de silício e o óxido de alumínio, ou contaminantes que ocorrem naturalmente, como partículas de poeira e areia.

**Desgaste por fadiga (c)** – É o desgaste promovido pela repetição de movimentos. As descontinuidades geram pontos de tensão, fazendo com que a área carregue e descarregue ciclicamente, deformando plasticamente a superfície de um lado para o outro, levando à formação de fissuras sob a superfície estressada. À medida que as rachaduras propagam a superfície, pode ocorrer deterioração, desprendimento e picadas, destruindo a peça.

**Desgaste corrosivo (d)** – É o desgaste gerado pelas interações químicas e eletroquímicas entre a superfície do componente com um meio corrosivo, líquido ou gasoso, produzindo uma intercamada na superfície que depois é removida.

Os modos de desgaste podem ocorrer através de diversos mecanismos. Os mecanismos de desgaste são descritos pelas considerações de mudanças complexas na superfície durante o movimento. Em geral, o desgaste ocorre através de mais de um modo, portanto a compreensão de cada mecanismo de desgaste em cada modo se torna importante. (RADI, POLYANA A.; SANTOS, LÚCIA V.; BONETTI, LUIZ F.; TRAVA-AIROLDI, VLADIMIR J.; 2007). A figura a seguir pode exemplificar estes mecanismos. A Figura 14 apresenta um diagrama dos processos de desgaste:

Figura 14 – Diagrama dos processos de desgaste em função do elemento interfacial e do tipo de movimento das interfaces



Fonte: RADI, POLYANA A.; SANTOS, LÚCIA V.; BONETTI, LUIZ F.; TRAVA-AIROLDI, VLADIMIR J. (2007).

### 3.1.3.2. Método de Estudo

Para uma análise tribológica várias técnicas podem ser usadas para se desenvolver um plano de manutenção preditiva. Análise de partículas de desgaste, análise de óleo lubrificante, análise espectrográfica e Ferrografia.

#### Análise de óleo lubrificante

A análise de óleo sempre foi usada para construção de planos de manutenção, sendo muito conhecido na preventiva, também passou a ser muito usada para planos preditivos, porém deve se ter a consciência de suas limitações, esse método não pode substituir a análise por vibrações ou termográfica. Deve-se limitar a estender a vida útil ou evitar a troca prematura do lubrificante, coletando em intervalos programados uma amostra do óleo e determinando assim a condição da película lubrificante que é crítica para operação do equipamento. Para esse tipo de análise várias propriedades



do óleo são verificadas, o MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008) cita alguns:

**Viscosidade** - Esta é uma das propriedades mais importantes de um óleo lubrificante. A viscosidade real das amostras de óleo é comparada com uma amostra não usada para determinar o afinamento ou espessamento da amostra durante o uso.

**Contaminação** - A contaminação do óleo pela água ou refrigerante pode causar grandes problemas em um sistema de lubrificação.

**Diluição de Combustível** - A diluição do óleo em um motor enfraquece a força do filme de óleo, a capacidade de vedação e a detergência.

**Partículas sólidas** - Este é um teste geral. Todos os materiais sólidos no óleo são medidos como uma porcentagem do volume ou peso da amostra.

**Fuligem de Combustível** - Um indicador importante para o óleo usado em motores a diesel, a fuligem de combustível está sempre presente em certa medida.

**Oxidação** - A oxidação do óleo lubrificante pode resultar em depósitos de verniz, corrosão do metal ou espessamento do óleo. A maioria dos lubrificantes contém inibidores de oxidação.

**Nitração** - Combustão de combustível em motores resulta da nitração. Os produtos formados são altamente ácidos e podem deixar depósitos em áreas de combustão.

**Número total de ácido** - Esta é uma medida da quantidade de ácido ou material ácido na amostra de óleo.

**Número Base Total** - Este número indica a capacidade de um óleo para neutralizar a acidez.

**Contagem de Partículas** - Testes de contagem de partículas são importantes para antecipar problemas potenciais do sistema ou da máquina. Isto é especialmente

verdadeiro em sistemas hidráulicos. A análise da contagem de partículas que faz parte de uma análise normal de óleo lubrificante é bastante diferente da análise de partículas de desgaste.

### **A análise espectrográfica**

A análise espectrográfica permite identificar os elementos presentes no óleo lubrificante, esses geralmente são metais de desgastes, contaminantes ou aditivos, alguns podem ter mais de uma dessas classificações. É uma ferramenta que proporciona o melhor momento para a manutenção do equipamento. Segundo KIMURA, ROGÉRIO K. (2010) os métodos de análise espectrográfica incluem a absorção atômica, espectrografia de emissão atômica, plasma induzido por emissão, raio X por fluorescência.

A configuração mais estável de um átomo é seu estado fundamental, se uma quantidade de energia for aplicada sobre o mesmo e esse absorver ele irá para um estado mais instável denominado excitado, que dura pouco tempo, retornando assim ao seu estado estável, liberando energia absorvida nesse processo na forma de luz. E são esses dois processos, absorção e emissão, que são utilizados para o estudo, denominados técnica de emissão atômica e absorção atômica.

### **Ferrografia**

O termo ferrografia foi introduzido na década de 1970 pelos inventores Seiffert e Westcott que necessitavam na época de uma melhoria da análise de óleo lubrificante dos motores aeronavais. Até então, usava-se o método usual de quantificar a concentração de material particulado, no qual as partículas eram depositadas em filtro de papel e observadas em microscópio. Assim, tornava-se difícil observar a morfologia e as dimensões das partículas. (KIMURA, ROGÉRIO K., 2010)

Essa técnica se assemelha muito com a espectrográfica, se diferencia pelo fato da Ferrografia se utilizar de um campo magnético para separar as partículas de contaminação e por esse mesmo fato se limita a elementos particulados ferrosos ou magnéticos. Essa técnica pode capturar partículas de até 100 µm e, portanto, fornece uma melhor representação da contaminação total do óleo do que a técnica espectrográfica.

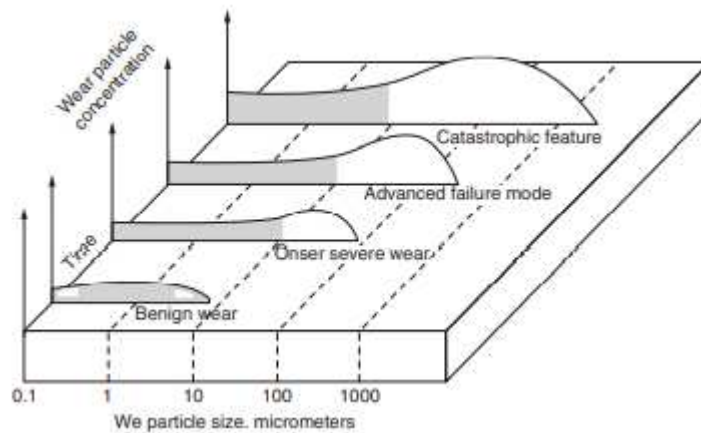
## **Análise de partículas de desgaste**

A análise de partículas de desgaste também é feita a partir da coleta do óleo lubrificante, mas a relação com óleo se restringe apenas ao meio em que estão as partículas, não levando em consideração o lubrificante, que em sua análise meramente determina sua própria condição, mas sim os elementos de desgaste que fornecem informações diretas sobre a condição de desgaste do equipamento. Essas informações são obtidas através da avaliação de sua forma, composição, tamanho e quantidade de partículas, sendo realizada em dois estágios de estudo.

O primeiro método se trata de monitorar a tendência e a rotina dos sólidos no lubrificante, avaliando sua quantidade, composição e tamanho. Para se ter um parâmetro de comparação, uma máquina norma conterá níveis baixos de material particulado com um tamanho inferior a 10  $\mu\text{m}$ . Conforme a máquina se degrada e aproxima de uma avaria, o tamanho e o número de material particulado aumenta.

O segundo método consiste em analisar as partículas de desgaste em cada amostra de óleo lubrificantes, através desse método cinco tipos de desgaste podem ser identificados: desgaste por fricção, desgaste por corte, desgaste por fadiga de rolamento, desgaste combinado de rolamento e deslizamento e desgaste por deslizamento severo. Esse método é limitado ao tamanho do material particulado, já que apenas o desgaste por fricção gera partículas predominantemente menores que 15  $\mu\text{m}$  e a análise espectrográfica é limitada ao tamanho de 10  $\mu\text{m}$ , contaminantes maiores que isso são ignorados. A relação do tamanho e da quantidade de particulados com a gravidade do desgaste pode ser visto na figura 15:

Figura 15 – Diagrama que demonstra relação da concentração de particulados e do tamanho das mesmas com a gravidade do desgaste do equipamento



Fonte: MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008).

### 3.1.3.3. Técnicas de Medição

#### Análise de óleo lubrificante

Para se executar a medição dos parâmetros que definem a condição do óleo lubrificante são recolhidas amostras de forma recorrente, definida pelo plano, de acordo com a necessidade e uso da linha de produção. Com as amostras em mãos são avaliadas as propriedades já citadas da seguinte forma:

**Viscosidade** - A viscosidade excessivamente baixa reduzirá a resistência do filme de óleo, enfraquecendo sua capacidade de impedir o contato metal-metal. Uma viscosidade excessivamente alta pode impedir o fluxo de óleo para locais vitais na estrutura de suporte do rolamento, reduzindo sua capacidade de lubrificação

**Contaminação** - Muitos dos aditivos agora usados na formulação de lubrificantes contêm os mesmos elementos usados nos aditivos de refrigeração. Portanto, o laboratório deve ter uma análise precisa do novo óleo para comparação.

**Diluição de Combustível** - Podem ser causados por operação incorreta, vazamentos no sistema de combustível, problemas de ignição, temporização inadequada ou outras

deficiências. A diluição do combustível é considerada excessiva quando atinge um nível de 2,5 a 5%.

**Partículas sólidas** - A presença de sólidos em um sistema de lubrificação pode aumentar significativamente o desgaste das peças lubrificadas. Qualquer aumento inesperado nos sólidos relatados é motivo de preocupação.

**Fuligem de Combustível** - Um teste para medir a fuligem de combustível no óleo do motor a diesel é importante, pois indica a eficiência de queima de combustível do motor. A maioria dos testes de fuligem de combustível é realizada por análise de infravermelho.

**Oxidação** - Quando os aditivos são usados, a oxidação do próprio óleo começa. A quantidade de oxidação em uma amostra de óleo é medida por análise diferencial de infravermelho.

**Nitração** - A nitração acelerará a oxidação do óleo. A análise infravermelha é usada para detectar e medir produtos de nitração.

**Número total de ácido** - Como os óleos novos contêm aditivos que afetam o número total de ácidos (TAN), é importante comparar as amostras de óleo usadas com óleo novo, não usados, do mesmo tipo. Análises regulares em intervalos específicos são importantes para essa avaliação.

**Número Base Total** - Quanto maior o número total de bases (TBN), maior a capacidade de neutralizar a acidez. Causas típicas de baixo TBN incluem o uso do óleo inadequado para uma aplicação, esperando muito tempo entre trocas de óleo, superaquecimento e uso de combustível com alto teor de enxofre.

**Contagem de Partículas** - Neste teste, altas contagens de partículas indicam que o maquinário pode estar sendo usado anormalmente ou que falhas podem ocorrer como resultado de orifícios bloqueados temporária ou permanentemente. Nenhuma tentativa é feita para determinar os padrões de desgaste, tamanho e outros fatores que identificariam o modo de falha dentro da máquina.

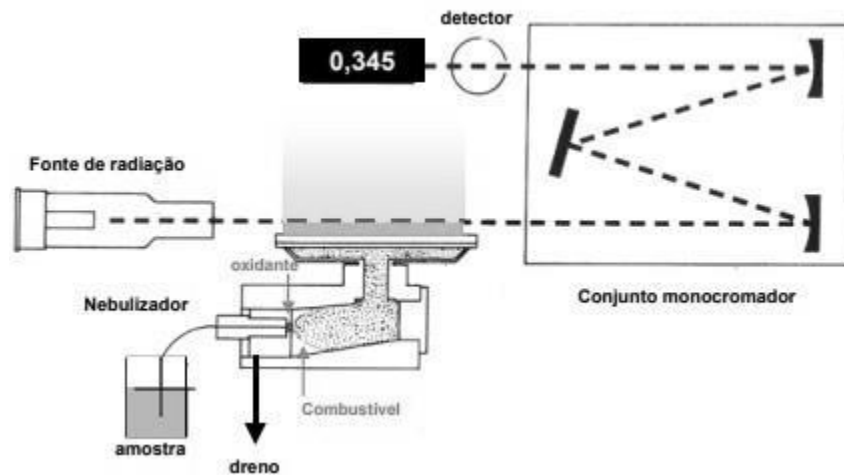
## **A análise espectrográfica**

De modo geral os instrumentos usados para realizar a análise espectrográfica fazem a medição, segundo KIMURA, ROGÉRIO K. (2010), através cinco componentes básicos:

1. A fonte de luz, que emite o espectro do elemento de interesse;
2. A “célula de absorção”, na qual os átomos da amostra são produzidos;
3. O monocromador, para a dispersão da luz e seleção do comprimento de onda a ser utilizado;
4. O detector, que mede a intensidade de luz, transforma este sinal luminoso em um sinal elétrico e o amplifica;
5. Um display que registra e mostra a leitura depois do sinal ser processado.

Também segundo KIMURA, ROGÉRIO K. (2010) a fonte de luz emite o espectro específico do elemento da qual é feita, que é focalizado através da célula e do monocromador, a mesma deve ser modulada para diferenciar a luz proveniente da própria fonte daquela proveniente da emissão da chama. O monocromador separa a luz em seus diferentes comprimentos de onda, isolando um comprimento de onda específico para alcançar o detector que, na maioria das vezes, é uma fotomultiplicadora. Esse comprimento de onda produz no detector uma corrente elétrica que é proporcional a intensidade de luz, conforme a pode ser visto na figura 16:

Figura 16 – Esquema de espectrômetro de absorção atômica



Fonte: Disponível em < <https://www.ufjf.br/baccan/files/2011/05/AAS-geral-parte-1-revisada.pdf> > (acessado em 2021).

## Ferrografia

Existe duas formas de realizar a medição através da ferrografia, a quantitativa e analítica. A técnica quantitativa se utiliza de um ferrógrafo (Figura 17) que determina as concentrações e permite uma análise de tendência, através de uma amostra exposta a fontes de luz de uma fibra ótica e se utilizando de um gradiente magnético, identificando assim o material particulado e dividindo-o em partículas grande ( $L > 5 \mu\text{m}$ ) e pequenas ( $S < 5 \mu\text{m}$ ), onde a concentração total (Equação 9) e modo de desgaste (Equação 10) é definida como:

$$C_t = L + S \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

L = Partículas grandes

S = Partículas pequenas

$$PLP = [(L - S)/(L + S)] * 100 \quad \text{Equação 10}$$

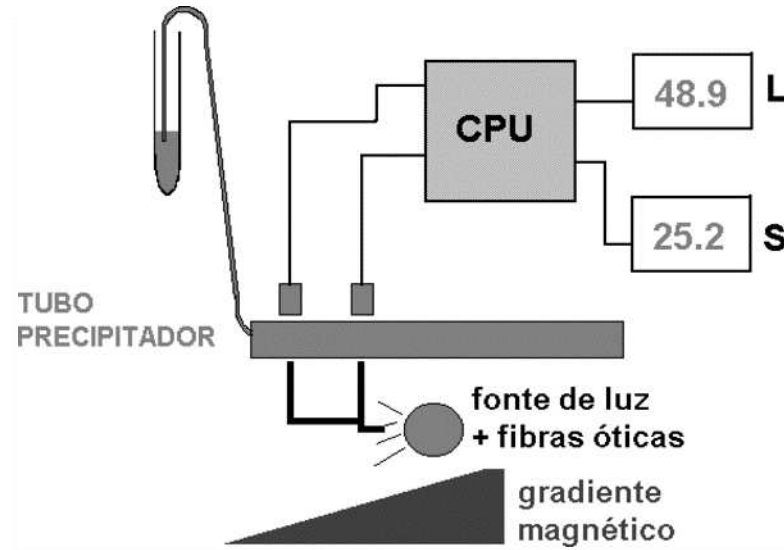
Onde:

PLP = Modo de desgaste

L = Partículas grandes

S = Partículas pequenas

Figura 17 – Esquema de ferrógrafo quantitativo



Fonte: KIMURA, ROGÉRIO K. (2010).

O procedimento de ferrografia analítica é mais detalhado, nessa técnica uma amostra é colocada em uma placa de vidro, de um ferrógrafo (Figura 18), em um plano inclinado e submetida a um campo magnético, onde as partículas são separadas de acordo com seu tamanho e material. Ao final uma inspeção por microscopia ótica é realizado, a fim de interpretar os resultados e correlaciona-los ao tipo de desgaste. Assim sendo possível tomar as decisões de manutenção.



Figura 18 – Ferrógrafo e microscópio respectivamente, utilizados para análise por ferrografia analítica



Fonte: Retira do site da *directindustry*

<<https://www.directindustry.com/pt/prod/spectro-scientific/product-153083-1579924.html>> (acessado em 2021).

### **Análise de partículas de desgaste**

Para se medir e avaliar as partículas de desgastes podemos utilizar de três técnicas, usualmente se usa um combinado delas, sendo:

**Monitoramento em Linha** – Nessa técnica são utilizados imãs, bobinas indutivas ou medidores de pressão diferencial no sistema de circulação do óleo, essas extraem partículas ferromagnéticas da corrente, dessa forma não sendo eficaz para partículas não magnéticas. Para isso são usados medidores de pressão nos filtros em linha, que

são usados para monitorar a quantidade de sólidos, removendo-os da corrente, magnéticas e não magnéticas. No entanto o tamanho do material particulado depende da classificação do filtro. Normalmente esse método não fornece uma análise completa das partículas.

**Monitoramento On-line** – Como o monitoramento em linha essa técnica não define a causa raiz do problema, sendo limitado a uma aproximação da concentração de particulados sólidos. Esse método usa uma porção do óleo lubrificante combinada com dispositivos óticos que medem a turbidez do mesmo, indicando assim a concentração de partículas.

**Monitoramento Off-line** – Diferente dos dois anteriores essa técnica é capaz de fornecer uma análise definitiva das partículas de desgaste. Extraindo amostras do volume do óleo e sendo enviado para uma avaliação laboratorial.

O quadro 5 apresenta as prováveis fontes de partículas de desgaste de acordo com o material:

Quadro 5 – Fontes de materiais encontrados na análise de partículas de desgaste

<b>Material</b>	<b>Provável fonte</b>	<b>Material</b>	<b>Provável fonte</b>
Alumínio	Pistões de liga leve Rolamentos do virabrequim A peça de fundição	Chumbo	Rolamentos lisos
Antimônio	Rolamentos lisos de metal branco	Magnésio	Desgaste de componentes plásticos com cargas de talco Intrusão de água do mar
Boro	Vazamentos de refrigerante Aditivos do óleo	Níquel	Assento das válvulas Ligas de aço
Cromo	Anéis de pistão Forros de cilindro Assento das válvulas	Silício	Intrusão de poeira mineral
Cobalto	Assento das válvulas Revestimentos duros	Prata	Superfícies de rolamento de prata Fricção de juntas de solda de prata

Cobre	Rolamentos de cobre-chumbo ou bronze Armação do elemento de rolamento	Sódio	Vazamento de refrigerante Intrusão de água do mar
Índio	Rolamentos do virabrequim	Estanho	Rolamentos planos
Ferro	Engrenagens Eixos Furos do cilindro de ferro fundido	Zinco	Aditivo comum em óleo

Fonte: Adaptado do MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J. (2008).

### 3.1.3.4. Instrumentos para Medição Tribológica

#### **Análise de óleo lubrificante**

Verificador de óleo – Existe diversos equipamentos de análise para óleos lubrificantes, de equipamentos portáteis e compactos e recursos limitados, até equipamentos robustos que processam dados extremamente detalhados sobre todas as principais propriedades do óleo.

#### **A análise espectrográfica**

Espectrômetro de emissão atômica – Equipamento já citado anteriormente, que identifica o espectro do material particulado através da emissão de luz.

Espectrômetro de absorção atômica – Equipamento também citado, que tem a mesma função do anterior, com a diferença de se utilizar do outro comportamento físico gerado ao excitar a partícula, que é a absorção atômica.

#### **Ferrografia**

Ferrógrafo quantitativo – Usado para determinar a concentração de partículas de desgastes, de forma quantitativa, separando-as em grandes e pequenas.

Ferrógrafo qualitativo – Equipamento usado para determinar os tipos e causas do desgaste. Através da avaliação qualitativa das partículas.

Microscópio Mecanográfico – Aparelho usado de forma conjunta com o ferrógrafo qualitativo, utilizado para interpretar os resultados e relaciona-los ao tipo de desgaste.

### **Análise de partículas de desgaste**

Se utiliza dos mesmos mecanismos das a outras técnicas para criar uma abordagem mais detalhada e complexa. Compilando os dados dos vários equipamentos supracitados.

#### **3.1.3.5. Vantagens e desvantagens da Análise Tribológica**

A análise tribológica como os outros métodos de manutenção preditiva aumentam a disponibilidade dos equipamentos, reduzem os custos de manutenção através da lubrificação ideal, redução de atritos indesejáveis e como consequência redução do desgaste nas máquinas. Além de apontar possíveis falhas e ajudar no diagnóstico dos equipamentos.

De acordo com MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J (2008) existem três limitações principais no uso de análise de tribologia em um programa de manutenção preditiva: custos de equipamentos, aquisição de amostras precisas de óleo e interpretação de dados. Vale pontuar também que raramente a análise tribológica (análise de partículas de desgaste) para plano preditivo vale por si só, ela geralmente serve como apoio a avaliações por vibração ou térmica. Diferente da análise de óleo lubrificante que pode sim ser uma ferramenta bem econômica, limitada a grandes volumes de óleos, garantindo máquinas trabalhando com o óleo na condição ideal.

Em relação ao custo capital, sabe-se que a instrumentação para análise é normalmente muita alta, o custo recorrente também é considerável já que deve ser feita uma coleta regular do lubrificante e uma análise bem completa da mesma, considerando espectrografia, ferrografia e partículas de desgaste vai ter valor elevado. Outro ponto é saber realizar a coleta do óleo, já que amostra deve representar o verdadeiro estado do mesmo, portanto possuir métodos e frequências adequadas é

de suma importância para uma análise bem-feita, por fim compreender o significado dos resultados é um grande limitante, já que exige uma boa base em química quantitativa e qualitativa.

### **3.2. Técnicas de Planejamento e Análise**

Executar uma análise e um planejamento eficaz e tão importante quanto aplicar um método preditivo ótimo para seus equipamentos. Analisar com eficiência é solucionar o problema identificado, chegar na sua causa raiz, possibilitando assim o fim do impacto negativo sobre os componentes, muitas vezes ignoramos esses problemas ou simplesmente trocamos peças ou implementamos mudanças aleatórias até que os sintomas do problema desapareçam. Portanto escolher boas práticas e técnicas auxiliam muito nessa etapa tão importante da manutenção.

Além da análise e importante planejar como será executado todo o processo da manutenção, da identificação do problema, passando pela ação, formas de controle e correções. Um planejamento adequado garante que tudo de fato seja possível e alcançável de ser executado e que gere os resultados esperados ou que pelo menos permita identificar os porquês de não chegarmos lá.

Portanto nesse documento segue as principais técnicas usada pelas principais instituições e empresas do planeta, onde cada uma tem suas vantagens e aplicabilidades, variando de contexto para contexto. Podemos ainda usar mais de uma delas de forma combinada para maior assertividade do processo.

## **8D**

A metodologia das 8 disciplinas para solução de problemas foi desenvolvida nos anos de 1960 e 1970 pela *Ford Motor Company*, se trata de uma ferramenta para identificar e tratar de problemas recorrentes. O nome 8D vem das oito etapas que devem ser percorridas para resolver o problema:

- 1 – Selecionar o time;
- 2 – Definir o problema;
- 3 – Conter o problema;
- 4 – Identificar a causa raiz;

- 5 – Implementar ação corretiva permanente;
- 6 – Verificar eficácia das ações;
- 7 – Medidas preventivas e institucionalização em toda a organização; e
- 8 – Reconhecimento dos responsáveis e formalização do desfecho do time.

## **PDCA**

O Ciclo PDCA, também chamado de Ciclo de Deming ou Ciclo de Shewhart, surgiu nos Estados Unidos na década de 20, criado pelo estatístico americano Walter Andrew Shewhart, esse ciclo consiste em uma ferramenta de gestão que tem como objetivo promover a melhoria contínua dos processos por meio de um circuito de quatro ações: planejar (plan), fazer (do), checar (check) e agir (act).

## **A3**

Surgiu em 1970, criado pela Toyota. O A3 tem a origem do seu nome no tamanho de papel no padrão europeu e é baseado na metodologia PDCA supracitada, organizado com passos pré-definidos que variam de 5 até 8 passos semelhantes ao PDCA.

## **DMAIC**

Ferramenta muito semelhante as citadas anteriormente, muito famosa por sua aplicação e recomendação no *Lean Six Sigma*. Sendo uma metodologia foca na melhoria contínua e estruturada nos seguintes passos definir, medir, analisar, melhorar (*Improve em inglês*) e controlar.

O quadro 6 apresenta uma comparação das etapas entre as 4 técnicas supracitadas:

Quadro 6 – Quadro comparativo entre PDCA, DMAIC, A3 e 8D

PDCA	DMAIC	A3	8D
Planejar	Definir	Esclarecer o problema	Selecionar o time
	Medir	Quebrar o problema	Definir o problema
		Definir Alvo	Conter o problema
	Analisar	Analisar a causa raiz	Identificar a causa raiz
Desenvolver contramedidas			
Fazer	Melhorar	Aplicar contramedidas	Implementar ação corretiva permanente
checar	Controlar	Avaliar resultados e processos	Verificar eficácia das ações
Agir		Padronizar o sucesso	Medidas preventivas e institucionalização em toda a organização
			Reconhecimento dos responsáveis e formalização do desfecho do time

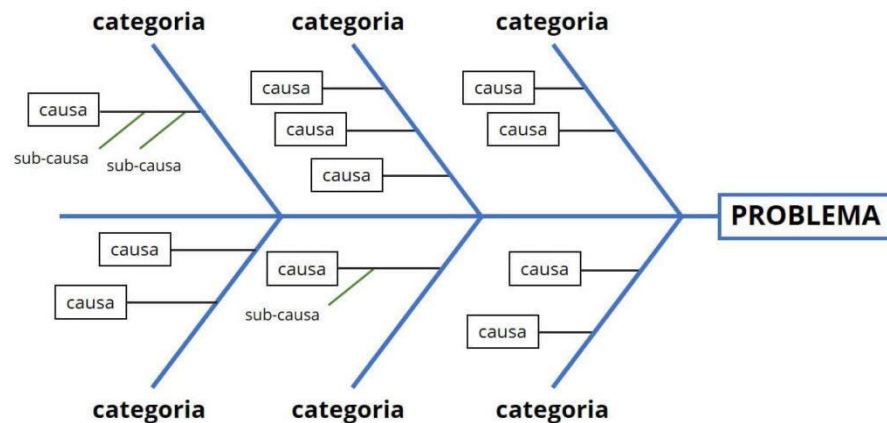
Fonte: Autor (2021).

### Ishikawa

O diagrama de Ishikawa (Figura 19), criado pelo engenheiro químico Kaoru Ishikawa, no ano de 1943, também conhecido por espinha de peixe tem como objetivo ajudar a encontrar aos reais problemas dentro de um processo. Seu nome se dá devido a aparência do diagrama ao final do processo ficar semelhante a uma espinha

de peixe. O método consiste em desenhar uma seta horizontal apontada para seu problema central e a partir dela fazer traços diagonais que serão as categorias das causas encontradas baseado nos 6 M's: Método, Máquina, Medida, Meio ambiente, Material, Mão de obra.

Figura 19 - Representação do Diagrama de Ishikawa



Fonte: Blog ELGScreen. Disponível em

<<https://blog.elgscreen.com/como-aplicar-o-diagrama-de-ishikawa/>> (acessado em 2021).

### FTA (*Fault Tree Analysis*)

Método da Análise da Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis* em inglês) foi desenvolvido por volta de 1960, por W.A. Watson e aperfeiçoada pela Boeing Corporation. Sua metodologia é dedutiva e estruturada em termos de eventos, ao invés de componentes, que tem por objetivo melhorar a confiabilidade em geral de produtos e de processos por meio da relação lógica entre falhas primárias e falha final do produto buscando assim a resolução de problemas.

### Diagrama de Pareto

O diagrama de Pareto ferramenta muito usada para auxiliar os métodos aqui citados que se baseia na regra 20-80, onde nos diz que 20% das causas são responsáveis por 80% dos problemas. A partir desse conceito se cria o diagrama para



definir quais então são as causas de mais impacto para os problemas analisados, criando assim prioridade de execução.

## **MASP**

O método de análise e solução de problemas (MASP) é uma ferramenta também baseada no PDCA, que funciona através da execução de 8 etapas.

1. Identificar problemas
2. Observar os problemas
3. Analisar o fenômeno e suas causas
4. Propor planos de ação
5. Boas práticas para execução das ações
6. Métodos de verificação dos resultados
7. Padronizar procedimentos
8. Elaborar relatórios de conclusão.

## **RCA**

Análise de causa raiz (*Root cause analysis* em inglês) é mais um método que busca a causa raiz do problema muito apoiado em outras ferramentas como 5 Why's, Ishikawa, Arvore de falhas, Pareto entre outros. Composto de 5 etapas básicas: Definição do problema, coleta de dados, identificação da causa raiz, criação e implementação de soluções e por fim acompanhamento.

## **5 Why's**

Outra ferramenta de auxílio que também surge do sistema *Toyota de Produção*, técnica essa que faz parte integral da filosofia *lean*. E tem como preceito questionar cinco vezes ao máximo o porquê de determinado problema levantado. Dessa forma garante assertividade quanto a causa do problema, que muitas das vezes são consideradas técnicas e ao ser questionado os porquês se descobre que eram na verdade humanas ou de processos.

## 5W2H

Da mesma forma que o Ishikawa ou 5 Why's tem a função de auxiliar as metodologias para garantir assertividade no planejamento. A ferramenta funciona como um *checklist* da atividade a ser executada para correção do problema identificado, garantindo prazo, senso de responsabilidade, clareza e eficiência. Isso tudo através de 7 perguntas (5W e 2H):

- Oque? (*What*)
- Porque? (*Why*)
- Onde? (*Where*)
- Quando? (*When*)
- Quem? (*Who*)
- Como? (*How*)
- Quanto custará? (*How Much*)

### 3.3. Técnicas de Controle e Gerenciamento

Grande parte do processo gerencial já é definido no passo anterior, com as ferramentas bem escolhidas e com uma boa execução já se possui muitos insights e decisões para o processo gerencial e de controle. Muito do processo de melhoria continua também passa por aqui, já que é nesse momento que grande parte do planejamento se perde, o controle faz com que todo o processo seja cíclico e garanta a evolução do mesmo com o tempo.

Para isso é importante citar alguns indicadores, conceitos e métodos como FMEA, FMECA, TPM, MCC, Kaizen - *design for six sigma*.

#### 3.3.1. Principais Indicadores de Manutenção

Indicadores são ferramentas para gerenciar um sistema, aferindo processos e indicando possíveis modificações, portanto para uma análise adequada quanto a eficiência de um plano de manutenção podemos utilizar cinco principais indicadores, tempo médio entre falhas (TMEF), tempo médio para reparos (TMPR), disponibilidade

(D), confiabilidade (C) backlog. Além da eficácia geral dos equipamentos (OEE), indicador utilizado pela metodologia TPM.

### **Tempo Médio Entre Falhas (TMEF)**

O tempo médio entre falhas (TMEF ou MTBF) é um dos mais comumente usados indicadores para manutenção, esse consiste em medir o bom funcionamento médio da máquina entre as falhas e imprecisões reparáveis da mesma. Sendo uma ótima ferramenta para avaliar a confiabilidade do equipamento. A equação 11 apresenta o cálculo do TMEF:

$$TMEF = \frac{\sum HTBF}{n} \quad \text{Equação 11}$$

TMEF - Tempo médio entre falhas

HTBF - Horas de trabalho em bom funcionamento

n - Número de falhas

### **Tempo Médio Para Reparos (TMPR)**

O tempo médio para reparos (TMPR ou MTTR) avalia a duração do reparo a máquina que estava danificada, esse indicador mede a habilidade da equipe em resolver a avaria. O TMPR está associado a Manutenibilidade dos equipamentos e ao contrário do TMEF devemos mantê-lo baixo. TMPR é calculado conforme a Equação 12:

$$TMPR = \frac{\sum TR}{n} \quad \text{Equação 12}$$

TMPR - Tempo médio para reparos

TR - Tempo de reparo

n - Número de falhas

### Disponibilidade (D)

Segundo a norma NBR 5462, disponibilidade é capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado. Esse indicador leva em consideração os dois indicadores citados anteriormente, ele indica o por quanto tempo a máquina está disponível para uso. Sendo o maior objetivo da gestão da manutenção ao lado da confiabilidade. Obtém-se a disponibilidade conforme a equação 13:

$$D = \frac{TMEF}{TMEF + TMPR} \quad \text{Equação 13}$$

D - Disponibilidade

TMEF - Tempo médio entre falhas

TMPR - Tempo médio para reparos

### Confiabilidade (C)

Segundo a norma NBR 5462, confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar a sua função especificada no projeto, de acordo com as condições de operação, em um intervalo específico de tempo. Ou seja, é a probabilidade do equipamento se manter disponível para utilização no futuro.

$$C = e^{-\lambda t} \quad \text{Equação 14}$$

C - Confiabilidade

e - Constante de Néper

t - Tempo

$$\lambda = \frac{1}{TMEF}$$

### Eficácia Geral dos Equipamentos (OEE)

A sigla OEE significa Overall Equipment Effectiveness, que pode ser traduzido para Eficácia Geral dos Equipamentos. É um dos indicadores mais utilizados em

indústrias de grande porte. Foi desenvolvido pelo japonês Seiichi Nakajima, um dos criadores da metodologia TPM (Total Productive Maintenance). O OEE é utilizado para medir e representar a realidade operacional do chão de fábrica. O mesmo pode ser obtido segundo as equações 15, 16, 17 e 18:

$$OEE = Disp * Perf * Qual \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

*Disp* = Disponibilidade

*Perf* = Performance

*Qual* = Qualidade

Tendo:

$$Disp = (TP/TPP) * 100\% \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

*Disp* = Disponibilidade

*TP* = Tempo produzindo

*TPP* = Tempo programado para produzir

$$Perf = (QPR/QPT) * 100\% \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

*Perf* = Performance

*QPR* = Quantidade Produção Real

*QPT* = Quantidade Produção Teórica

$$Qual = (QB/QTP) * 100\% \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

*Qual* = Qualidade

*QB* = Quantidade de Bons

*QTP* = Quantidade Total Produzida

### 3.3.2. Métodos e Conceitos de Gerenciamento

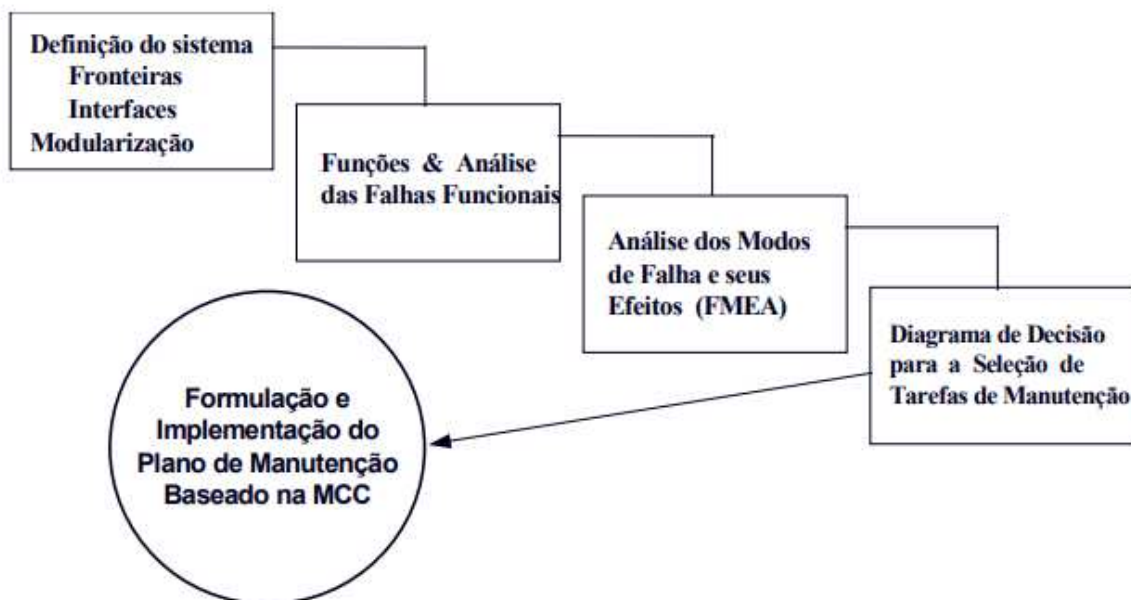
Os métodos apresentados a seguir possuem muitos pontos em comum, estando alguns dentro de uma mesma filosofia de trabalho sendo assim usados conjuntamente dependendo da situação.

#### MCC (Manutenção Centrada em Confiabilidade)

A manutenção centrada em confiabilidade tem sua origem indústria aeronáutica tendo sido adapta a outras industrias, esse método visa garantir além da confiabilidade, a segurança e o menor custo de operação. Vale pontuar que o MCC é focado na preservação da função do sistema e não dos equipamentos, ou seja, os componentes devem ser gerenciados de forma diferente de acordo com seu nível de impacto no sistema, priorizando aqueles que tem maior potencial de em caso de avaria paralisar a produção.

Podemos dividir as etapas do processo de MCC conforme a figura 20:

Figura 20 – Visão Geral do Processo da MCC



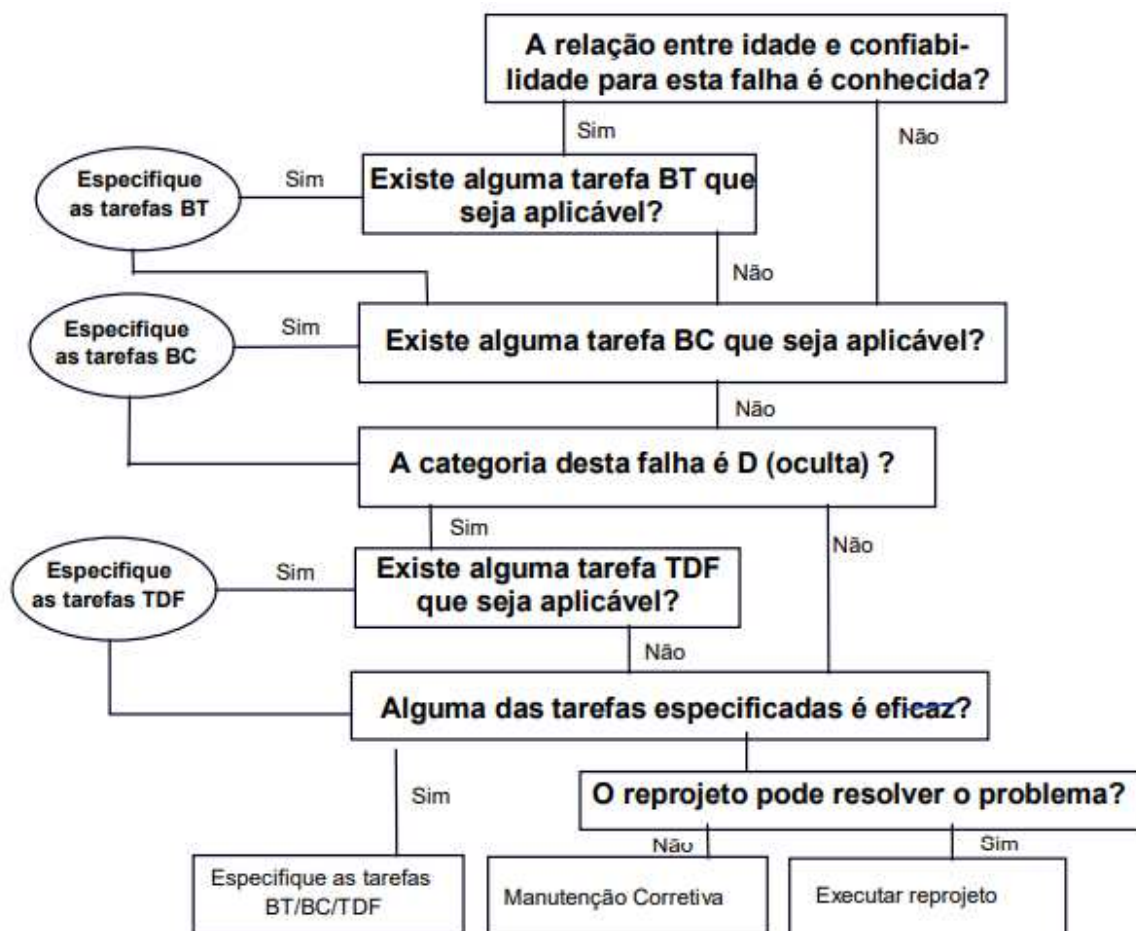
Fonte: FLEMING, PAULO VICTOR; DA SILVA, MAURICIO F.; FRANÇA, SANDRO RICARDO R. O (1999).

É importante frisar que todas essas etapas são realizadas em reuniões que seguem um preceito muito importante do *kaizen* que a participação do *gemba*, ou seja,

o pessoal da operação, aqueles que tem informações técnicas e experiência com o processo relevante para otimizar o mesmo.

Temos ainda o diagrama de tomada de decisão (Figura 21) que classifica as falhas baseadas nas tarefas de manutenção levando em conta as características de confiabilidade dos modos de falha, sendo elas dos tipos BT (baseadas no tempo), BC (baseadas na condição/preditivas), TDF (testes para descobrir falhas ocultas) e corretiva.

Figura 21 - Diagrama de Decisão - Seleção de Tarefas



Fonte: FLEMING, PAULO VICTOR; DA SILVA, MAURICIO F.; FRANÇA, SANDRO RICARDO R. O. (1999).

## FMEA e FMECA

A análise de modos de falhas e efeitos (*Failure Mode and Effect Analysis* em Inglês) é um método utilizado para prevenir falhas e analisar riscos, identificando causas e efeitos, definindo assim as ações necessárias para inibir as falhas.

A principal diferença entre FMEA e FMECA reside no fato que a primeira é uma técnica mais ligada ao aspecto qualitativo, sendo muito utilizada na avaliação de projetos, enquanto a segunda inclui o que se denomina Análise Crítica, ou seja, uma análise quantitativa que leva em consideração as probabilidades de ocorrência.

## **TPM**

*Total Productive Maintenance* (TPM), em português, manutenção preditiva total, essa é uma metodologia japonesa que consiste em um sistema criado para cadeias produtivas contínuas, com o objetivo de diminuir custos na produção e logística através da redução nos defeitos e avarias.

Fundamento na filosofia 5S (organização, arrumação, limpeza, padronização e disciplina) o TPM pauta oito pilares para controlar e gerenciar a manutenção:

1. Manutenção da qualidade
2. Manutenção planejada
3. Manutenção autônoma
4. Melhoria específica
5. Controle de equipamentos
6. Segurança, saúde, meio ambiente
7. TPM no setor de administração
8. Treinamento e educação

Cada etapa se utiliza de ferramentas de controle como gráficos e controles estatísticos, além de indicadores como OEE e os conceitos do 5S.

## ***Kaizen – Design for six sigma***

*Kaizen* é uma palavra japonesa que significa melhoria continua, trata-se acima de tudo de uma filosofia de trabalho que pode ser muito útil para o gerenciamento de qualquer área da empresa, sua ideia principal é muito ligada ao *lean* que é eliminar desperdício, através da prática de englobar todos os funcionários, principalmente o “Gemba” (lugar onde as coisas acontecem na fábrica) nos processos produtivos e melhorias ditadas pela necessidade.

Temos que aqui citar também o conceito six sigma (seis sigma) que é um método estatístico focado em redução de falhas a uma taxa de erro menor que



0,0004% na produção, essa é uma metodologia estadunidense mas que ao longo dos anos ficou totalmente associada a filosofia oriental do *Kaizen*, que por sua vez implementa uma cultura de melhoria contínua necessária para o desenvolvimento do *lean six sigma* no que lhe concerne é o conceito da metodologia enxuta agregado aos outros conceitos apresentados.

Portanto o *Kaizen – Design for six sigma* é a filosofia de melhoria contínua desenhada para trabalhar com os seis sigmas na produção enxuta, ou seja, se utiliza de conceitos de meta de parada zero, redução do tempo de setup, layout melhorado para utilização e reparo das máquinas e aumento de disponibilidade, através de um processo apoiado em conceitos como TPM, *Just in Time* e ferramentas como PDCA ou DMAIC.

O *Kaizen* ocorre no que chamamos de evento *Kaizen*, que não tem um padrão definido, já que o escopo desse evento é determinado de acordo com a necessidade da empresa. Tipicamente é realizado uma semana *Kaizen* contendo as atividades durante 5 dias, de acordo com os objetivos dessa filosofia obedecendo o ciclo PDCA, portanto sendo uma atividade de melhoria contínua, já que o PDCA é uma ferramenta cíclica de autocorreção e melhora.

### **3.4. O Horizonte da Manutenção Preditiva**

A manutenção preditiva já está presente na indústria 4.0 e de olho em tudo que vai vir com ela, conceitos como *big data*, *machine learning*, *IoT (internet of things)* e *IA (intelligence artificial)* são cada vez mais utilizados e aprimorados para o processo de manutenção, por tanto esse documento traz o que há até o momento de conceitos mais esperados para o futuro da manutenção preditiva. Vale se destacar também que esses conceitos se cruzam por diversas vezes e são utilizados de forma conjunto pois se completam.

#### **Big data**

Big data nos últimos anos demonstrou seu enorme potencial para identificar valiosas informações que auxiliam em muitas tomadas de decisão e por isso vem sendo alvo de constantes pesquisas acadêmicas, com avanço de tecnologias de

Internet das coisas (IoT), machine learning, Inteligência artificial (IA) entre outras, simplificou o uso de big data na indústria.

A manutenção preditiva por sua vez produz uma quantidade imensa de dados e quanto mais os processos evoluem mais se torna necessário o conceito de big data, para se construir um ambiente integrado no qual o processo de produção possa ser representado de forma transparente, além de ser controlado e gerenciado de forma mais eficiente.

O processamento da big data envolve formatar dados, reduzir a dimensionalidade, identificar padrões ocultos, avaliar e prever desempenho, por isso a análise de big data gerará grandes benefícios, como atingir próximo do zero em tempo de inatividade e garantir a manutenção preditiva.

Um estudo realizado por JIHONG YAN, YUE MENG, LEI LU e LIN LI (2017) sobre big data na indústria 4.0 aplicada manutenção preditiva demonstra o quanto impactante esse conceito vai ser para o futuro ambiente industrial, aonde foi proposto um procedimento sistemático para estruturar a big data industrial, com tecnologia de web semântica para dados semiestruturados e reconhecimento, detecção e rastreamento de alvos para dados não estruturados. Com a mineração de tais dados com o foco em análises para manutenção preditiva, o estudo concluiu que “dados heterogêneos de múltiplas origens podem fornecer novas soluções para manutenção preditiva, programação e otimização de processos de usinagem para economia de energia.”

### **Machine learning**

Machine learning é outro conceito que se desenvolve e se aplica cada vez mais na indústria 4.0 e como consequência na manutenção preditiva. É fácil deduzir como o machine learning pode auxiliar nas previsões de um equipamento.

Quando projetado e implementado adequadamente, um algoritmo irá aprender o comportamento normal dos dados de determinado equipamento ou componente, identificando assim o desvio em tempo real. Depois de um período o mesmo irá aprimorar os dados implementados a partir da análise inicial, tornando assim o modelo de previsão mais preciso e enxuto, trabalhando dentro do conceito de melhoria contínua.

No artigo de SUSTO, GIAN ANTONIO; SCHIRRU, ANDREA; PAMPURI, SIMONE (2015) é apresentado uma metodologia de machine learning de múltipla

classificação para manutenção preditiva. A onde vários módulos são treinados para classificar com diferentes horizontes de previsão e fornecer diferentes compensações de desempenho em função da frequência de interrupções inesperada e vida útil, em seguida usar dessas informações para tomada de decisão baseado em custo operacional a fim de minimiza-los.

Por fim o estudo demonstrou extrema eficácia através de um evento simulado de um problema na manutenção no processo de fabricação de semicondutores, criando um sistema robusto que alterações dos dados de entrada ao longo do tempo e também permite que o usuário altere dinamicamente a política de manutenção com base nos custos atuais e nas necessidades de produção de manufatura.

### **Internet of thing**

A internet das coisas é um dos conceitos que mais vem mexendo com a sociedade em todas suas camadas e a indústria não seria diferente, a infinidade de aplicações que poderemos ter com IoT nos permite imaginar longe. Uma fábrica completamente inteligente, em todas suas áreas, se comunicando e se retroalimentando com informações que deixam o sistema cada vez mais inteligente e eficaz.

É possível imaginar um sistema de ticket digital onde o software identifica uma manutenção futura necessária e com base em parâmetros pré-definidos ou aprendidos pelo IA encaminha todas as informações para um trabalhador disponível e com as qualificações necessárias para realizar aquele procedimento, além disso ao fim da manutenção o software retroalimenta o algoritmo e aprende com processo executado. Posteriormente, essa informação vai para a big data e se torna disponível em nuvem para o acesso a qualquer dispositivo que possua permissão, sendo adaptado ao leitor que vai utilizá-lo, levando informações relevantes de acordo com o setor da empresa.

O artigo de CIVERCHIA, FEDERICO; BOCCHINO, STEFANO; SALVADORI, CLAUDIO; ROSSI, ENRICO; MAGGIANI, LUCA; PETRACCA, MATTEO (2017) traz detalhes de uma solução IoT industrial avançada projetada para permitir um monitoramento de máquinas industriais através de sensores IoT, que permitem o desenvolvimento de aplicações à manutenção preditiva. Esse estudo foi avaliado em ambiente real instalado em uma central elétrica e os resultados mostraram que “ a solução IoT desenvolvida se beneficia de todas as vantagens proporcionadas pelos

protocolos IoT adotados, garantindo que cada nó seja alcançável por meio de técnicas simples baseadas em IP com um atraso aceitável e apresentando uma vida média estimada de 1 ano no caso de cada O dispositivo inteligente IoT é configurado para enviar dados coletados e elaborados a cada 30 minutos. ”

## IA

*Intelligence artificial (IA)*, em português inteligência artificial, é o conceito macro que engloba *machine learning* e *deep learning*, não há ainda um sistema de IA que funcione como a inteligência biológica, ou seja, que tenha todos os sentidos e opere tudo que a inteligência humana pode realizar. Mas temos o conceito de “IA limitada”, que são sistemas focados na realização de uma atividade e que recebe um “treinamento inicial” que com o tempo e com redes neurais robustas a mesma se torna muito eficiente ao ponto que supera com certa facilidade a percepção humana.

Dessa forma temos os conceitos de *machine learning* e *deep learning* esse último muito conhecido pelas redes neurais, que hoje já se faz uso em demasia, por exemplo em carros auto dirigíveis, reconhecimento de imagens, sistema de recomendações baseados em interesses e auxiliam muito no desenvolvimento do próprio *machine learning* e da IA como um todo.

Um exemplo de utilização de IA em *machine learning* é o estudo trazido por DANIYANA, ILESANMI; MPOFU, KHUMBULANI; OYESOLA, MOSES; RAMATSETSE, BOITUMELO; ADEODU, ADEFEMI (2020), que apresenta o desenvolvimento de módulos de treinamento envolvendo um sistema (IA), através de redes neurais em um modelo de série temporal dinâmica para a manutenção preditiva em vagões. E o resultado desse estudo indica a viabilidade do IA no diagnóstico da condição de rolamento da roda do vagão, a previsão da vida útil do mesmo e a determinação do tempo ótimo para a manutenção.

#### 4. Conclusões da Revisão Bibliográfica

Alicerçado no exposto entende-se a amplitude do conceito de manutenção preditiva e sua importância para o cenário empresarial, visto que o mesmo prediz o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as circunstâncias necessárias para que este seja aproveitado em suas melhores condições, aumentando a confiabilidade e a qualidade dos resultados. Dentro do cenário correto promovendo ganhos financeiros com a imediata redução dos custos, além de melhora de outros parâmetros não avaliados nesse trabalho, mas que podem ter impacto no que diz respeito a potencial aumento dos lucros.

No que concerne as técnicas de predição, não há maneira de definir qual a melhor ou pior técnica, como foi mostrado tudo depende do cenário em que a mesma está sendo aplicada, avaliando qual tipo de máquina e o que está se procurando na mesma, a partir disso definir qual melhor se adequa a sua necessidade. O que fica claro é que existe uma variedade imensa de formas de se executar um plano de manutenção preditiva, desde o modelo de análise passando por vibrações, térmica ou tribológica, ou até mesmo um combinado de duas ou mais delas, até a definição de qual meio de execução, escolhendo a melhor técnica de medição e instrumento, novamente baseado na necessidade e estratégia adota pela organização.

Os instrumentos de medição também têm uma implicação muito grande dentro dessa pesquisa, com claro impacto sobre os resultados. Existe uma grande variação das tecnologias aplicadas para tal e da mesma forma os seus valores.

Um importante ponto desse trabalho é expor informações com diz respeito as técnicas de planejamento e análise em conjunto com as de gerenciamento e controle, que são intimamente relacionados e impossível de se desassociar, as mesmas também são muito vinculadas ao conceito *lean-six sigma*, que se torna fácil de se notar pelas ferramentas aqui apresentadas, sendo igualmente empregadas nessa filosofia de trabalho. Por aqui também não há melhor técnica, na verdade a maioria é quase questão de gosto pessoal ou faz sentido no contexto cultural da empresa que está executando o modelo de manutenção. São ferramentas poderosas e extremamente necessárias que se usadas de forma conjunta estabelecem um modelo bem completo que preenche todas as lacunas e sustentam um planejamento que se torna mais simples e fácil de se aplicar e principalmente de se fazer compreendido. E para auxiliar esse item os indicadores são de extrema valia, já que estabelecem uma

métrica de quantificação dos resultados, o que permite uma visualização interessante dos processos.

Mais importante do que planejar, é executar. Vale a pena ressaltar isso. Todas essas técnicas de aplicação, planejamento, análise e controle só são efetivas se forem botadas em prática, portanto, um planejamento da manutenção só foi bem feito se ele foi possível de rodar e principalmente se manteve funcional num processo de melhoria contínua.

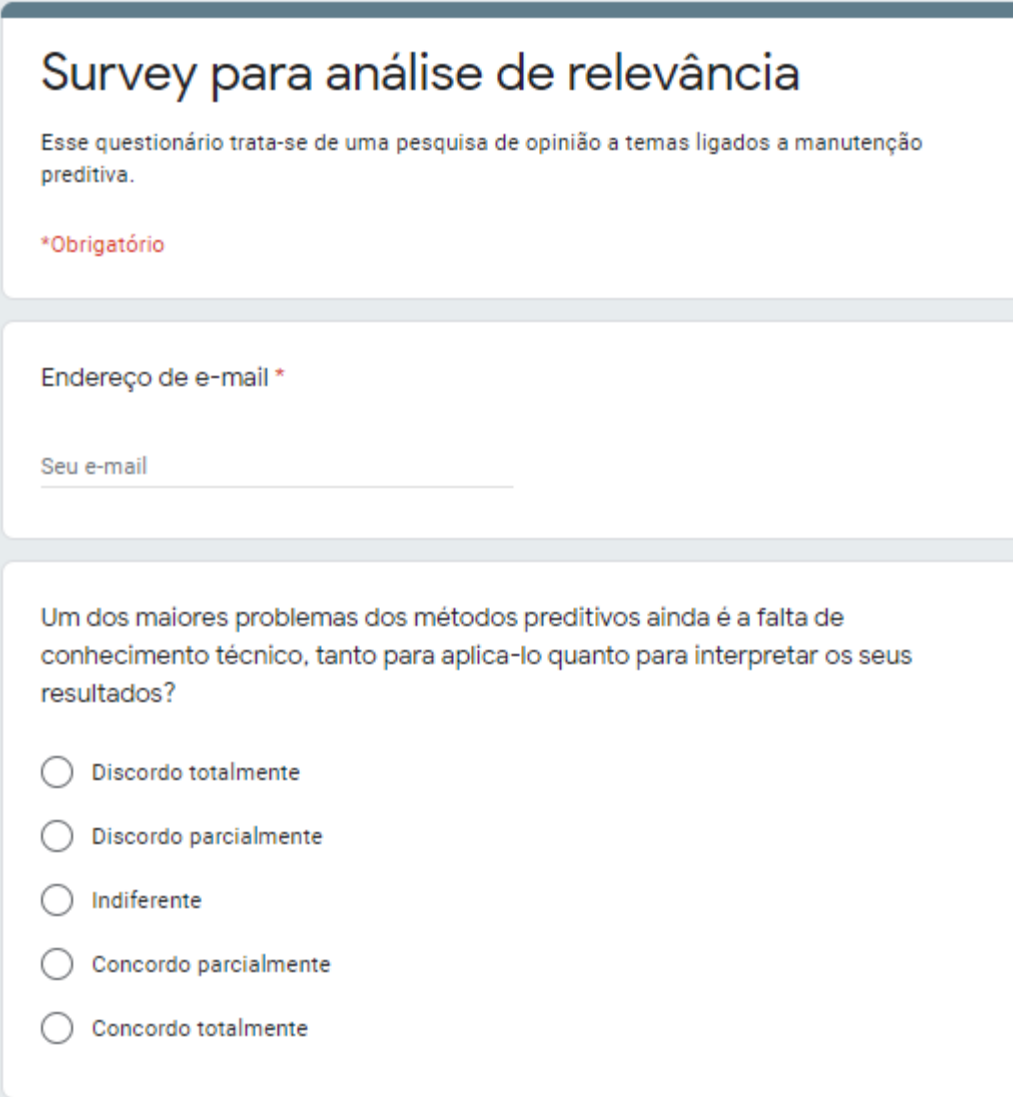
Por fim com base no que foi apresentado nesse trabalho nota-se a importância presente da manutenção preditiva e todo alcance que a mesma pode ter, mas nota-se também a potencial futuro, com um horizonte muito promissor baseado em *IA(machine learning, deep learning)*, *IoT* e *Big Data*. Faz-se crer num modelo multissetorial que representa acima de tudo a filosofia *Kaizen* de melhoria continua e que fará parte importante da indústria 4.0.

## 5. Desenvolvimento da Pesquisa de Campo

Para análise da relevância do presente trabalho foi feito um *survey*, com gestores de manutenção de importantes empresas do sudeste brasileiro, empregando a escala de Likert conforme apresentado no quadro 01, contendo 8 perguntas elaboradas pelo autor:

1. Um dos maiores problemas dos métodos preditivos ainda é a falta de conhecimento técnico, tanto para aplica-la quanto para interpretar os seus resultados?
2. Identificar os instrumentos corretos de acordo com seu método e sua necessidade é crucial para o sucesso da manutenção?
3. O futuro da manutenção preditiva está no uso de *IA*, *IoT* (*machine learning* e *deep learning*) e *Big Data*?
4. Técnicas de análise e gerenciamento são tão importantes quanto a escolha do método de manutenção?
5. *Lean six-sigma* geralmente é um conceito muito ligado a produção, porém é uma metodologia e uma filosofia que produz grandes ganhos também na manutenção?
6. Os valores da manutenção preditiva ainda é o maior impeditivo de sua aplicação?
7. O conceito de manutenção ainda é sinônimo de gasto dentro da indústria?
8. O cenário brasileiro quando se trata de manutenção preditiva é defasado em relação aos grandes centros mundiais?

O *survey* foi realizado pelo *Google Forms*, conforme pode ser visto na figura 22, com a possibilidade de resposta única para cada pergunta.

Figura 22 – Survey enviado via *forms* para os gestores

**Survey para análise de relevância**

Esse questionário trata-se de uma pesquisa de opinião a temas ligados a manutenção preditiva.

**\*Obrigatório**

Endereço de e-mail \*

Seu e-mail \_\_\_\_\_

Um dos maiores problemas dos métodos preditivos ainda é a falta de conhecimento técnico, tanto para aplica-lo quanto para interpretar os seus resultados?

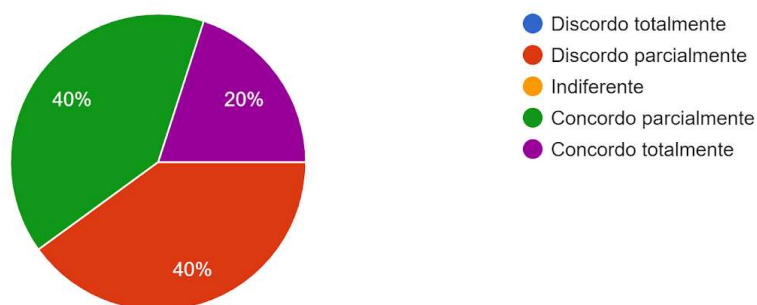
- Discordo totalmente
- Discordo parcialmente
- Indiferente
- Concordo parcialmente
- Concordo totalmente

Fonte: Autor (2021). Disponível em <<https://forms.gle/6iB7cK4SeLqzVrNMA>>



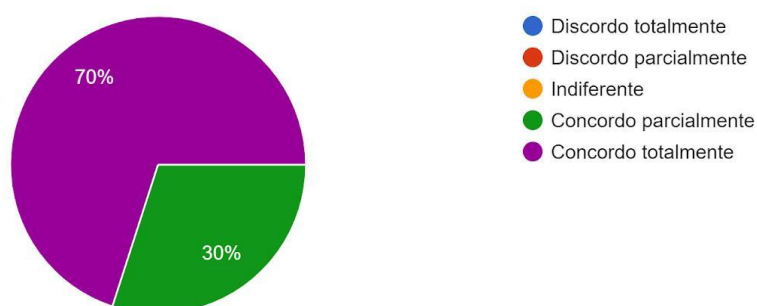
Foram obtidas respostas de 10 gestores diferentes com os seguintes resultados apresentados nos gráficos 1 a 8:

Gráfico 1 – Resultado da pergunta 1 (Um dos maiores problemas dos métodos preditivos ainda é a falta de conhecimento técnico, tanto para aplica-la quanto para interpretar os seus resultados?)



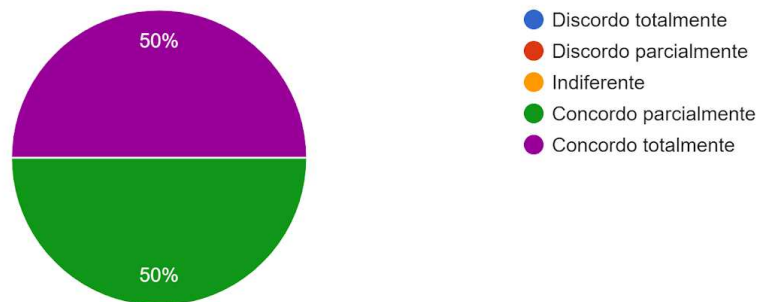
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 2 – Resultado da pergunta 2 (Identificar os instrumentos corretos de acordo com seu método e sua necessidade é crucial para o sucesso da manutenção?)



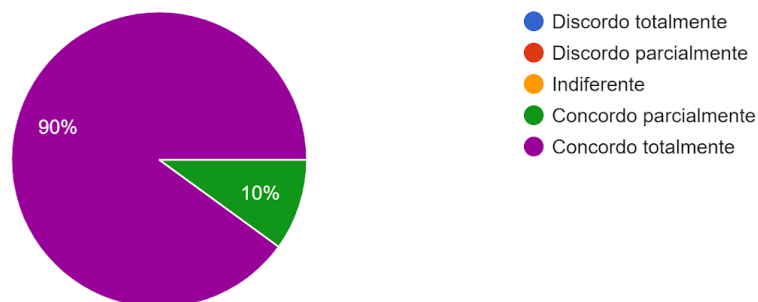
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 3 – Resultado da pergunta 3 (O futuro da manutenção preditiva está no uso de IA, IoT (*machine learning* e *deep learning*) e *Big Data*?)



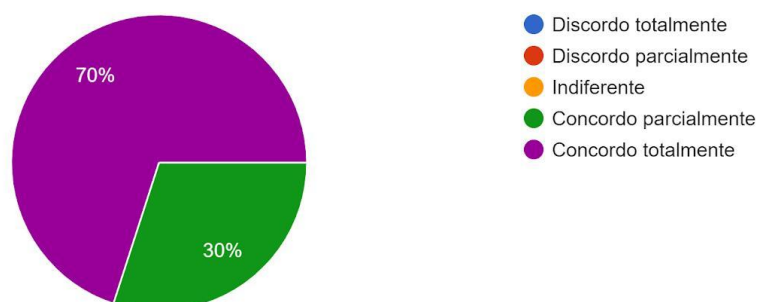
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 4 – Resultado da pergunta 4 (Técnicas de análise e gerenciamento são tão importantes quanto a escolha do método de manutenção?)



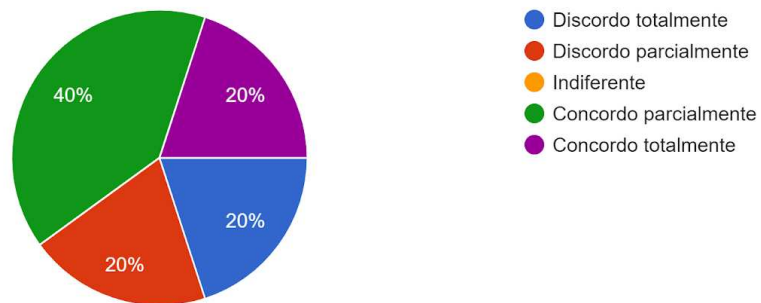
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 5 – Resultado da pergunta 5 (*Lean six-sigma* geralmente é um conceito muito ligado a produção, porém é uma metodologia e uma filosofia que produz grandes ganhos também na manutenção?)



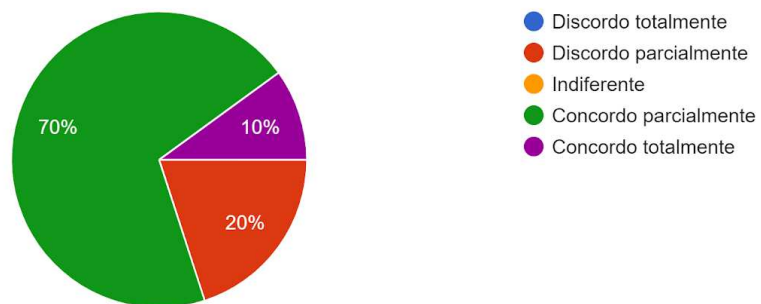
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 6 – Resultado da pergunta 6 (Os valores da manutenção preditiva ainda é o maior impeditivo de sua aplicação?)



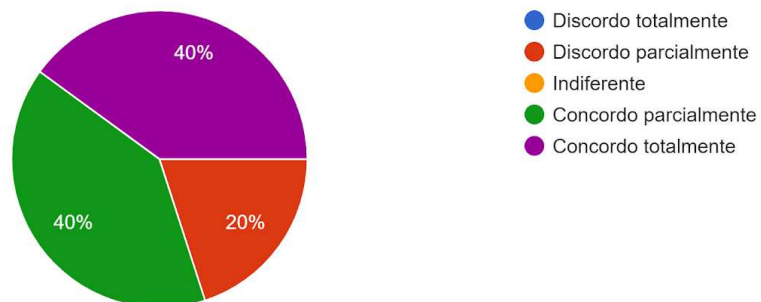
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 7 – Resultado da pergunta 7 (O conceito de manutenção ainda é sinônimo de gasto dentro da indústria?)



Fonte: Autor (2021).

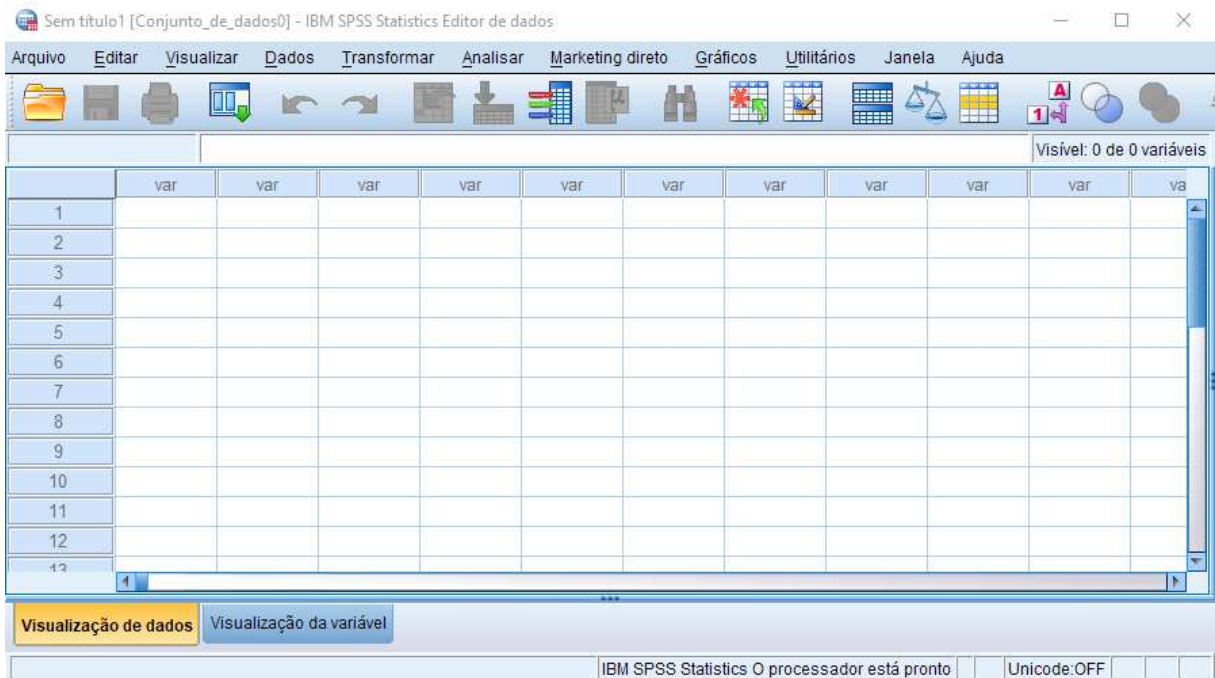
Gráfico 8 – Resultado da pergunta 8 (O cenário brasileiro quando se trata de manutenção preditiva é defasado em relação aos grandes centros mundiais?)



Fonte: Autor (2021).

Em seguida foi definida a confiabilidade dessa pesquisa fazendo uso do coeficiente *alfa de Cronbach* (Matthiensen, 2011), através do *software IBM SPSS* apresentado na figura 23:

Figura 23 – *Layout do software IBM SPSS*



Fonte: Autor (2021).

Os resultados obtidos mostraram um Alfa de Cronbach de 0,689, julgado pelo autor como fora do aceitável, dessa forma, através do mesmo *software* aferiu-se o quanto de impacto que cada pergunta gerava sobre o parâmetro Alfa, assim a pergunta 4 se mostrou inconsistente e foi retirada da análise. Posteriormente os cálculos foram executados novamente, apresentando os resultados no quadro 7:

Quadro 7 – Alfa de Cronbach

<b>Alfa de Cronbach</b>	<b>Alfa de Cronbach com base em itens padronizados</b>	<b>N de itens</b>
0,745	0,729	7

Fonte: Autor (2021)

LANDIS, J.R., KOCH, G.G (1977) estabelece um critério de avaliação do alfa de Cronbach que é apresentado no quadro 8:

Quadro 8 – Critério de avaliação do alfa de Cronbach

<b>Alfa de Cronbach</b>	<b>Avaliação</b>
0,81 a 1,0	Quase Perfeita
0,61 a 0,80	Substancial
0,41 a 0,60	Moderada
0,21 a 0,40	Razoável
0,00 a 0,21	Pequena

Fonte: Autor (2021)

Portanto segundo o critério de LANDIS, J.R., KOCH, G.G (1977), podemos definir a relevância da pesquisa apresentada como substancial. Estando assim dentro da expectativa desse documento conforme apresentado em seu escopo.

## 6. Considerações finais

Baseado nos resultados obtidos no *survey* e em sua análise através da escala Likert associada ao alfa de Cronbach é notória a importância do assunto tratado nesse documento. Sua discussão é cada vez mais necessária ainda mais quando se trata do cenário brasileiro, que se encontra defasado com relação aos grandes centros, porém nesse ponto é importante ressaltar que muito disso se deve a mentalidade conservadora que circunda no alto escalão das empresas nacionais, já que conceitos como manutenção ainda são vistas como gasto e não como investimento.

A ideia de manutenção preditiva se faz presente a décadas e com ela as principais filosofias e técnicas organizacionais, comprovadamente eficazes, se cruzam ideologicamente. *Lean-six sigma*, *Kaizen*, *TPM*, estão intimamente ligados a predição de avarias e, portanto, deveria ser para onde as organizações teriam que caminhar, mas não é o que acontece por aqui, onde encontramos grandes empresas e indústrias aplicando técnicas de manutenção corretiva em importantes setores e linhas de produção, o que beira ao absurdo.

A mudança de corretiva para preditiva é dividida por um abismo conceitual, portanto estudos dessa natureza são de suma importância para a caminhada do empresariado nacional. Já que produzimos conteúdo científico para tal e temos total potencial técnico para executar, o que falta é visão empreendedora apurada e senso de urgência.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, CARLOS J. M.; FORTES, MARCIO Z.; DE SOUZA, MARCOS PAULO. **Ações preditivas na manutenção - termografia: Uma visualização de oportunidade de ganhos energéticos**. IV CBEE, Juiz de Fora, 2011.

ALYRIO, ROVIGATI DANILO. **Métodos e técnicas de pesquisa em administração**. Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2009.

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

BARNETTE, J. J. **Effects of Stem and Likert Response Option Reversals on Survey Internal Consistency: If You Feel the Need, There is a Better Alternative to Using those Negatively Worded Stems**. Educational and Psychological Measurement, Vol. 60 No. 3, June 2000, P. 361-370.

CARGILL DO BRASIL. **Apostila de Manutenção Preditiva – Análise de Vibração**. CIVERCHIA, FEDERICO; BOCCHINO, STEFANO; SALVADORI, CLAUDIO; ROSSI, ENRICO; MAGGIANI, LUCA; PETRACCA, MATTEO. **Industrial Internet of Things monitoring solution for advanced predictive maintenance applications**. Pisa, Itália, 2017.

DANIYANA, ILESANMI; MPOFU, KHUMBULANI; OYESOLA, MOSES; RAMATSETSE, BOITUMELO; ADEODU, ADEFEMI. **Artificial intelligence for predictive maintenance in the railcar learning factories**. Pretoria, África do Sul e Ado Ekiti, Nigeria, 2020.

DHILLON, B.S. **Engineering maintenance: a modern approach**. 1ª ed., Florida: CRC Press, 2002.

ENGEMAN. **Manutenção: tipos e tendências**. 2018.

FILHO, LUIS FELIPE S. **Manutenção por Análise de Vibrações: Uma Valiosa Ferramenta para Gestão de Ativos**. Rio de Janeiro, 2013.

FLEMING, PAULO VICTOR; DA SILVA, MAURICIO F.; FRANÇA, SANDRO RICARDO R. O. **Aplicando manutenção centrada em confiabilidade (MCC) em indústrias brasileiras: Lições aprendidas**. Salvador, BA, 1999.

FOGLIATO, F.; RIBEIRO, J. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 1ª ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FUENTES, F.F.E. **Metodologia para inovação da gestão de manutenção industrial**. 2006. 208 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.

GULATI, R. **Maintenance and Reliability**. Best Practices, 2ª ed., New York: Industrial Press, 2012.

JIHONG YAN, YUE MENG, LEI LU, AND LIN LI. **Industrial Big Data in an Industry 4.0 Environment: Challenges, Schemes, and Applications for Predictive Maintenance.** Qingdao, China, 2017.

KARDEC, A.; NASCIF J. **Manutenção: função estratégica.** 3ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009.

KIMURA, ROGÉRIO K. **Uso da Técnica de Análise de Óleo Lubrificante em Motores Diesel Estacionários, Utilizando-se Misturas de Biodiesel e Diferentes Níveis de Contaminação do Lubrificante.** Ilha Solteira, São Paulo, 2010.

KOTHAMASU, R.; HUANG, S.H.; VERDUIN, W.H. **System Health Monitoring and Prognostics – A Review of Current Paradigms and Practices.** In: MOHAMED BENDAYA, M.; DUFFUAA, S. O.; RAOUF, A., KNEZEVIC, J.; AIT-KADI, D. Handbook of Maintenance Management and Engineering. 1ª ed. London: Springer, 2009.

KREUSCH, KLAUS. **A aplicação da técnica preditiva na manutenção de um compressor industrial.** Ponta Grossa, 2013.

LAGO, DANIEL F. **Manutenção preditiva de um redutor usando análise de vibrações e de partículas de desgaste.** Uberlândia, 2006.

LANDIS, J.R., KOCH, G.G. **The measurement of observer agreement for categorical data.** Biometrics, 33:195, 1977.

LEME, MURILO OLIVEIRA. **Metodologia de manutenção preditiva para motores elétricos baseada em monitoramento de variáveis físicas e análise multicritério.** Ponta Grossa, 2017.

M.T. DE ALMEIDA. **Vibrações mecânicas para engenheiros.** 2ª edição, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1990.

MARAN, M. **Manutenção baseada em condição aplicada em um sistema de ar condicionado como requisito para sustentabilidade de edifício de escritórios.** São Paulo. 2011.

MARKONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa.** Editora Atlas, São Paulo, 6ª Edição, p. 62-98, 2006.

MATHIAS, MAURO H. **Ambiente multimídia de suporte à disciplina de pós-graduação: ferramentas de diagnóstico de máquinas.** UNESP, 2011.

MATTHIENSEN, A. **Uso do Coeficiente Alfa de Cronbach em Avaliações por Questionários.** 2011. Publicação EMBRAPA, RR. ISSN 1981 - 6103 Dezembro, 2011.

MOBLEY, R. KEITH; HIGGINS, LINDLEY R.; WIKOFF, DARRIN J. (Eds). **Maintenance Engineering Handbook (7th Ed.).** Mc Grawhill. New York, 2008.



NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1999.

OTANI, MARIO. MACHADO, WALTAIR VIEIRA. **A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial**. Ponta Grossa, 2008.

PINTO, A. K., XAVIER, J. A. N. **Manutenção: função estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark: ABRAMAN, 1999.

RADI, POLYANA A.; SANTOS, LÚCIA V.; BONETTI, LUIZ F.; TRAVA-AIROLDI, VLADIMIR J. **Tribologia, conceitos e aplicações**. Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA. São José dos Campos, SP, Brasil, 2007. São Paulo: Ed da Cargill, 2003.

SÁ-SILVA, JACKSON R.; DE ALMEIDA, CRISTÓVÃO D.; GUINDANI, JOEL FELIPE. **Pesquisa documental: pistas teóricas e metodológicas**. Revista Brasileira de História & Ciências Sociais Ano I - Número I - julho de 2009.

SILVA, JÚLIO CÉZAR R. P. DA; TARALLI, CIBELE H.; MELZ, SIMONE P. M. **Termograma: A imagem térmica como instrumento de diagnóstico rápido no design**. Florianópolis, SC, Brasil, 2015.

SILVA, LUIZ A. da. **Termografia: Princípios básicos e suas aplicações**. 1. ed. São José dos Campos: Tecnolass Tecnologia, 2017.  
SINATORA, A. **Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte**. Prova de Erudição, São Paulo, 2005.

SOEIRO, S. NEWTON. **Curso de fundamentos de vibrações e balanceamento de rotores**. Belém, PA. 2008.

SUSTO, GIAN ANTONIO; SCHIRRU, ANDREA; PAMPURI, SIMONE. **Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach**. IEEE Transactions on Industrial Informatics. Volume: 11, Issue: 3, 2015.

TUCKER-SEELEY, K. R. **The effects of using likert vs. visual analogue scale response options on the outcome of a web-based survey of 4th through 12th grade students: data from a randomized experiment**. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Boston College Electronic, 2008.

TUMER, I. Y., STONE, R. B., AND VAN WIE, M. **The Function-Failure Design Method**. Volume 127, Issue 3, ASME Journal of Mechanical Design, 2005.