

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA – SP
FACULDADE DE ENGENHARIA**

HUGO GAROFALO DE PÁDUA

**ANÁLISE DA INDÚSTRIA 4.0 E O USO DE SUAS TECNOLOGIAS NO AUXÍLIO
DA DETECÇÃO DE FALHAS PREMATURAS DE MOTORES ELÉTRICOS**

Ilha Solteira
2022



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

HUGO GAROFALO DE PÁDUA

ANÁLISE DA INDÚSTRIA 4.0 E O USO DE SUAS TECNOLOGIAS NO AUXÍLIO DA DETECÇÃO DE FALHAS PREMATURAS DE MOTORES ELÉTRICOS

Trabalho de Graduação, apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Especificação: Automação
Orientador: Prof. Dr. Jean Marcos de Souza
Ribeiro

Ilha Solteira
2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P125a Pádua, Hugo Garofalo de.
Análise da indústria 4.0 e o uso de suas tecnologias no auxílio da detecção de falhas prematuras de motores elétricos / Hugo Garofalo de Pádua. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
73 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Jean Marcos de Souza Ribeiro
Inclui bibliografia

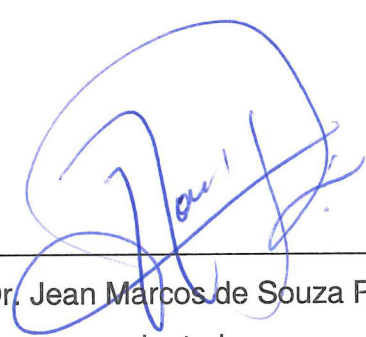
1. Sensores inteligentes. 2. Monitoramento. 3. Manutenção.


Raiane da Silva Santos

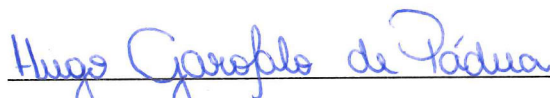
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e nove dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e dois, o discente **Hugo Garofalo de Pádua**, matriculado sob o nº 151050651, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro, o Doutorando Rodrigo Serra Daltin e o Doutorando Lucas do Carmo Yamaguti, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Análise da Indústria 4.0 e o uso de suas tecnologias no auxílio da detecção de falhas prematuras de motores elétricos" obtendo a nota 9,0 (NOVE) e conceito Aprovado.



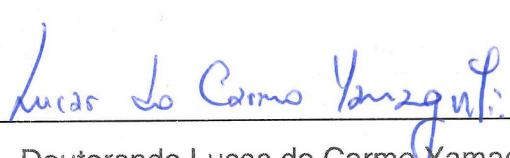
Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
- orientador -



Hugo Garofalo de Pádua
- discente -



Doutorando Rodrigo Serra Daltin
- Membro da Banca -



Doutorando Lucas do Carmo Yamaguti
- Membro da Banca -

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela minha vida, minha saúde, pela oportunidade, fé e sabedoria, pois sem estas coisas seria impossível chegar até aqui. Agradeço aos meus pais, Rosane e Luiz, por sempre me incentivarem a buscar uma formação de excelência. Obrigado pela educação, por todos os ensinamentos, pelo amor e união de sempre. Meu irmão Bruno pela ajuda, pelos conselhos e principalmente por ser minha referência. A minha namorada Carol pelo apoio, paciência nos momentos de ansiedade, apreensão e tempo dedicado a este trabalho. Aos meus colegas de sala da Engenharia Elétrica (Giovane, Leonardo, Antônio, Bruno, Lucas e Junio) pela amizade, pelo tempo de estudo em grupo e especialmente pela convivência nesse período acadêmico que passamos juntos. Ao meu orientador professor Jean, que apesar da alta demanda de alunos, ainda sim sempre esteve disposto a me ajudar e orientar da melhor forma.

RESUMO

Este trabalho apresenta a grande importância da fusão das técnicas e ferramentas da manutenção preditiva com as tecnologias inovadoras advindas da Indústria 4.0, visando o monitoramento de motores elétricos. Dada a relevância do motor elétrico de indução trifásico para os setores industriais é relevante o estudo e apresentação dos sensores inteligentes que transformaram o conceito de monitoramento de ativos. Com início em levantamentos de conceitos de manutenções e as principais falhas sofridas por motores elétricos, apresenta-se a nova concepção de monitoramento por sensores inteligentes e a mudança brusca na gestão de ativos.

Palavras-chave: Ativos, Indústria 4.0, manutenção, monitoramento, sensores inteligentes.

ABSTRACT

This work presents the great importance of merging predictive maintenance techniques and tools with innovative technologies arising from Industry 4.0, aiming at the monitoring of electric motors. Given the relevance of the three-phase induction electric motor for industrial sectors, it is relevant to study and present the smart sensors that transformed the concept of asset monitoring. Starting with surveys of maintenance concepts and the main failures suffered by electric motors, the new concept of monitoring by intelligent sensors and the sudden change in asset management is presented.

Keywords: Smart sensors, monitoring, assets, maintenance, Industry 4.0.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FASES DAS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS	15
FIGURA 2 - SISTEMAS CIBER FÍSICOS	16
FIGURA 3 - FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR CC	20
FIGURA 4 - CORTE TRANSVERSAL DE UM MOTOR CC DE DOIS POLOS	21
FIGURA 5 – VISTA EXPLODIDA DE UM MIT	22
FIGURA 6 - ESQUEMATIZAÇÃO DO MIT.....	23
FIGURA 7 - DIAGRAMA DO FUNCIONAMENTO DO MIT	24
FIGURA 8 - TIPOS DE DESALINHAMENTO	25
FIGURA 9 - DESBALANCEAMENTO ESTÁTICO	27
FIGURA 10 - DESBALANCEAMENTO CONJUGADO	27
FIGURA 11 - DESBALANCEAMENTO DINÂMICO	28
FIGURA 12 - PRINCIPAIS FALHAS REFERENTES AO ENROLAMENTO DO MIT.....	31
FIGURA 13 - ESTADOS DE UM EQUIPAMENTO OU ITEM.....	33
FIGURA 14 - CURVA DA BANHEIRA	34
FIGURA 15 - DIAGRAMA DOS PRINCIPAIS TIPOS DE MANUTENÇÕES.....	36
FIGURA 16 - COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE MANUTENÇÃO.....	37
FIGURA 17 - COMPARATIVO ENTRE OS TIPOS MAIS COMUNS DE MANUTENÇÃO.....	39
FIGURA 18 - WEG MOTOR SCAN.....	46
FIGURA 19 - PROCESSOS WEG MOTOR SCAN.....	46
FIGURA 20 - ABB ABILITY.	47
FIGURA 21 – REPRESENTAÇÃO SENSOR ABB INSTALADO EM UM MOTOR	47
FIGURA 22 - INTERFACE “SEMÁFORO” DO APP ABB ABILITY SMART SENSOR.....	48
FIGURA 23 - PROCESSOS DE FUNCIONAMENTO DO ABB ABILITY.	49
FIGURA 24 - SMART TRAC.	49
FIGURA 25 - SENSOR INTELIGENTE INSTALADO NO MOTOR ELÉTRICO.	50
FIGURA 26 - PROCESSAMENTO DOS DADOS COLETADOS.	50
FIGURA 27 - FAG SMARTCHECK	51
FIGURA 28 - FAG SMARTCHECK INSTALADA EM UM MOTOR ELÉTRICO.	51
FIGURA 29 - MOTOR MONITORADO.	53
FIGURA 30 - EXTRUSORA DE PET-FOOD.	53
FIGURA 31 - NOTIFICAÇÃO SOBRE O ATIVO.....	54
FIGURA 32 - DADOS COLETADOS E DADOS DO ATIVO.	54
FIGURA 33 - DADOS COLETADOS DE TEMPERATURA DO ATIVO	55
FIGURA 34 - ESPECTRO DE VIBRAÇÃO COLETADO DO ATIVO.	55
FIGURA 35 - ASSINATURA ESPECTRAL COLETADA.....	56
FIGURA 36 - ACELERÔMETRO DO TIPO PONTUAL ONEPRODE FALCON.....	57
FIGURA 37 - ANALISADOR DE VIBRAÇÃO ONEPRODE FALCON.....	58
FIGURA 38 - SENSOR MOTOR WEG SCAN INSTALADO NO ATIVO	58
FIGURA 39 - DADOS COLETADOS.....	59
FIGURA 40 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIA E VIBRAÇÃO DO ATIVO	60
FIGURA 41 - COMPARATIVO DE DADOS COLETADOS DOS DOIS DISPOSITIVOS.....	60
FIGURA 42 - COMPARATIVO DE INTERVENÇÕES NO ATIVO DE ESTUDO	61

FIGURA 43 - RETROSPECTO DE FALHAS DO ATIVO	61
FIGURA 44 - SMART TRAC INSTALADO EM UM ATIVO	64
FIGURA 45 - DESBALANCEAMENTO DETECTADO	65
FIGURA 46 - DESALINHAMENTO DETECTADO.....	65
FIGURA 47 - ESPECTRO DA VELOCIDADE RMS	66
FIGURA 48 - MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO NO ATIVO	68
FIGURA 49 - ALERTA GERADO DEVIDO AO AUMENTO NO NÍVEL GLOBAL DE VIBRAÇÃO	68

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: DADOS SOBRE OS CUSTOS DA MANUTENÇÃO NO BRASIL.	35
TABELA 2 - LIMITES ESTABELECIDOS PELA WEG	54
TABELA 3 - COMPARATIVO ENTRE OS DADOS COLETADOS PELOS DISPOSITIVOS	60

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: CARACTERÍSTICAS DE QUEIMA E POSSÍVEIS CAUSAS.	31
QUADRO 2: PADRÕES DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE VIBRAÇÃO.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CIP	Processos de Integração de Contexto
IA	Inteligência Artificial
IoT	Internet das Coisas
MIT	Motor de Indução Trifásico
RPM	Rotações por minuto
RUL	Vida Útil Restante
WSN	Rede de Sensores Sem Fio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO TEÓRICA	12
1.1	Revoluções Industriais	12
2	MÁQUINAS ELÉTRICAS	19
2.1	Motores elétricos CC	19
2.2	Motores Elétricos CA	21
2.3	Falhas em Motores Elétricos de Indução	24
2.3.1	Desalinhamento do Eixo	25
2.3.2	Sobrecarga	26
2.3.3	Desgastes do Rolamento	26
2.3.4	Desbalanceamento do Eixo	27
2.3.5	Folga do Eixo	28
2.3.6	Transientes de Tensão	28
2.3.7	Distorções Harmônicas	29
2.3.8	Corrente Sigma	29
2.3.9	Fases desbalanceadas	30
2.3.10	Falhas em Enrolamentos	30
2.4	Manutenção em Motores Elétricos	32
2.4.1	Manutenção Corretiva	37
2.4.2	Manutenção Preventiva	38
2.4.3	Manutenção Preditiva	38
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
3.1	Sensores Inteligentes	41
3.1.1	WEG Motor Scan	45
3.1.2	ABB Ability	47
3.1.3	Smart Trac	49
3.1.4	FAG SmartCheck	51
3.2	Estudos de Casos	52
3.2.1	Estudo de Caso 1	52
3.2.2	Estudo de Caso 2	57
3.2.3	Estudo de Caso 3	62
3.2.4	Estudo de Caso 4	67
4	CONCLUSÃO	70
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1 INTRODUÇÃO TEÓRICA

A motivação para a realização do presente trabalho de graduação contextualizando este tema, 'Análise da indústria 4.0 e o uso de suas tecnologias no auxílio da detecção de falhas prematuras de motores elétricos', teve início após o período de estágio no setor de manutenção em máquinas elétricas. Durante o estágio, verificou-se a importância dos motores elétricos para o cenário industrial, pois os mesmos são os responsáveis por manterem em funcionamento as linhas de produção. Assim sendo, por serem máquinas valiosas, é necessário planejamento para que imprevistos não aconteçam.

Entretanto, na prática notou-se muitos casos de emergências em que os clientes se encontravam em situações delicadas como máquinas paradas (ou seja, prejuízos) e sem equipamentos para reposição. Sempre recorrendo à manutenção corretiva, o que encarece ainda mais a manutenção por se tratarem de situações emergenciais. Além de sinalizar falhas ou a pouca eficácia da manutenção preventiva, que tem por objetivo diminuir tais emergências.

O conceito da Indústria 4.0 chegou e trouxe diversas inovações tecnológicas, inclusive para o setor industrial, trazendo novas perspectivas à manutenção preditiva. O mercado tem disponibilizado alternativas para melhorar a gestão de ativos, diminuir imprevistos, urgências e prejuízo às empresas. Foi aprofundado e destacado as novas perspectivas da manutenção preditiva juntamente com a Indústria 4.0 com relação ao monitoramento e, principalmente, na detecção de falhas prematuras em motores elétricos.

1.1 Revoluções Industriais

O surgimento da tecnologia e seu desenvolvimento ao longo da história, revela sua extrema importância em relação à evolução da humanidade. Diante de situações de dificuldades e necessidades, foram criadas ferramentas para auxiliarem e facilitarem os trabalhos do dia a dia, resultando no aumento da produtividade. Assim, para toda evolução vivenciada pela humanidade, de certa forma, sempre houve e haverá evoluções tecnológicas.

No decorrer da história, quatro momentos ficaram marcados e ganharam grande importância no que se diz respeito às inovações tecnológicas, as quatro Revoluções Industriais.

A Primeira Revolução Industrial teve início por volta do século XVIII (1760 – 1850), promovendo grandes mudanças, tendo como característica mais significativa a mudança nos processos de produção. Houve substituição da produção manual por utilização de máquinas, assim resultou o surgimento de várias indústrias, o que consequentemente aumentou a escala de produção, relações de trabalho e consolidou o processo de capitalismo (SACOMANO et al, 2018).

A Segunda Revolução Industrial continuou o processo da Primeira, se deu na metade século XIX (1850 - 1870) e terminando no fim da Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945). Essa revolução marcou o novo período na industrialização, expandindo-se para vários países além da Inglaterra.

Nessa época as fontes de energia como ferro, carvão e energia a vapor foram substituídas por aço, eletricidade, petróleo (motor à combustão), água (hidrelétricas) e urânio (energia nuclear). A inovação tecnológica desse período promoveu também a revolução dos transportes (trens, navios, automóveis e aviões), além de outras invenções como o telégrafo, telefone, fotografia, televisão e lâmpada elétrica, que contribuíram para encurtar distâncias, possibilitando a produção em massa, automatização do trabalho e surgimento de mais indústrias, principalmente indústrias químicas, elétricas e siderúrgicas (SACOMANO et al, 2018).

A respeito da Terceira Revolução Industrial ou Revolução Técnico-científica como é também conhecida, ocorreu em meados do século XX (em 1950), apresentando maior impacto dentre as revoluções passadas, pois além de abranger inovações quanto ao processo da produtividade, ocorreram grandes transformações e a expansão no mundo científico, como robótica, genética, informática, telecomunicações e eletrônica surgiram com certo destaque. Outro aspecto importante dessa revolução, devido ao avanço tecnológico, seria o surgimento da globalização, responsável por romper barreiras, aproximando as diferentes sociedades e nações, nos âmbitos econômico, social, cultural e político (SACOMANO et al, 2018).

No início do século XXI, o mundo passou a desfrutar de diversas transformações que vieram à tona devido ao desenvolvimento tecnológico. No entanto, uma dessas transformações, um fenômeno conhecido como digitalização ou

transformação digital em que se tornou algo comum e de fácil acesso à internet, utilização de computadores e celulares. Assim, empresas viram a oportunidade de implementarem uma mentalidade digital em todos os seus setores (DALENOGARE et al., 2019).

Consequentemente, a digitalização impulsionou empresas e governos a refletirem sobre todas as novas tecnologias e fenômenos que estavam surgindo. Desse modo, em 2011, na Feira de Hannover, o governo alemão apresentou o projeto Plataforma Indústria 4.0 cujo objetivo era a troca de informações entre máquinas e humanos. Essa interação dava-se por meio da comunicação entre os sistemas automatizados, que são responsáveis por controlarem os equipamentos industriais. (SACOMANO et al, 2018).

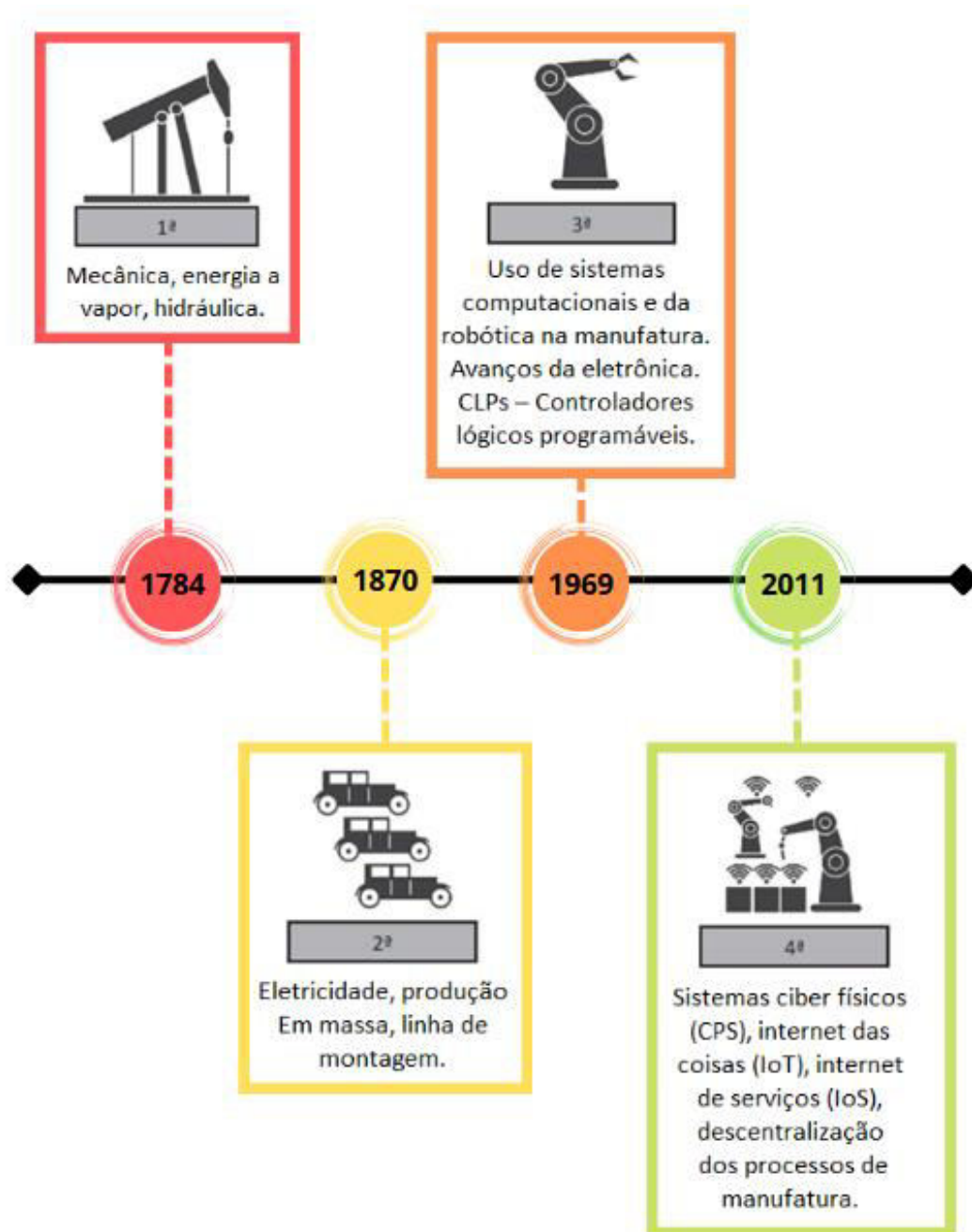
Apresentando como ponto de partida a Feira de Hannover, como citado anteriormente, a Indústria 4.0 não visa apenas a inovação tecnológica, mas também uma transformação em todos os setores e processos industriais, desde a produtividade até a geração de novas estratégias e modelos de negócios para a indústria.

Outra característica importante é que toda a linha de produção pode ser acessada e controlada remotamente, assim, há o surgimento de plantas industriais virtuais, o que possibilita realizar simulações online, quando for necessário otimizar algum setor, reduzindo possíveis problemas futuros. Logo, os sistemas são capacitados em procurar indícios e possíveis falhas, além de notificar os responsáveis para ser realizado a manutenção.

Dessa maneira, pode-se imaginar as grandes mudanças positivas que a Indústria 4.0 trará revolucionando as antigas maneiras ou tradições dos setores industriais.

Na Figura 1, está representado todas as fases e evoluções que as revoluções tecnológicas proporcionaram para a humanidade.

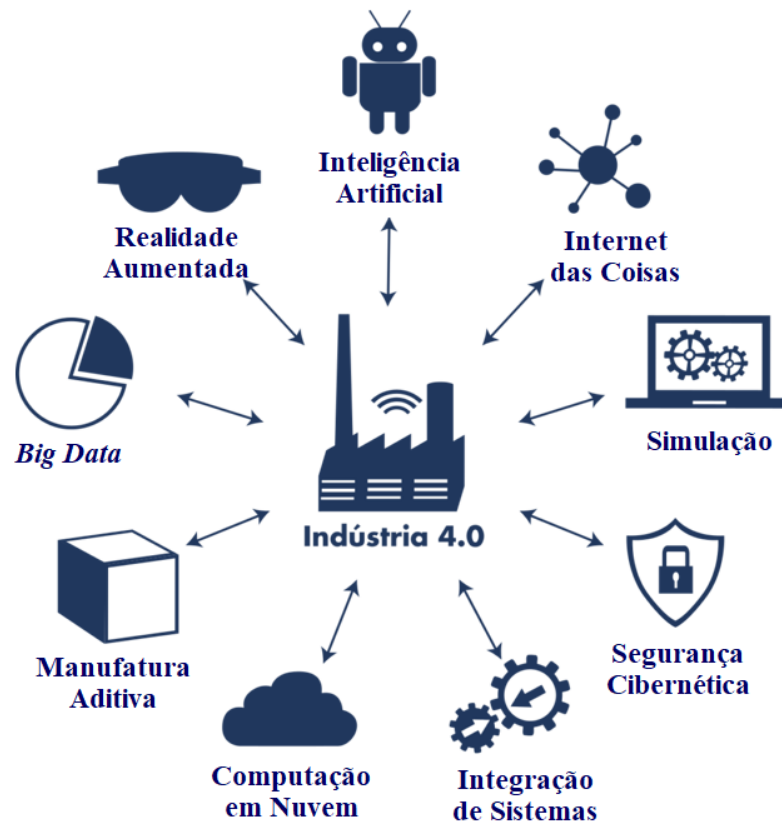
Figura 1 - Fases das revoluções industriais



Fonte: Adaptado SACOMANO et al (2018).

Na Figura 2 seguem em destaque as principais inovações tecnológicas e os pilares para que a Indústria 4.0 seja uma realidade tangível e não apenas um conceito.

Figura 2 - Sistemas Ciber Físicos



Fonte: Adaptado DIAS, (2022).

Conforme Figura 2, a Indústria 4.0 apresenta alguns pilares para que seu conceito saia da teoria e apresente-se na prática realmente.

- **Big Data** ou **Data Analytics**: se trata da gestão de dados para serem armazenados e processados, tendo como base três princípios: volume, velocidade e variedade. Assim, devido a grande quantidade de dados processados e utilizando os softwares específicos, o **Big Data** pode proporcionar ao usuário estruturar metas, criar indicadores, tomar decisões e criar boas estratégias de negócios. (ALMEIDA, 2019).
- **Computação em Nuvem**: já é muito conhecido dentro da comunidade científica, sendo que atualmente é algo acessível para qualquer pessoa utilizar no dia a dia. Essa tecnologia é um modelo de rede que possibilita acesso de qualquer dispositivo e em qualquer lugar. Configurando conjuntos de recursos de computação compartilhados, configuráveis (por exemplo, redes, servidores, armazenamento, aplicativos e serviços). No entanto, no aspecto da Indústria

4.0 a computação em nuvem terá aumento de capacidade e velocidade de processamento (PAZ, A.C. et al., 2020).

- Internet das Coisas: refere-se a um processo que interliga todas as tecnologias, utilizando sensores, e os torna conectados todos à internet. Ou seja, a “IoT” é capaz de captar informações sobre algo físico e transmitir o mesmo para uma rede conectada e compartilhada, o que resulta em otimização de operações. Este processo é fundamental quando se trata de manutenção preditiva (RADETZKE et al., 2020).
- Sistemas Integrados: trata-se da conexão de dados e informações de diversos departamentos em um ambiente central, resultando em troca de informações entre os diferentes departamentos. Logo, apresentando o controle das informações como um todo em tempo real, influenciam positivamente nas tomadas de decisões, tornando-as mais rápidas, tal como as mudanças estratégicas da empresa referentes sobre negócio, apresentado maior facilidade em implementação nas plantas de produção (BORLIDO, 2017).
- Segurança Cibernética: esta tecnologia é essencial e uma consequência dos pilares anteriormente citados, isto porque em uma gestão altamente conectada à internet, com dados armazenados, processados e transportados todos virtualmente por sistemas interligados, é obrigação uma grande proteção para todos esses dados e sistemas integrados à internet (BORLIDO, 2017).
- Inteligência Artificial (I.A.): outra inovação causada pela Quarta Revolução Industrial é a evolução das máquinas, que não só seguem as programações determinadas, mas também são capazes de aprender e melhorar gradualmente, por meio de sensores. Desta forma, além das máquinas interagirem com os homens, começam a interagir entre si, resultando em uma enorme eficiência nos processos industriais. Essas interações compreendem-se em análises avançadas baseadas em lógica, interpretação de dados e ações, análise comportamental de sistemas e com todas as características anteriores citadas, auxilia nas tomadas de decisões (RADETZKE et al., 2020).
- Simulação: este avanço tecnológico permite que a empresa crie em um ambiente virtual, a planta industrial, produtos, processos, máquinas e pessoas (funcionários), assim, usado corretamente, pode proporcionar redução de

custos relacionados a tempos de projetos e falhas, possibilitando para tudo testes virtuais (BORLIDO, 2017).

- Manufatura Aditiva: mais conhecido como impressão 3D ou tridimensional, permitindo a empresa produzir protótipos e peças personalizadas através de desenhos digitais, por meio de *softwares* de modelagem digital, proporcionando rapidez e redução de custos (BORLIDO, 2017).
- Realidade Aumentada: visando geralmente a melhoria da produtividade em situações que necessitam de agilidade referente a tempo de resposta, essa inovação pode ser utilizada de várias maneiras, como por exemplo, análise de uma planta industrial no formato tridimensional. A realidade aumentada é nada mais que a sobreposição de objetos virtuais no mundo real, resultando em um aumento na produtividade e redução dos custos nos processos (SACOMANO et al, 2018).

No Capítulo 2 será realizada uma revisão bibliográfica a respeito de máquinas elétricas com uma ênfase nos motores de indução trifásico (MIT), bem como suas principais falhas e tipos de manutenções.

No Capítulo 3 será realizado uma discussão sobre os resultados da pesquisa bibliográfica sobre os sensores inteligentes de interesse deste trabalho e alguns estudos de caso, de modo a avaliar sua eficácia na predição de falhas.

No Capítulo 4 será feita uma conclusão acerca do assunto estudado no trabalho.

2 MÁQUINAS ELÉTRICAS

Analisando qualquer planta industrial, pode-se notar algumas semelhanças. No entanto, um item que é considerado indispensável e, até o momento insubstituível são as máquinas elétricas, que apresentam duas categorias: rotativas e estacionárias. Com relação às máquinas elétricas estacionárias são conhecidas como transformadores, que são dispositivos que convertem a energia CA (corrente alternada) de uma certa frequência e nível de tensão em energia elétrica CA com a mesma frequência, contudo, em outro nível de tensão, resultando em aumento ou redução da mesma (UMANS, 2014).

Referente às máquinas elétricas rotativas apresentam-se duas categorias, sendo os populares geradores e motores elétricos. Estes dispositivos apresentam como funcionalidade tanto a conversão de energia elétrica em mecânica, quanto a conversão de energia mecânica em energia elétrica. Outro ponto importante é que as máquinas rotativas podem ser tanto de corrente contínua (CC) ou de corrente alternada (CA) (JÚNIOR E SILVA, 2018).

Neste trabalho de graduação o objetivo está direcionado às falhas prematuras em motores elétricos, dessa forma, será dada maior ênfase nessa categoria de máquinas elétricas (KOSOW, 1982).

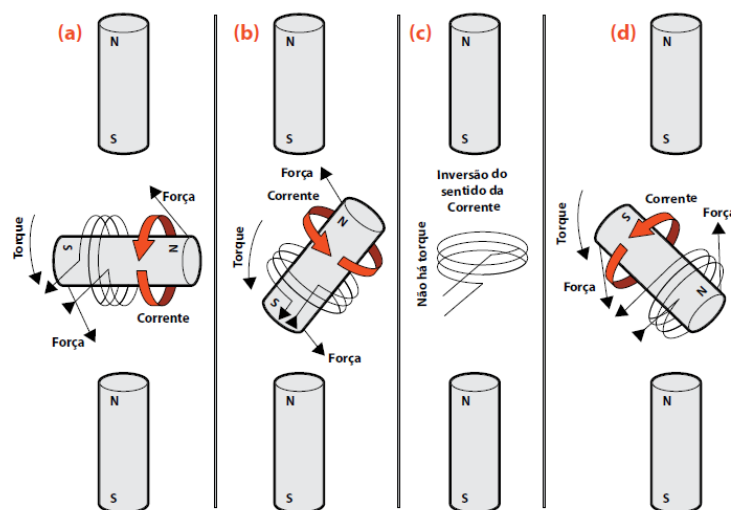
No conceito atual, entende-se como conversão eletromagnética de energia a associação das forças magnéticas e elétricas de átomos com a força mecânica sobreposta a uma matéria, resultando em movimento (KOSOW, 1982).

2.1 Motores elétricos CC

A diferença do motor de corrente contínua para os demais é que neste caso, deve-se alimentá-lo com tensão contínua. No caso de pequenos motores, a tensão contínua pode ser obtida por meio de pilhas e baterias, já para motores maiores, é necessário utilizar uma rede alternada após retificação. A forma construtiva de um motor CC, ilustrada na Figura 3, é baseada principalmente em três elementos:

- Estator apresenta o enrolamento de campo, cuja alimentação é realizada diretamente por uma fonte de tensão contínua. No caso de um modelo de motor menor, o estator pode ser um simples ímã permanente;
- Rotor apresenta o enrolamento de armadura, cuja alimentação é realizada diretamente por uma fonte de tensão contínua por meio do comutador e escovas;
- Comutador trata-se de um dispositivo mecânico (tubo de cobre axialmente segmentado) em que estão conectados os terminais das espiras da armadura. Esse dispositivo tem como objetivo inverter o sentido da corrente que circula na armadura.

Figura 3 - Funcionamento de um motor CC

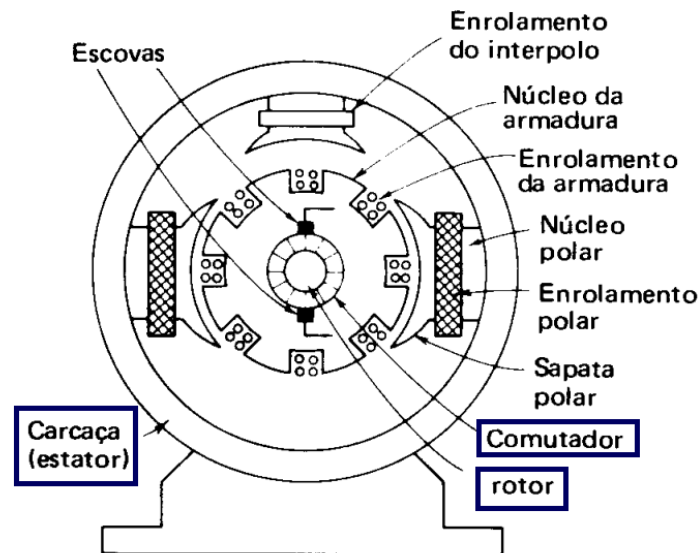


Fonte: (HONDA, 2006).

O funcionamento de um motor CC é baseado na teoria de eletromagnetismo, no qual um condutor que transporta uma corrente elétrica e, também é atravessado por um fluxo magnético é submetido a uma força magnética (Força de Lorentz). Vale ressaltar que as direções de fluxo, corrente e da força magnética são sempre ortogonais entre si, ou seja, irão apresentar um ângulo de 90° entre si (UMANS, 2014).

Durante o funcionamento do motor CC há a criação do torque, que é responsável em movimentar o rotor (armadura). Na Figura 4 está ilustrado o corte transversal de um motor CC de dois polos.

Figura 4 - Corte transversal de um motor CC de dois polos



Fonte: Adaptado KOSOW (1982).

Analisando a Figura 4, pode-se verificar que o enrolamento do campo (estator) está dividido em duas partes (por ser um motor de dois polos) ligadas em série, resultando em um fluxo magnético de sentido norte-sul. A armadura (rotor) é constituída por diversas espiras enroladas em um núcleo ferromagnético, além de apresentarem seus terminais conectados em dois segmentos do comutador.

A corrente que circula pelo circuito, é inserida por meio de duas escovas (de grafite), é fornecida por uma fonte CC. O comutador tem como objetivo trocar periodicamente o sentido da corrente na armadura, de forma que o torque eletromecânico apresente sempre o mesmo sentido, isto é, o comutador impede que a armadura do motor fique paralisada devido a posição de equilíbrio (KOSOW, 1982).

De acordo com a quantidade de fontes CC utilizadas e da forma como os enrolamentos de campo e armadura são conectados e excitados, há uma grande variedade de características de operação de motores CC.

2.2 Motores Elétricos CA

Os tradicionais motores elétricos de CA são categorizados basicamente em monofásicos e trifásicos, eles são mais utilizados e populares devido ao fácil acesso

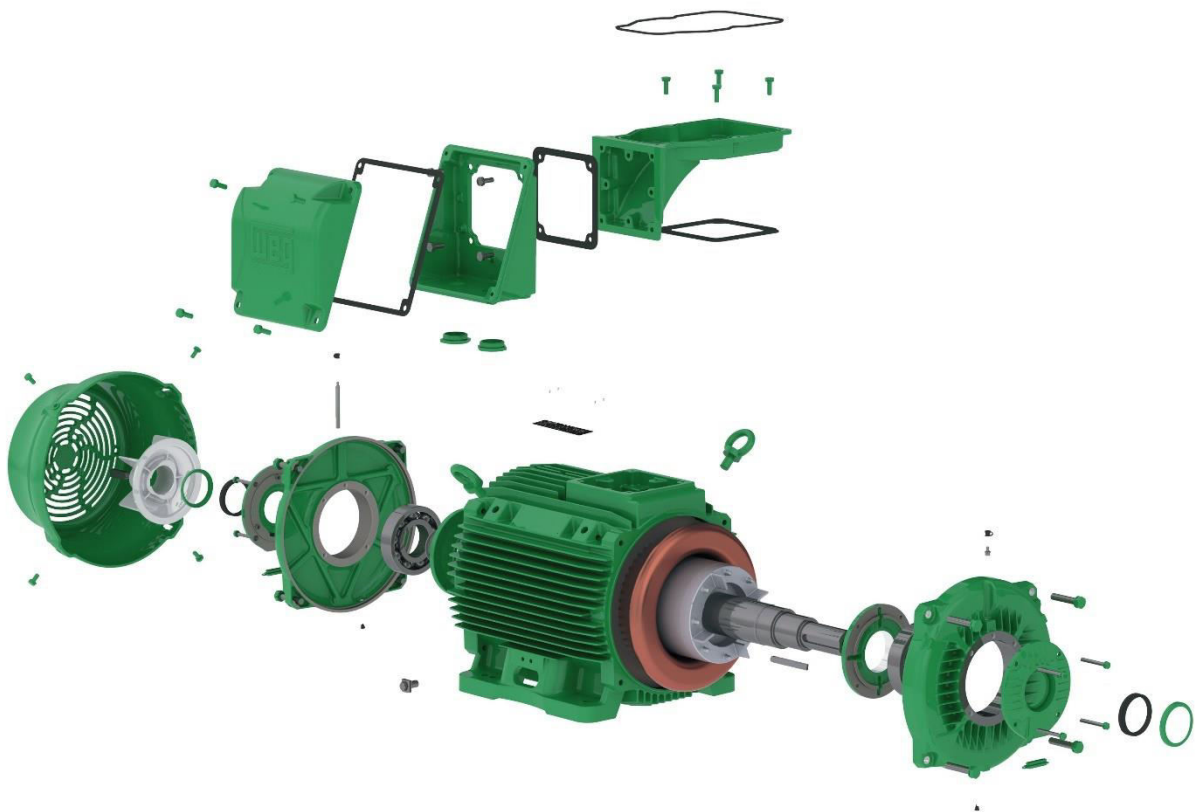
às tensões e correntes CA do que as grandezas elétricas CC. Os principais tipos desses motores são conhecidos como síncronos e assíncronos (de indução).

O motor síncrono é caracterizado por funcionar com uma velocidade fixa, portanto, é apenas utilizado para grandes potências ou quando se necessita de um motor com velocidade fixa. Os motores síncronos em tamanhos menores apresentam um alto custo de investimento, então as empresas optam por outras opções.

Com relação ao motor de indução trifásico (MIT) é caracterizado por funcionar com uma velocidade constante, que pode variar ligeiramente devido à carga mecânica aplicada em seu eixo. Por apresentar aspectos construtivos simples, robustos e de baixo custo, é o motor mais popular e utilizado em relação a todos os outros motores. Outra facilidade que apresenta é que pode ser adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas que são encontradas na prática (KOSOW, 1982).

Como dito anteriormente, neste trabalho devido ao seu objetivo, será abordado com maior ênfase a essa classe de motores elétricos (MIT). Na Figura 5 está ilustrado a vista explodida e os principais elementos que compõem um MIT.

Figura 5 – Vista explodida de um MIT

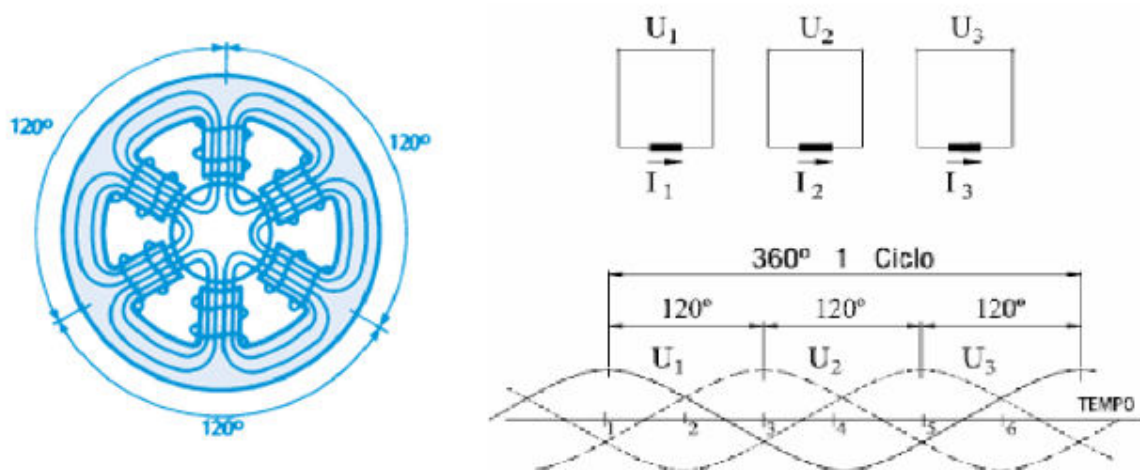


Fonte: (WEG, 2020).

Essencialmente, os principais elementos de um MIT referem-se ao rotor e estator. O rotor apresenta três tipos: gaiola de alumínio, gaiola de barras e bobinado. Eixo, barras e anéis de curto e núcleo de chapas são elementos que compõem o rotor. Já o estator é composto por um núcleo de chapas (inserido dentro da carcaça do motor) e enrolamento trifásico (disposto dentro das ranhuras do núcleo de chapas) (UMANS, 2014).

O princípio de funcionamento do MIT é baseado na mesma teoria dos demais motores elétricos, isto é, baseia-se na interação do fluxo magnético com uma corrente em um condutor, resultando em uma força neste condutor. Força esta que é proporcional às intensidades de fluxo e de corrente, $\vec{F} = (\vec{il}) \times \vec{B}$. O estator é responsável por produzir o fluxo magnético, enquanto o rotor produz a corrente que interage com o fluxo. No estator, que é a parte fixa, estão montados três enrolamentos, conforme segue ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Esquemática do MIT



Fonte: Adaptado WEG (2022).

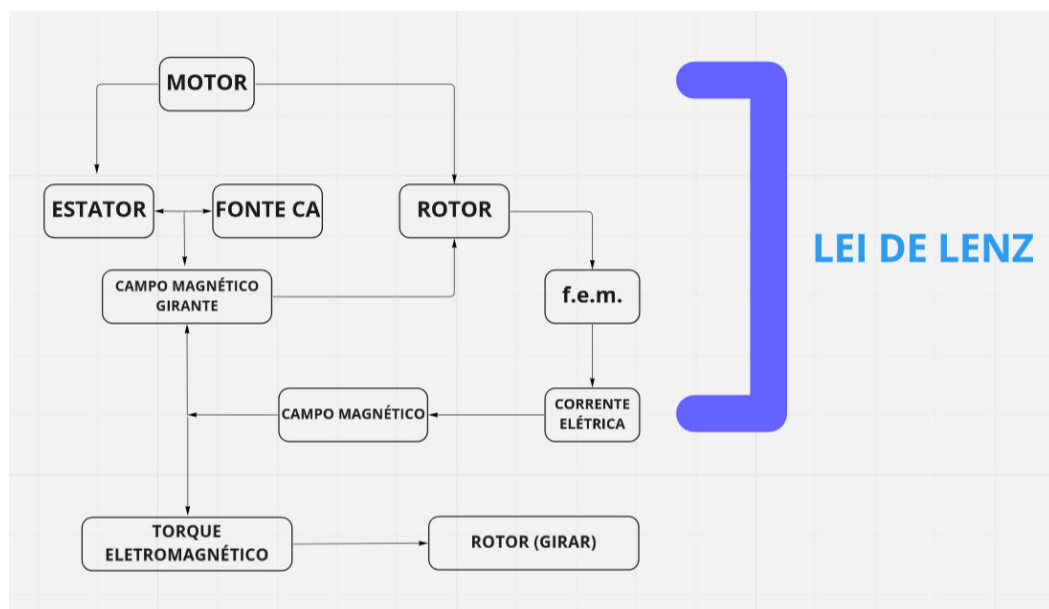
Enrolamentos esses que são ligados à rede de alimentação CA, o que permite ligá-los em estrela ou triângulo. Para realizar a alimentação do MIT utiliza-se uma fonte de tensão trifásica e equilibrada, dessa maneira, as correntes elétricas presentes no estator (armadura) estarão defasadas em 120° entre si. Estas correntes são responsáveis por produzirem um fluxo de um campo magnético resultante girante em

relação à armadura, possibilitando a indução do rotor em seus enrolamentos por tensões (JÚNIOR E SILVA, 2018).

Com tais enrolamentos em curto-circuito à medida que o fluxo percorre os condutores do rotor, uma força eletromotriz (*fem*) induz os condutores, assim, certas correntes irão surgir no rotor. Os condutores do rotor (com corrente elétrica) interagem com o fluxo magnético girante do estator, produzindo um torque eletromagnético que atua sobre os condutores do rotor, fazendo-os girar.

No entanto, como o fluxo do estator gira continuamente, o rotor não consegue se alinhar a ele, de forma que a velocidade do rotor é sempre menor do que a velocidade síncrona (velocidade do fluxo do campo girante). Por isso o MIT também é chamado de motor elétrico assíncrono, por não poder operar na velocidade síncrona. Essa diferença de velocidade é chamada de escorregamento (“s” que vem de *slip*). Na Figura 7, apresenta um diagrama para melhor entendimento do funcionamento do MIT.

Figura 7 - Diagrama do funcionamento do MIT



Fonte: Autoria própria (2022).

2.3 Falhas em Motores Elétricos de Indução

Como citado anteriormente, o motor elétrico corresponde ao elemento de supra importância de qualquer empresa, pois é o grande responsável pelo

acionamento das linhas de produção. Devido sua relevância, manter essas máquinas em funcionamento e manter o rendimento operacional alto, tornou-se o grande desafio a ser solucionado por gestores e engenheiros. Os motores elétricos, como qualquer outro equipamento, estão sujeitos a sofrerem falhas ou até mesmo não serem mais capazes de realizarem suas funções.

Devido à sua importância dentro da planta industrial, as falhas de motores elétricos podem resultar em diversos prejuízos à empresa, principalmente a parada da linha de produção. As falhas podem apresentar tanto origem de natureza elétrica quanto mecânica, por isso, há uma ampla diversidade de falhas e suas consequências que o motor elétrico e seus componentes podem vir a apresentar.

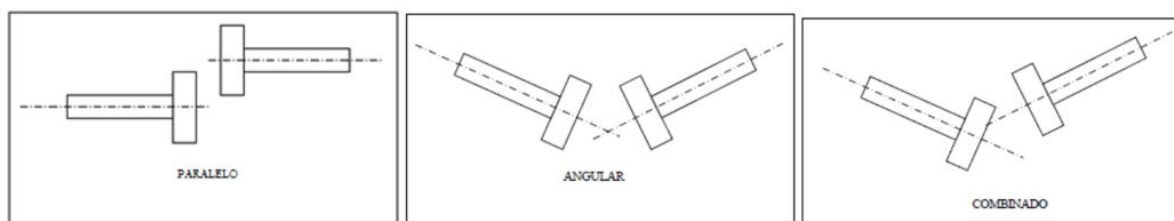
Portanto, para estes ativos continuarem operando dentro de padrões satisfatórios e evitarem custos e perdas produtivas, é fundamental conhecer as principais causas das falhas. Portanto, nos próximos tópicos abaixo serão abordadas as causas mais comuns de falhas que podem ocorrer em motores elétricos.

2.3.1 Desalinhamento do Eixo

O desalinhamento nas máquinas ocorre quando as linhas de centro dos eixos de rotação de duas, ou mais, máquinas acopladas não coincidem uma com a outra, formando ângulo de 0° entre si. Outra forma de ocorrer o desalinhamento é quando os eixos se encontram paralelos entre si. Ou seja, acontece devido ao mau alinhamento entre as peças e é considerado a segunda fonte de vibração que mais prevalece (SILVA, 2006).

Os desalinhamentos podem apresentar-se de três formas distintas: desalinhamento paralelo ou radial, desalinhamento angular ou axial, e desalinhamento combinado, como pode-se notar na Figura 8.

Figura 8 - Tipos de desalinhamento



Fonte: Adaptado SILVA (2006).

Os sintomas mais comuns relacionados ao desalinhamento de eixos são o aumento da vibração nos equipamentos; elevação de temperatura nos mancais; parafusos soltos ou frouxos; vazamento de óleo; falha prematura em elementos elásticos dos acoplamentos.

2.3.2 Sobrecarga

A sobrecarga acontece quando há uma exigência de torque no motor além da sua capacidade máxima. Essa situação faz com que a corrente elétrica de operação seja maior do que a nominal, causando sobreaquecimento. Com o motor trabalhando a uma temperatura mais alta, a vida útil do equipamento pode diminuir, ou até mesmo levar a queima do bobinado (estator). Os sintomas podem ser superaquecimento, consumo excessivo de corrente e torque insuficiente.

2.3.3 Desgastes do Rolamento

Segundo Araújo Romero (2011), mais da metade das manutenções tem ligação direta com problemas nos rolamentos dos motores elétricos. Os ruídos excessivos, vibrações, aumento da temperatura no funcionamento, entre outros, são os principais indícios de que há problemas com o rolamento. Em linhas gerais, podemos classificar as falhas de rolamento em pré-operacionais e operacionais.

Falha pré-operacional diz respeito a danos que podem acontecer durante a instalação do rolamento, como por exemplo: desalinhamento estático, ajuste impreciso do eixo e caixa de mancal, assentos de rolamentos nos eixos e nas caixas de mancal defeituosos, manuseio, armazenagem, tensão excessiva por passagem de corrente elétrica no rolamento e transporte, etc.

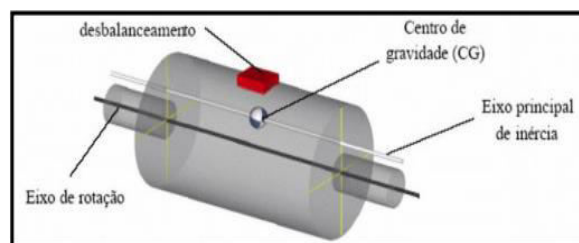
Já as falhas operacionais compreendem basicamente lubrificação ou vedação ineficientes, falso brinelamento, fadiga do material, fuga de corrente (devido à passagem de corrente elétrica pelo rolamento) e desalinhamento operacional. As falhas de rolamento geralmente criam um efeito cascata, que acelera as falhas nos motores elétricos.

2.3.4 Desbalanceamento do Eixo

Balanceamento é o processo em que busca melhorar a distribuição de massa de um corpo, de modo que ele gire em torno de seu eixo sem que surjam forças centrífugas desbalanceadas. Existe três situações cujo a distribuição de massa não é uniforme, conforme ilustram as Figuras 09, 10 e 11, produzindo respectivamente os desbalanceamentos dos tipos estático, conjugado e dinâmico:

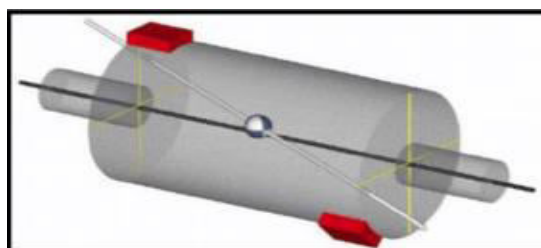
- Desbalanceamento Estático: O desbalanceamento estático acontece quando o eixo de massa não coincide com o eixo giratório e é paralelo a ele. Isto também é conhecido como desbalanceamento em um plano.
- Desbalanceamento Conjugado: O desbalanceamento conjugado está presente quando o eixo de massa não coincide com o eixo giratório, no centro de gravidade do rotor.
- Desbalanceamento Dinâmico: O desbalanceamento dinâmico é definido como aquela condição onde o eixo de massa não coincide com o eixo giratório, não é paralelo a ele e não o intersecta. Esta condição também é conhecida como desbalanceamento em dois planos, e é uma combinação dos desbalanceamentos estático e dinâmico.

Figura 9 - Desbalanceamento estático



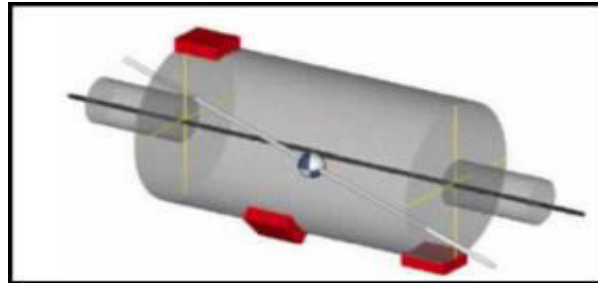
Fonte: (CAMPOS et al., 2013)

Figura 10 - Desbalanceamento conjugado



Fonte: (CAMPOS et al., 2013)

Figura 11 - Desbalanceamento dinâmico



Fonte: (CAMPOS et al., 2013)

2.3.5 Folga do Eixo

Com o passar do tempo ou por utilizar peças fabricadas com materiais de baixa resistência, o movimento do motor pode ocasionar desgastes que alteram o ajuste das peças, criando folgas entre elas. Isso é extremamente prejudicial para seu bom funcionamento. A classificação se dá conforme a orientação em que ocorre o desgaste: axial ou radial. A manutenção deve estar atenta aos sintomas de problemas com folga de eixo como por exemplo: ruídos excessivos, sobreaquecimento, alto consumo de energia, trepidações e baixo rendimento. Para evitar esses problemas é importante monitorar ou fazer inspeções preventivas, além de usar peças feitas com materiais resistentes e usar os ajustes corretos durante a montagem.

2.3.6 Transientes de Tensão

Transientes de tensão correspondem a sinais de tensão transitórios que surgem quando há acionamento de circuito ou carga, também são conhecidos como “picos de tensão” ou “surtos”. Esse fenômeno está relacionado à qualidade de energia dos setores industriais. Por se tratar de um grande pico de interferência eletromagnética, dependendo de seus valores de pico e frequência, podem causar danos aos equipamentos ligados ao circuito (isolação do enrolamento do motor). No pior dos casos, o motor pode parar sua operação devido às falhas no isolamento ou enrolamentos. Sem o isolamento em boas condições o motor fica fora de operação e implica na parada da linha de produção a ele associada.

2.3.7 Distorções Harmônicas

As grandezas elétricas presentes no sistema elétrico de potência são constituídas, principalmente, de componentes principais caracterizadas por operar há 60 Hz. Contudo, na presença de cargas não lineares, a forma de onda de tensão/corrente pode sofrer distorções que estão associadas à introdução de harmônicas na rede, que são sinais cuja frequência é um múltiplo da frequência nominal da rede. No caso dos motores, a distorção harmônica pode ser entendida como uma fonte adicional de energia que circula pelos enrolamentos, gerando perdas adicionais de energia (que acontece na forma de geração de calor).

Além do aumento da temperatura, as distorções também diminuem a eficiência do motor. Tais perdas, ao longo do tempo, podem causar a deterioração da capacidade de isolamento dos enrolamentos. Em consequência disso, podemos observar problemas como aumento da temperatura de operação do ativo e perda gradual de eficiência do motor. Cada harmônico tem um nível diferente aceitável de distorção, que é definido por normas como a IEEE 519-1992. A presença desse tipo de distorção deve ser monitorada e diagnosticada com um analisador de energia. Com ele, é possível fazer a medição e monitoramento dos níveis da corrente elétrica e das temperaturas nos transformadores (ABECOM, 2022).

2.3.8 Corrente Sigma

São as correntes parasitas que circulam por um circuito elétrico, geradas por frequência no sinal, nível de tensão, capacitâncias e indutâncias associadas aos condutores elétricos. Estas correntes causam a perda de eficiência e diminuição da vida útil. Ao circularem por sistemas de proteção para terra, as correntes sigma podem causar disparos intempestivos e até mesmo o excesso de calor nos enrolamentos do motor. As correntes elétricas sigma são encontradas nos cabos do motor, e representam a soma da corrente das três fases em qualquer ponto no tempo. Um cenário ideal estabelece que a soma das correntes seja sempre igual a zero, ou seja, a corrente de retorno a partir da unidade deveria se igualar à corrente para a unidade. Para prevenir o problema, é recomendável utilizar condutores bem dimensionados e de qualidade.

2.3.9 Fases desbalanceadas

Os motores em operação na indústria são em sua maioria do tipo indução com gaiola de esquilo. São motores assíncronos alimentados por circuitos trifásicos. Para a operação correta do motor e geração do campo girante, é importante que as três fases que alimentam o estator estejam balanceadas. O consumo excessivo de corrente em uma das fases pode causar sérios danos a toda estrutura relacionada aos motores. Então, quando ocorre um desequilíbrio na distribuição de carga de impedância, o problema pode-se desencadear para as três fases, gerando um fluxo de correntes excessivas que culminam no aumento da temperatura de operação. Inclusive servir de gatilho para incêndios.

O desbalanceamento se apresenta em forma de superaquecimento e problemas da isolação dos enrolamentos. Isso acontece por conta de projetos mal dimensionados quanto ao consumo de energia, ou pelo acréscimo posterior de cargas que não estavam previstas. Por isso, toda e qualquer alteração na planta deve ser previamente analisada afim de evitar que ocorram problemas como este (ABECOM, 2022).

2.3.10 Falhas em Enrolamentos

Na Figura 12 pode-se verificar as principais falhas referentes aos enrolamentos, juntamente com o Tabela 1 que contém todas as possíveis causas.

Figura 12 - Principais falhas referentes ao enrolamento do MIT



Fonte: (WEG, 2022).

Quadro 1: Características de queima e possíveis causas.

CARACTERÍSTICAS DE QUEIMA	POSSÍVEIS CAUSAS
Curto entre espiras ou Bobina curto-circuitada	➤ Contaminação interna do motor; ➤ Falha do esmalte de isolamento; ➤ Falha do verniz de impregnação; ➤ Rápidas oscilações na tensão de alimentação.
Curto entre fases	➤ Contaminação internado motor; ➤ Degradação do material isolante por ressecamento, ocasionada por excesso de temperatura;

	➤ Falha do material isolante.
Curto na conexão	➤ Contaminação interna do motor; ➤ Falha do material isolante; ➤ Superaquecimento da conexão devido a mau contato.
Curto na saída da ranhura ou Curto no interior da ranhura	➤ Contaminação interna do motor; ➤ Degradação do material isolante por ressecamento, ocasionada por excesso de temperatura; ➤ Falha do esmalte de isolamento do fio; ➤ Falha do verniz de impregnação; ➤ Falha do material isolante; ➤ Rápidas oscilações na tensão de alimentação.
Pico de tensão	➤ Motor acionado por inversor de frequência com alguns parâmetros incorretos (amplitude do pulso de tensão, <i>rise time</i>, <i>dV/dt</i>, distância entre pulsos, frequência de chaveamento); ➤ Oscilação violenta na tensão de alimentação, por exemplo, descargas atmosféricas; ➤ Surto de manobra de banco de capacitores.
Desbalanceamento de tensão	➤ Desequilíbrio de tensão e/ou de corrente entre as fases; ➤ Falha em banco de capacitores; ➤ Maus contatos em conexões, chaves, contadores, disjuntores, etc.; ➤ Oscilações de tensão nas três fases.
Rotor Travado	➤ Excessiva dificuldade na partida do motor, devido a elevada queda de tensão, inércia e torque de carga muito elevados; ➤ Travamento do eixo da carga.
Sobreaquecimento	➤ Cabos de alimentação muito longos e/ou muito finos; ➤ Conexão incorreta dos cabos de ligação do motor; ➤ Excessivo número de partidas em tempo curto; ➤ Excesso de carga na ponta de eixo (permanente ou eventual/periódico); ➤ Sobre tensão ou subtensão na rede de alimentação (permanente ou eventual/periódico); ➤ Ventilação deficiente (tampa defletora danificada ou obstruída, sujeira sobre carcaça, temperatura ambiente elevada, etc.).
Falta de fase: ▪ Estrela (Y): queima de duas fases ▪ Triângulo (Δ): queima de uma fase	➤ Mau contato em chave, contador ou disjuntor; ➤ Mau contato em conexões; ➤ Mau contato nos terminais de uma fase do transformador; ➤ Queima de uma fase do transformador de alimentação; ➤ Queima de um fusível; ➤ Rompimento de um cabo alimentador.

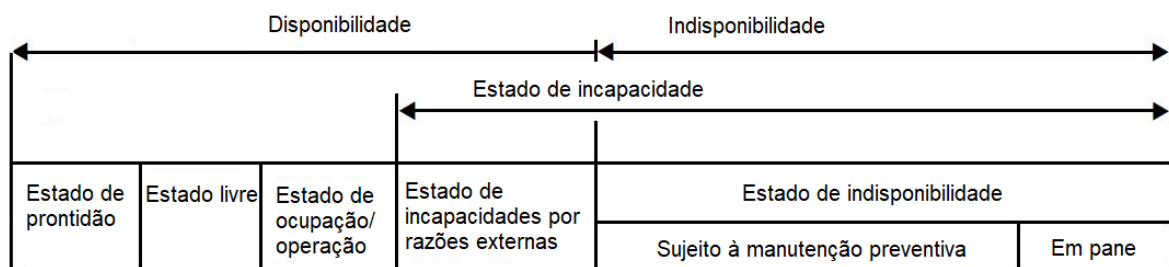
Fonte: (WEG, 2022).

2.4 Manutenção em Motores Elétricos

A manutenção é essencial, uma vez que visa manter os equipamentos com suas características originais de fábrica, impedindo ocorrências como interrupção do processo produtivo, acidentes, prejuízos com reposição de equipamentos, entre outros. Com todas as transformações e inovações tecnológicas surgindo aos longos dos anos, com a manutenção industrial não foi diferente, apresentou-se também uma evolução exponencial nos últimos anos. Toda esta evolução visa a redução de gastos

e aumento da produtividade, além de transformar a maneira de gerir os ativos e processos industriais. A ABNT NBR 5462/1994 refere-se à norma que define todos termos relacionados com confiabilidade e manutenibilidade, isto é, tudo o que se diz respeito à manutenção. Ainda, de acordo com a norma, os equipamentos podem apresentar vários estados, como está ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Estados de um equipamento ou item



Fonte: Adaptado ABNT (1994).

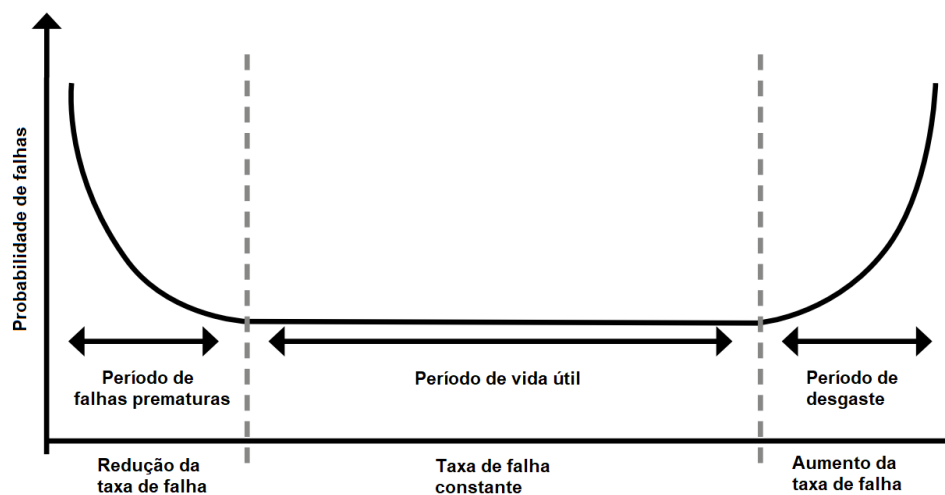
Analisando a Figura 13, nota-se que os equipamentos podem apresentar 10 estados de operação:

- Estado de prontidão significa que o equipamento está disponível, mas não em operação, durante o tempo requerido;
- Estado de não operação significa que o equipamento não está desempenhando a função requerida;
- Estado de operação significa que o equipamento está desempenhando a função requerida;
- Estado livre significa que o equipamento está disponível, mas não em operação, durante o tempo não requerido;
- Estado de incapacidade significa que o equipamento não é capaz de desempenhar a sua função requerida, por qualquer razão;
- Estado de incapacidade por razões externas significa que o equipamento se apresenta disponível, mas encontra-se em estado de incapacidade por falta de recursos externos ou por estarem sendo executadas ações planejadas que não são as de manutenção;
- Estado de disponibilidade significa que o equipamento pode desempenhar uma função requerida, desde que os recursos externos necessários sejam providos;

- Estado de indisponibilidade significa que o equipamento sofreu uma pane ou uma eventual incapacidade de desempenhar uma função requerida durante a manutenção preventiva;
- Estado de ocupação significa que o equipamento está sendo utilizado por um usuário para desempenhar uma função requerida, dessa forma, não pode ser utilizado por outros;
- Estado crítico significa que o equipamento provavelmente resultará e, condições perigosas e inseguras para as pessoas, perdas de materiais significativas e outras consequências danosas (ABNT,1994).

Após destacados todos os tipos de estados em que um equipamento pode apresentar, há alguns tipos de manutenção que se diferenciam, dependendo exatamente de qual estado se encontra o equipamento no momento da manutenção. A curva da banheira, Figura 14, tenta explicar a relação da manutenção de equipamentos com seus respectivos ciclos de vida.

Figura 14 - Curva da banheira



Fonte: Adaptado NETTO (2018).

A análise da curva da banheira, busca probabilidades de acontecer falhas no equipamento ao longo do tempo. Geralmente, durante o início da vida útil de um ativo, pode-se acontecer uma alta taxa de falhas, todas oriundas da fabricação do equipamento. Montagem inadequada, erros de projeto, componentes defeituosos ou de qualidade duvidosa e instalação indevida, são algumas das possíveis causas dessas falhas no início operacional do ativo, período este conhecido por falhas prematuras (NETTO, 2018).

Após esse primeiro período, realizado os processos corretivos, o ativo entra em uma etapa de estabilidade. A possibilidade de aparição de falhas nessa etapa é menor comparado aos outros dois períodos. A taxa de falhas é estável e quando ocorrem, são aleatórias, por isso, essa etapa é conhecida como período de vida útil (NETTO, 2018).

Por fim, com o envelhecer do equipamento, juntamente com todo os desgastes sofridos ao longo de sua operação, há um aumento considerável na aparição de falhas. A esta última etapa dá-se o nome de período de desgaste. O gerenciamento baseado em estratégias pontuais faz com que tenham equipes atuando para evitar ocorrência de falhas, e não apenas correções paliativas (Gurski, 2002).

O Brasil está começando a notar a importância de que a manutenção não deve ser entendida apenas como uma ação para corrigir ou consertar um equipamento que não é mais capaz de desempenhar suas funções determinadas. Mas sim, prever e antecipar possíveis eventos que possam terminar em falhas, diminuindo drasticamente o prejuízo com máquinas defeituosas ou até mesmo quebradas.

Para melhor entender a dimensão da relevância da manutenção dentro das empresas brasileiras, na Tabela 1 segue uma pesquisa realizada pela ABRAMAN (Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos) em 2013, revelando que os custos com manutenção anual giram em torno de 4,69% do faturamento anual de uma empresa.

Tabela 1: Dados sobre os custos da manutenção no Brasil.

CUSTO DA MANUTENÇÃO NO BRASIL				
Ano da Pesquisa	Ano Base	PIB (Milhões de R\$)	CTM/FB (%)	Custo (Milhões de R\$)
2013	2012	4.403.000	4,69	206.500,700
2011	2010	3.675.000	3,95	145.162,500
2009	2008	2.900.000	4,14	120.060,000
2007	2006	2.322.000	3,89	90.325,800
2005	2004	1.769.202	4,10	72.537,282
2003	2002	1.346.028	4,27	57.475,396
2001	2000	1.101.255	4,47	49.226,099
1999	1998	914.188	3,56	32.545,093
1997	1996	778.887	4,39	34.193,139
1995	1994	349.205	4,26	14.876,133

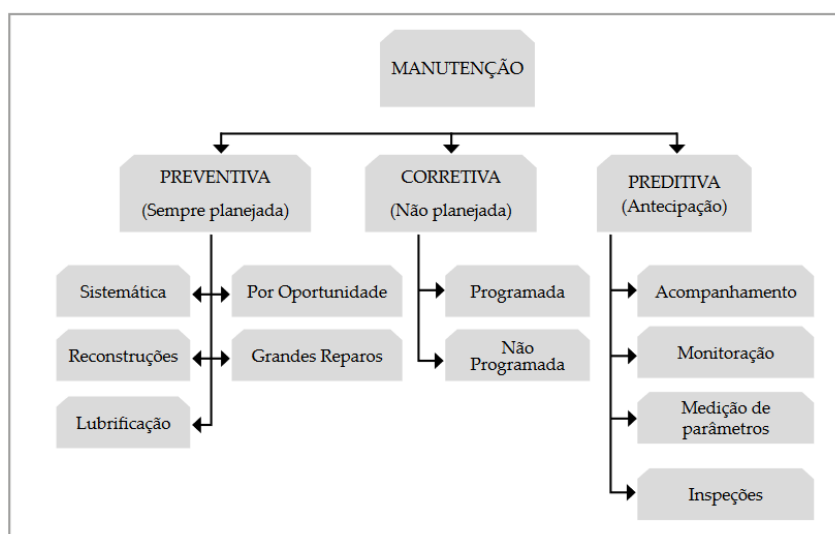
Fonte: Adaptado NETTO (2018).

Com base nos dados acima, gestores das empresas têm notado a importância da manutenção para que a linha produtiva não pare de funcionar e cause prejuízos a empresa. Logo, analisando os valores gastos com manutenção apresentados na tabela 2, preocupações com relação à diminuição de gastos com esse setor tem se tornado pautas importantes a serem solucionadas.

Devido serem uns dos primeiros tipos de manutenção a surgirem e ganharem tamanha relevância durante algumas décadas, as manutenções corretiva e preventiva, desde o surgimento da manutenção preditiva, vêm perdendo espaço nos setores industriais. Com a Indústria 4.0 e suas tecnologias inovadoras, a manutenção preditiva tem ganhado ainda maior destaque e importância no mercado mundial.

Mesmo que a manutenção preditiva esteja em muitos lugares em processos de adequação e implantação ainda no Brasil, a previsão para o futuro da manutenção já tem nome e certa expectativa, a manutenção prescritiva. Entretanto, devido ao objetivo deste trabalho de graduação, será dada maior relevância para as inovações tecnológicas que surgiram e ainda surgem referentes à manutenção preditiva e a Indústria 4.0. Logo, para melhor visualização dos tipos e características dos principais tipos de manutenção, na Figura 15 está representado tal diagrama.

Figura 15 - Diagrama dos principais tipos de manutenções.

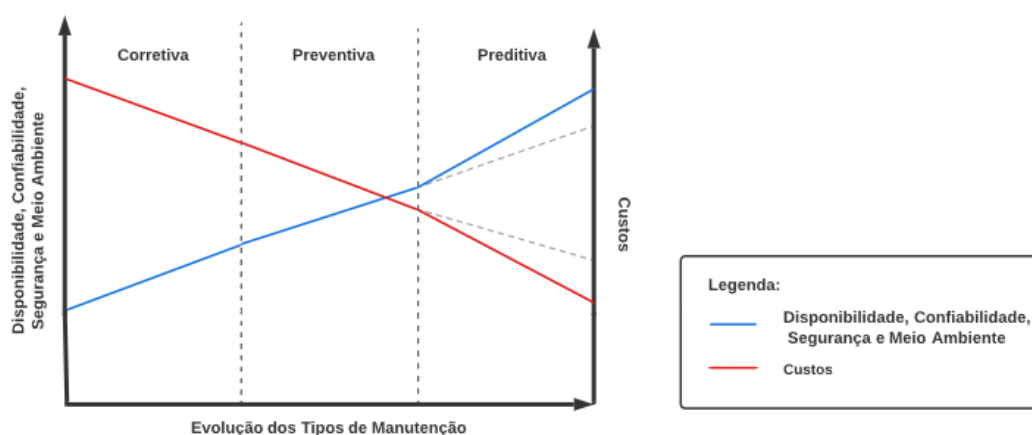


Fonte: (NETTO, 2018).

Abaixo são destacados os principais tipos de manutenção, descrevendo suas características, além de vantagens e desvantagens entre uma e outra. Na Figura 16 apresenta-se previamente que a manutenção preditiva apresenta a longo prazo um custo benefício melhor.

Uma vez que a manutenção preditiva apresenta como característica o monitoramento em pequenos intervalos de tempo, há um grande aumento de assertividade e previsibilidade. Assim, as falhas são descobertas e analisadas bem em seus períodos iniciais, possibilitando um planejamento para corrigi-las sem correr o risco de altos prejuízos por máquinas paradas.

Figura 16 - Comparação entre os tipos de manutenção.



Fonte: Adaptado Kardec e Nascif (2009).

2.4.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva trata-se de uma manutenção não planejada, ou seja, não há um planejamento pré-determinado para que a manutenção ocorra. Desse modo, falhas podem acontecer a qualquer momento, podendo encontrar situações em que não haja equipamento ou peças para reposição. O que pode levar a diversos transtornos à linha de produção.

Este tipo de manutenção apresenta esse nome pois tem como objetivo corrigir falhas conforme vão surgindo. A manutenção não planejada pode ser dividida em dois tipos: manutenção de falha inesperada e manutenção ocasional.

A manutenção corretiva não programada ocorre de forma repentina nos equipamentos, já com relação à programada, a manutenção ocasional trata-se de consertos que não geram a paralização do equipamento devido sua falha, portanto, a manutenção pode ser feita em um momento oportuno que não causará tanto prejuízo.

A manutenção corretiva detém grandes desvantagens quando comparada aos outros tipos de manutenção. Por se tratar de uma manutenção não planejada e

sempre estar correndo riscos com falhas e defeitos repentinos, situações mais críticas podem levar a parada da produção.

Para isso, a busca por equipes terceirizadas, além de peças para substituição, sendo que ambos os serviços, geralmente, apresentam caráter de urgência, aumentam e muito o custo da manutenção (NETTO, 2018).

2.4.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva trata-se de uma manutenção planejada, sendo assim, visa em manter os equipamentos em seus níveis operacionais, para isso, pré-determina ações de manutenção periódicas para que não ocorra paradas forçadas e inesperadas. Uma característica da manutenção preventiva é basear-se em métodos que analisam a durabilidade dos componentes pelo tempo de uso do equipamento e também em relação à sua condição estrutural.

Por se tratar de uma manutenção baseada em probabilidades estatísticas, muitas vezes peças que aparentemente estão em bom estado são substituídas, pois podem falhar após o tempo pré-estabelecido pela manutenção. Dessa maneira, nota-se que não há uma análise tão profunda do equipamento e das peças, assim, possivelmente alguns componentes que são substituídos, talvez não fosse preciso (NETTO, 2018).

2.4.3 Manutenção Preditiva

A ABNT NBR 5462/1994, descreve como definição para manutenção preditiva como a manutenção que “permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva”.

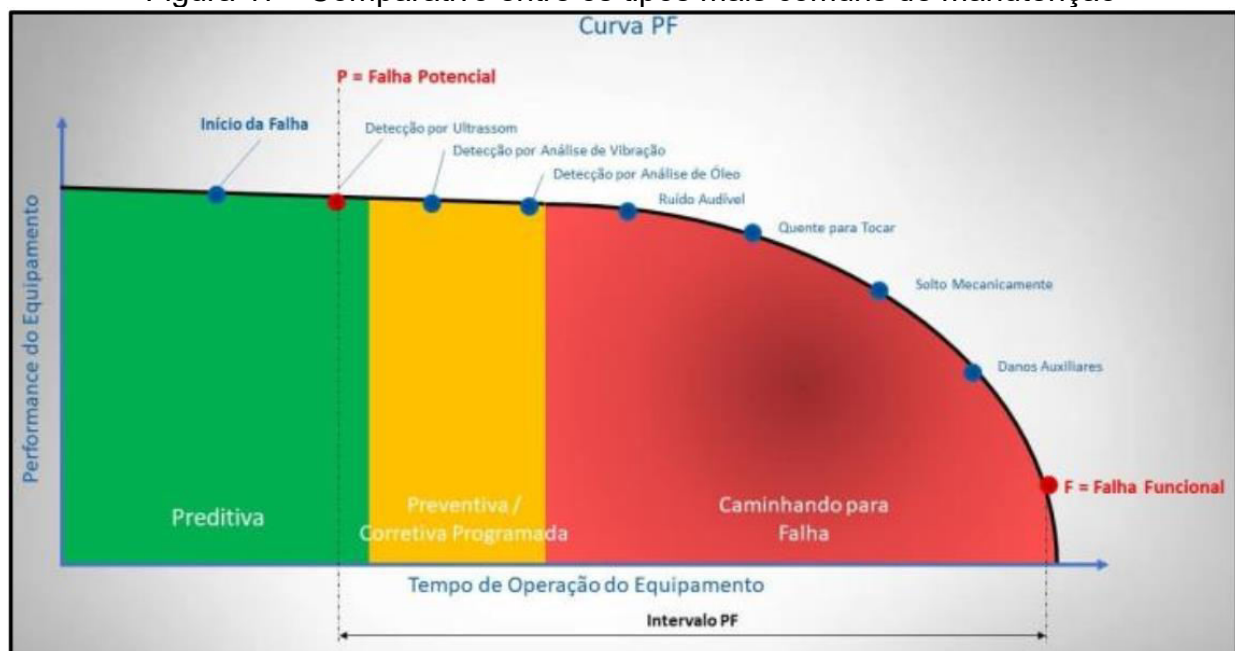
Desta forma, a manutenção preditiva busca prevenir as falhas visando prever quando irão ocorrer, monitorando as condições dos equipamentos para poder agir antes que a falha aconteça, maximizando a disponibilidade dos equipamentos e processos e diminuindo os custos de manutenção. Com relação ao monitoramento dos equipamentos, os parâmetros analisados podem ser muitos, porém, abaixo são destacados os mais usuais:

- Temperatura;
- Vibração;
- Vazão;
- Pressão;
- Níveis de lubrificação;
- Velocidade;
- Corrente (A);
- Tensão (V);
- Resistência (Ω).

Com a chegada da Indústria 4.0 e suas tecnologias as técnicas de manutenção (principalmente preditiva) estão sendo integradas à *softwares* e dispositivos remotos para o monitoramento dos equipamentos, o que resulta em uma otimização dos processos produtivos, podendo minimizar drasticamente as ações de manutenção.

Na Figura 17, pode-se notar a relação entre a atuação da manutenção preditiva, a condição do equipamento ao longo do tempo até a ocorrência da falha, os sinais emitidos pelo equipamento e os custos de reparo.

Figura 17 - Comparativo entre os tipos mais comuns de manutenção



Fonte: (BALDISSARELI; FABRO, 2019).

Analisando a Figura 17, verifica-se que os benefícios que a manutenção preditiva traz para todo o sistema de produção e, de certa forma, para a empresa como um todo é muito maior em vista dos demais tipos de manutenção. Sendo que tais benefícios aumentam com as tecnologias trazidas pela Indústria 4.0. A manutenção preditiva tem como objetivo detectar possíveis e anomalias em seu início, o que facilita na gestão dos ativos, apresentando maior confiabilidade e manutenibilidade.

O acompanhamento periódico, baseado na análise de dados que são coletados em monitoramentos em campo, aumenta a complexidade do estudo das possíveis falhas. A premissa desta manutenção é fundamentada no monitoramento contínuo dos ativos referente as suas condições mecânicas, maximizando ao máximo o intervalo entre os reparos necessários.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será apresentado os resultados da “fusão” entre a manutenção preditiva e as tecnologias inovadoras da Indústria 4.0, os sensores inteligentes. Também será verificado experimentalmente a eficácia do uso dos sensores em campo.

Como explorado e destacado anteriormente, juntamente com o surgimento do conceito da Indústria 4.0, as tecnologias passaram por um processo de inovação, contribuindo enormemente para a realização de fato da Quarta Revolução Industrial. A dimensão desta última revolução industrial com certeza superará todas as demais, como pode-se notar na fala de Schwab (2016), autor do livro a Quarta Revolução Industrial, em que enfatiza que esta última revolução irá transformar a forma do ser humano viver, trabalhar e se relacionar. Esta transformação terá uma escala, alcance e complexidade nunca alcançado anteriormente (SCHWAB, 2016).

Dessa forma, as áreas de atuação dessas novas tecnologias são diversas, podendo englobar áreas como automotiva, agronegócio, lógica, transporte e armazenagem, mineração, manutenção, entre outras. No entanto, como o objetivo desse trabalho de graduação é estudar, esclarecer e enfatizar a importância da manutenção preditiva no auxílio de detecção de falhas prematuras em motores de indução trifásicos, será dada maior ênfase às tecnologias desse setor.

3.1 Sensores Inteligentes

A busca de destaque no mercado de trabalho, faz com que empresas gerem uma grande competitividade entre si, o que resulta sempre em altas demandas de tecnologias e estratégias inovadoras. No setor industrial, uma das pautas que sempre está em grande discussão e em busca de soluções é a manutenção dos ativos, no que se diz à qualidade, melhoria e diminuição de gastos.

Com evolução tecnológica, juntamente com a chegada dos fenômenos da Indústria 4.0, houve uma grande evolução e destaque dos sensores inteligentes. Estes dispositivos apresentam sistemas inteligentes que monitoram, coletam, registram e analisam de forma dinâmica os parâmetros característicos do ativo. Estas análises permitem o diagnóstico e a previsão de falhas, além da possibilidade de mudança desses parâmetros, permitindo um diagnóstico mais complexo, determinando a

extensão, a degradação e a localização das falhas. Correlacionando as análises citadas anteriormente, pode-se determinar o melhor modo de manutenção para determinada falha e a vida útil restante do ativo.

Para melhor entendimento da funcionalidade do sensor inteligente, pode-se dividi-lo em módulos:

- Módulo de monitoramento: Monitora as condições dos ativos, coletam os dados e realizam comparações com os dados padrão do equipamento, criando um tempo limite para gerar um sinal de alarme.
- Módulo de saúde: Geralmente, avalia a saúde do ativo, com base em banco de dados dinâmicos e o ambiente de operação.
- Módulo de previsão: Busca prever a condição de integridade (ou vida residual) do ativo, ao processar os dados coletados na camada de detecção.
- Módulo de tomada de decisão: Cria estratégias de manutenção na camada de aplicação, abrangendo quando e como manter o ativo.

Outra característica importante destas novas tecnologias inteligentes é a capacidade de interconexão de informações entre diversos dispositivos, tudo baseado em redes de comunicação sem fio. O que viabiliza o monitoramento em tempo real, interações, controle remoto e suporte à decisão.

Buscando mais autonomia e análises mais complexas dos dispositivos, pesquisadores da Universidade de Stuttgart recomendaram a implementação de fluxos de trabalho, para ser possível gerenciar as falhas, quando detectadas. Ao detectar uma falha, esses fluxos inteligentes de trabalho utilizam processos de integração de contexto (CIP) para operar e abordar adequadamente o ponto exato da falha em toda a linha de produção (MARTINS; FABRO, 2020).

Para uma análise mais completa, o dispositivo reúne todos os registros relevantes de falhas semelhantes para verificação de quais métodos e ferramentas a serem utilizadas. Enquanto o dispositivo analisa e avalia (diagnostica) as falhas e os possíveis problemas que podem vir a surgir, o sistema, simultaneamente realiza o prognóstico, prevendo prováveis *status* futuros de máquinas ou seus componentes com a vida útil restante (RUL) até a falha completa. Enquanto o diagnóstico identifica as causas e as consequências das falhas, o prognóstico detecta as indicações iniciais de degradação de desempenho dos componentes (MARTINS; FABRO, 2020).

Os dados são coletados por meio de sensores (com ou sem fio), no entanto, como em muito dos casos os ambientes operacionais são extremamente severos, com máquinas rotativas e sistemas de grande escala, a rede de sensores sem fios (WSN) levam grande vantagem em relação aos sensores convencionais.

Redes sensoriais sem fio permitem uma grande variedade de dispositivos, reduzindo a complexidade de instalação. A implementação desta tecnologia na manutenção permite cobrir mais componentes e fornecer dados mais úteis e confiáveis. No entanto, para ser usado com eficiência, alguns problemas relacionados às redes devem ser solucionados, visando a confiabilidade dos dados.

Esses sensores podem detectar, medir, coletar e analisar informações do ambiente e, com base em algoritmos lógicos, concluem e transmitem o diagnóstico ao usuário. Quando a vibração é medida e analisada corretamente, ela pode ser usada como um importante indicador do estado de saúde da máquina, ajudando o usuário a tomar ações corretivas e evitar futuros problemas.

Todas as máquinas elétricas em operação apresentam um determinado nível de vibração, dessa forma, analisando o espectro de vibração é possível identificar problemas que irão prejudicar o ativo e seu desempenho. Cada tipo de equipamento possui uma assinatura espectral específica, sendo que cada elemento que compõe máquina é responsável por uma parte das frequências que formam o espectro.

As informações obtidas são fundamentais para a manutenção preditiva, uma vez que possibilitam uma avaliação efetiva das condições dos equipamentos. Dessa forma, o gestor de manutenção consegue evitar defeitos e falhas inesperadas, garantindo o funcionamento adequado dos equipamentos.

Para identificar o comportamento espectral das formas de onda presentes em cada tipo de máquina elétrica analisada e descobrir como são detectadas as causas dos problemas a partir das vibrações é necessário ter uma noção inicial das especificações de cada máquina, considerando aspectos de características geométricas e comportamento do equipamento, como: número de polos do motor, velocidade de rotação, número de dentes da engrenagem, entre outros.

Depois de reconhecer os aspectos é possível identificar padrões nos diagramas de vibração, que caracterizam problemas relacionados às variações dela, conforme Tabela 3.

Com relação à coleta dos espectros de vibração, existe três maneiras de coletar tais dados:

- Medidor de vibração de nível global com filtro: São instrumentos capazes de medir o valor global da vibração em larga frequência;
- Medidor de vibração com análise de frequência com filtro: Idêntico ao caso anterior, exceto pelo fato de que o nível medido, demonstra a vibração dos componentes mais importantes para serem monitorados;
- Análise de frequência: Usado em casos em que a largura do filtro é muito estreita. O analisador de frequência é capaz de realizar uma Transformada de Fourier em um sinal aleatório, periódico ou transitório.

Quadro 2: Padrões de análise do comportamento espectral de vibração.

Causa	Frequência	Amplitude	Observação
Desbalanceamento	1 X RPM	Proporcional ao desbalanceamento, maior no sentido radial	Geralmente aparece no primeiro harmônico
Desalinhamento / Eixo torto	1/2/3/4 X RPM	Grande em direção axial	Desalinhamento entre mancais
Folga nos mancais	½ X RPM	Grande no sentido vertical	Como a frequência é menor que ½ RPM a fase pode ser variável
Falta de firmeza mecânica	2 X RPM	Instável	Geralmente afeta o alinhamento
Correias frouxas	1 X RPM	Instável	-
Engrenagens defeituosas	Alta (nº de dentes X RPM)	"blips"	Frequência entre 15.000 e 40.000 RPM
Rolamentos deteriorados	Alta	"blips"	Frequência entre 15.000 e 40.000 RPM
Lubrificação	Alta	-	A amplitude se modifica notadamente em função da lubrificação
Eixo torcido	1 X RPM	Grande valor no sentido axial	A amplitude pode se apresentar de forma pulsátil

Fonte: (TRACTIAN, 2022).

Para toda e qualquer máquina que esteja em operação, há um padrão de vibração, que pode ser identificado analisando seus espectros. Quando os espectros saem do padrão do equipamento, pode-se identificar as anomalias e verificar se essas vibrações irregulares podem estar relacionadas a algum defeito no ativo.

As vibrações exercidas durante o funcionamento dos ativos são caracterizadas pelo desgaste ou folga do equipamento e dos componentes que os formam. A partir do espectro de vibração, é possível analisar o desgaste e a deterioração dos mesmos, garantindo a saúde e o bom funcionamento da máquina. Cada categoria de falha deteriora de forma particular a assinatura espectral do equipamento.

Qualquer anormalidade no comportamento vibratório habitual do equipamento ou quaisquer frequências desconhecidas de seu espectro regular são identificadas imediatamente pela plataforma. A partir disso, *insights* são gerados e enviados para os operadores por meio de correio eletrônico ou avisos em dispositivos de comunicação, direcionando na realização da manutenção.

As grandezas físicas utilizadas para se analisar falhas são a aceleração e velocidade, uma vez que quando comparadas ao deslocamento, apresentam grande diversidade de falhas. A velocidade é a mais indicada para analisar as frequências baixas e médias do espectro, enquanto a aceleração é mais sensível às frequências altas. Uma abordagem interessante é utilizar a curva de aceleração como medição primária e, por meio dela, obter tanto a velocidade quanto o deslocamento, usando processos matemáticos como a integração numérica.

Além disso, estes sensores possuem um componente destinado à medição da temperatura superficial dos ativos. Este dado é importante pois possibilita o levantamento do comportamento térmico a partir do gradiente de temperatura entre o sensor e a carcaça do motor. Este sensor possui a configuração para monitorar uma faixa de temperatura segura, de modo a alertar caso esta venha a sofrer alterações, evitando danos principalmente no verniz dos fios do estator bobinado.

O que possibilita a aplicação de diferentes tipos de análise se forem tomados os devidos cuidados, como o uso de filtros e a escolha apropriada da resolução e da frequência de amostragem (MARTINS; FABRO, 2020).

3.1.1 WEG Motor *Scan*

WEG Motor *Scan* trata-se de um equipamento que visa monitorar o nível de excelência na operação dos motores elétricos e outros equipamentos, além de incluir a *cloud-based* para armazenamento e processamento de dados, que é conhecido como WEG *Montion Fleet Management*.

Na Figura 18 pode-se notar tal dispositivo, que consegue coletar dados como temperatura, vibração nos eixos, tempo de operação, rotação e outras informações essenciais para avaliar o nível de operação do equipamento.

Figura 18 - WEG Motor Scan.



Fonte: (WEG, 2022).

Gateway é o equipamento responsável em coletar os dados do WEG Motor Scan e disponibilizá-los automaticamente via Wi-fi, cabo *Ethernet* ou 3G/4G na cloud-based *WEG Montion Fleet Management*. Estes dispositivos apresentam inteligência artificial, em que os dados coletados passam por análises avançadas pelo módulo WEG Motor Specialist, cujo é responsável em aplicar algoritmos de inteligência artificial e *Machine Learning*.

Os algoritmos citados anteriormente, observam, analisam e aprendem os padrões e os desvios de funcionamento do motor elétrico monitorado, assim, é possível gerar indicadores de falhas por desbalanceamento, desalinhamento, rolamento e vibração externa, além de ser possível inferir a carga e o consumo de energia elétrica do motor.

A I.A. é responsável pelo processo de aprendizagem e diagnósticos (automatizado) permitindo diminuir em gastos com manutenção. Na Figura 19, encontra-se ilustrado o que acontece utilizando o sistema de dispositivos acima.

Figura 19 - Processos WEG Motor Scan.



Fonte: (WEG, 2022).

3.1.2 ABB Ability

ABB Ability trata-se de outro sensor inteligente, desse modo, mais uma opção de monitoramento de motores elétricos, que visa acompanhar a condição dos motores (quase todos os motores elétricos de baixa tensão), possibilitando a manutenção preditiva. Ao monitorar e analisar dados sobre os parâmetros operacionais do motor, permite ao usuário otimizar a manutenção. O dispositivo inteligente, ilustrado na Figura 20, ajuda a reduzir o tempo de parada da máquina em até 70%, a prolongar a vida útil do equipamento em até 30% e a reduzir o consumo de energia em até 10%.

Figura 20 - ABB Ability.



Fonte: (ABB, 2022).

Com relação ao sensor inteligente é facilmente conectada aos motores, sem necessidade de fiação, como nota-se na Figura 21. Todos os motores fabricados pela ABB, tem a opção de já virem com os sensores instalados.

Figura 21 – Representação sensor ABB instalado em um motor



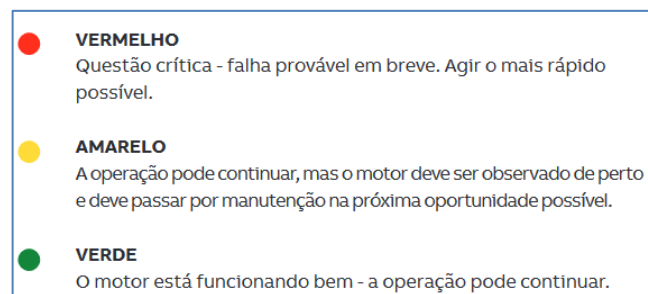
Fonte: (ABB, 2022).

ABB Ability tem alta compatibilidade com quase todos os motores de baixa tensão novos ou antigos, sejam eles da ABB ou de outros fornecedores. O sensor monitora os sinais do motor, medindo os principais parâmetros com precisão em intervalos regulares. Após a captação de dados, o sensor transfere os dados tanto para smartphones quanto para o *gateway* ABB.

Posteriormente, para proteção de dados, os mesmos são transferidos para um servidor seguro na nuvem. Para segurança, as comunicações de dados usam protocolos de criptografia padrão da ABB, assim todos os dados armazenados na nuvem apresentam-se em um formato criptografado.

Referente à análise dos dados, há algoritmos avançados desenvolvidos visando analisar os dados e produzirem informações relevantes, disponibilizando-as no portal dedicado ABB Ability Smart Sensor, além de constar no smartphone do usuário. O aplicativo do ABB Ability Smart Sensor tem uma interface intuitiva, oferecendo um rápido panorama de todos os motores monitorados pela interface “semáforo”, ilustrada na Figura 22.

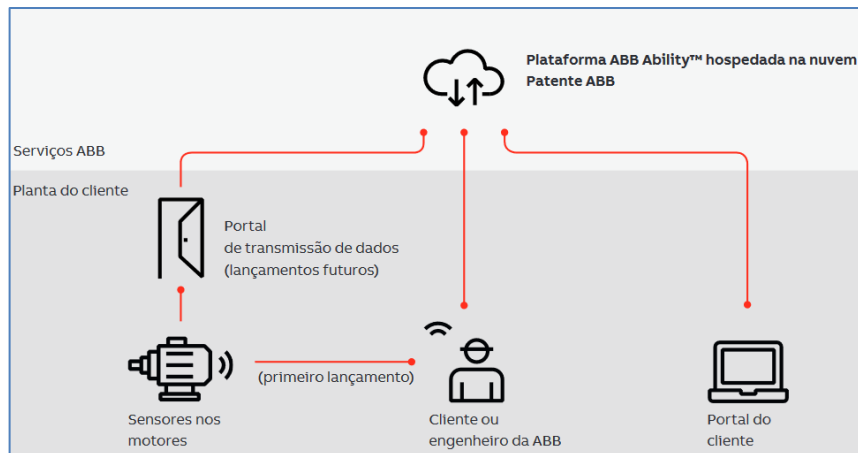
Figura 22 - Interface “semáforo” do APP ABB Ability Smart Sensor.



Fonte: (ABB, 2022).

Quando um sinal amarelo ou vermelho é disparado, o usuário pode expandir os detalhes para identificar a causa do problema. Na Figura 23, observa-se o processo de funcionamento do sensor inteligente explicado anteriormente.

Figura 23 - Processos de funcionamento do ABB Ability.



Fonte: (ABB, 2022).

O monitoramento auxilia no planejamento da rotina de manutenção de acordo com as necessidades reais e não com base em intervalos de tempo ou horas de operação, reduzindo os custos de manutenção ou até mesmo eliminando paradas não planejadas. Ao analisar os dados dos motores elétricos monitorados e as informações e características da planta industrial, é possível realizar uma seleção dos motores mais adequados para reduzir os custos de energia.

3.1.3 Smart Trac

O dispositivo *Smart Trac* trata-se de um sensor inteligente, ilustrado na Figura 24, utilizado para monitorar máquinas ou qualquer ativo rotativo que trabalhe com algum tipo de comportamento crítico ou que tenha um perfil de vibração definido estatisticamente. Não há limitações com relação a ao tamanho do ativo ou sua potência, apenas que o mesmo deve ser fixo. O local onde o dispositivo ficará localizado no ativo não poderá passar de 80° C, pois com uma temperatura superior a essa poderia danificar o sensor ou corromper suas medições.

Figura 24 - Smart Trac.



Fonte: (TRACTIAN, 2022).

Referente à coleta de dados, o sensor dispõe de um acelerômetro que transforma os dados físicos (vibração do ativo) em uma versão digital, em que são analisados pela inteligência artificial do dispositivo. Posteriormente, os dados são enviados aos servidores da Tractian na nuvem pelo módulo de comunicação para análise automática. A transmissão de dados é realizada utilizando a rede móvel de celulares (3G/ 4G), tornando o dispositivo ainda mais moderno e simples para se implementar, como está ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Sensor inteligente instalado no motor elétrico.



Fonte: (TRACTIAN, 2022).

Assim que o sensor é posicionado no ativo, inicia-se a coleta de dados por meio das vibrações e temperatura do ativo. No entanto, é necessário a inserção manual de dados do equipamento na plataforma do *software* para que o sensor possa definir os comportamentos padrões do equipamento, sendo possível detectar mudanças no perfil do equipamento. Os dados e análises realizadas pelo *Smart Trac* podem ser acessado tanto pelo celular, quanto pela plataforma da Tractian de qualquer dispositivo ou computador, como nota-se na Figura 26.

Figura 26 - Processamento dos dados coletados.



Fonte: Adaptado TRACTIAN (2022).

Após realizar o *upload* dos dados, eles são processados na nuvem da plataforma. Quando combinados, analisados e comparados com as informações inseridas do ativo, irão gerar diagnósticos sobre o dispositivo.

3.1.4 FAG SmartCheck

FAG SmartCheck pertence a um sistema de medição online compacto, criado pela empresa holandesa Grupo Schaeffler, que tem como objetivo monitorar as máquinas e processos. O FAG SmartCheck, destacada na Figura 27, pode ser utilizado em diversos equipamentos como motores elétricos, motorreduzidores, bombas a vácuo, bombas de fluídos, ventiladores, ventoinhas, engrenagens, compressores, fusos e máquinas-ferramentas.

Figura 27 - FAG SmartCheck



Fonte: (SCHAEFFLER, 2022).

Diferentemente dos outros dois dispositivos apresentados anteriormente, este necessita ser parafusado no motor elétrico além de ser energizado e conectado à internet via cabos como pode-se observar na Figura 28.

Figura 28 - FAG SmartCheck Instalada em um motor elétrico.



Fonte: (SCHAEFFLER, 2022).

Com relação a coleta e análise de dados se assemelha e muito aos demais dispositivos inteligentes destacados anteriormente.

3.2 Estudos de Casos

Neste capítulo serão apresentados alguns procedimentos experimentais para enfatizar a eficácia e a facilidade da gestão e monitoramento dos ativos de empresas distintas, quando utilizado os sensores inteligentes.

3.2.1 Estudo de Caso 1

Neste estudo de caso, de forma experimental, foi instalado um sensor inteligente sem fio em um motor de extrusora industrial e os dados foram coletados a partir do uso de Smartphone (Asus_Z017D, versão do Android 8.0.0) com conexão *Bluetooth* e enviados para a plataforma através de Internet.

Os monitoramentos foram realizados através de um aplicativo de celular (WEG Motor Scan versão 1.0.84) e de uma plataforma (WEG IoT), ambos, disponibilizados pela WEG, o que facilita a visualização online da saúde instantânea do motor, bem como uma avaliação histórica do mesmo. Estes dados auxiliam a equipe de manutenção, que poderá intervir de forma preventiva, a qualquer sinal de alarme no equipamento. Isso permitirá uma maior segurança para a estabilidade da produção.

O objeto de estudo foi um motor elétrico trifásico, com potência de 185 kW, tensão de 380 V e velocidade de rotação de 1190 rpm. Este motor é utilizado em uma das extrusoras da fábrica de produção de *pet-food*, que possui uma capacidade de produção de 6 toneladas por hora. O equipamento pode ser visualizado na Figura 29, e na Figura 30 o sistema de produção como um todo.

A escolha desse ativo deu-se em função da sua criticidade para a operação, pois, em caso de parada não programada, sua parada gera uma quebra na produção de aproximadamente 120 toneladas de alimento por dia (MARTINS; FABRO, 2020).

Figura 29 - Motor monitorado.



Fonte: Adaptado de MARTINS e FABRO (2020).

Figura 30 - Extrusora de pet-food.



Fonte: (MARTINS; FABRO, 2020).

A plataforma foi acessada via internet, utilizando um computador Dell Latitude 3470. Como o sensor utilizado não tem fio, o envio dos dados para a nuvem se dá através do smartphone. Por meio da conexão Bluetooth, ao aproximar o smartphone do sensor, com a conexão ativada, o sensor envia ao aplicativo WEG Motor Scan as informações, que serão enviadas via WiFi para a nuvem. Os limites de alarme estabelecidos seguem a recomendação do fabricante.

Na Tabela 4 apresenta-se a referência do fabricante, na qual as cores verde, amarelo e vermelho representam, respectivamente, as situações de motor normal, alerta e crítico.

Tabela 2 - Limites estabelecidos pela WEG

Velocidade de Vibração RMS [mm/s]	Potência ≤ 300kW Grupo 2 da ISO 10816-3		Potência > 300 kW Grupo 1 da ISO 10816-3	
	Base Rígida	Base Flexível	Base Rígida	Base Flexível
$V \leq 2.8$				
$2.8 < V \leq 5.6$				
$5.6 < V \leq 8.9$				
$8.9 < V \leq 13.8$				
$V > 13.8$				

Fonte: (WEG, 2022).

Para a referência de temperatura, inicialmente também foi utilizada a recomendação de 60 °C para nível de alerta e 75 °C para nível crítico. Mas, ao longo da coleta, entendeu-se que os valores deveriam ser redimensionados para 50 °C e 70 °C, em função do histórico que foi sendo observado.

O sensor permanece coletando os dados do motor a cada 10 minutos (temperatura) e a cada uma hora (vibrações). Se o smartphone não estiver conectado à internet durante a coleta, os dados serão enviados para a plataforma no momento em que esta conexão for estabelecida. Nas Figura 31, 32, 33 e 34 observam-se imagens da tela do smartphone, no momento da aproximação ao sensor e da coleta dos dados.

Figura 31 - Notificação sobre o ativo.



Fonte: (MARTINS; FABRO, 2020).

Figura 32 - Dados coletados e dados do ativo.

<

Fonte: (MARTINS; FABRO, 2020).

Figura 33 - Dados coletados de temperatura do ativo



Fonte: (MARTINS; FABRO, 2020).

Figura 34 - Espectro de vibração coletado do ativo.



Fonte: (MARTINS; FABRO, 2020).

Por meio da plataforma ou do aplicativo de celular é possível visualizar eventos ocorridos, como níveis de alerta ou críticos, como está ilustrado Figura 35. Também é possível adicionar e programar manutenções para o equipamento ao qual o sensor está instalado. O mesmo aplicativo e plataforma permitem adicionar mais de um sensor aos mesmos, bem como gerenciar mais de uma planta industrial ao mesmo tempo.

Figura 35 - Assinatura espectral coletada



Fonte: (MARTINS; FABRO, 2020).

Este estudo de caso buscou apresentar o uso de um sensor inteligente, que pudesse ser facilmente instalado e auxiliasse a manutenção preditiva de uma empresa que busca ferramentas para inserir-se na Indústria 4.0. Com relação ao uso do sistema proposto, o WEG Smart Sensor atendeu às demandas propostas.

A coleta dos dados de vibração e temperatura do motor é simples e prática, pois se utiliza apenas de um smartphone com conexão *Bluetooth*, possibilitando o seu uso por todos os técnicos da equipe de manutenção. A imediata identificação de um alarme ou nível crítico do equipamento é detectada também via smartphone, o que permite uma atuação rápida na contenção do problema antes da parada ou quebra do equipamento.

A utilização do sensor também garante uma coleta contínua dos dados do motor, o que possibilita a criação de um banco de dados e um conhecimento maior sobre as oscilações naturais e as tendências de operação do motor. Isso apresenta uma grande vantagem com relação ao monitoramento realizado por uma empresa terceirizada, em função do monitoramento contínuo que o sensor permite, ao contrário de um monitoramento mensal dos dados. Em relação ao gerenciamento da

manutenção preditiva, a plataforma WEG IoT Platform permite monitorar diversos sensores e unidades industriais ao mesmo tempo.

De forma a melhorar e tornar o sistema ainda mais independente, o uso de um *gateway* para a coleta e envio dos dados para a plataforma tornaria o sistema ainda mais ágil. O uso, portanto, de sensores como este, deve ser avaliado para aplicações em equipamentos críticos, para uma maior garantia de estabilidade e disponibilidade destes equipamentos. Isso porque, uma vez que um equipamento crítico gera a parada de produção, o retorno financeiro se dá instantaneamente. Entende-se que, para uma empresa que busca a competitividade através de aplicação de tecnologia aos seus processos, inserir-se na Indústria 4.0 é uma necessidade vital.

3.2.2 Estudo de Caso 2

Para o seguinte estudo de caso, foi analisado o atual sistema de manutenção preditiva dos motores de indução trifásico de baixa tensão, de uma empresa de mineração situada no município de Paracatu-MG, utilizando dois dispositivos diferentes. Pelo fato desta empresa utilizar os motores elétricos como principal fonte para o acionamento de suas cargas, sendo estes frequentemente expostos a condições adversas que os levam a falhas indesejáveis, e consequentemente gerando indisponibilidades aos equipamentos ocasionando transtornos ao processo produtivo.

Nessa perspectiva, buscou justificar o uso do sensor Motor Scan, que garantiu maior eficácia na manutenção preditiva em comparação com o método anterior utilizado pela empresa. Através da implantação do sensor foi possível diagnosticar o estado de funcionamento dos motores e evidenciar os resultados benéficos trazidos pelo seu uso. Nas Figuras 36 e 37, estão representados os dispositivos utilizados pelo método antigo, em que constam respectivamente, um acelerômetro e o analisador de dados, ambos da marca ONEPRODE FALCON.

Figura 36 - Acelerômetro do tipo pontual ONEPRODE FALCON



Fonte: (ANJOS et al., 2020).

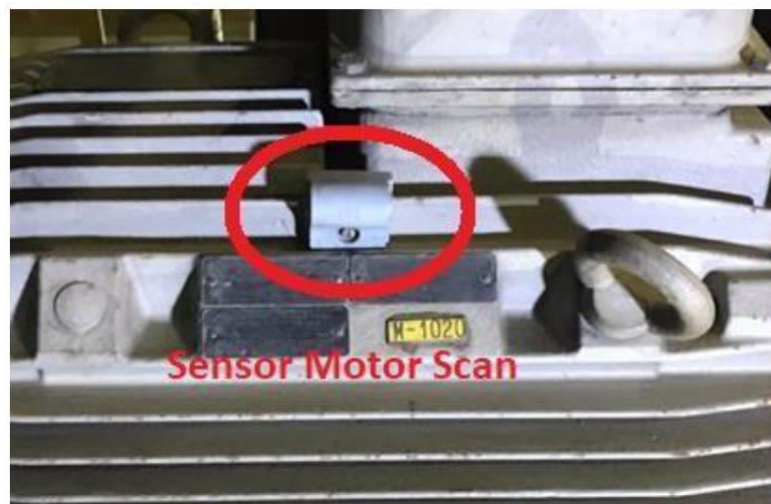
Figura 37 - Analisador de vibração ONEPRODE FALCON.



Fonte: (ANJOS et al., 2020).

Os dispositivos apresentados nas Figuras 36 e 37 não possuem ligações físicas. O sensor coleta os dados por meio da vibração do ativo e exporta os mesmos para o analisador, em que é responsável por processar e analisar, indicando em gráficos, quais os sentidos dos eixos do equipamento monitorado estão oferecendo risco de falha ao ativo. Na Figura 38 mostra-se um exemplo de sensor do modelo Motor Scan instalado no motor elétrico.

Figura 38 - Sensor Motor WEG Scan instalado no ativo



Fonte: (ANJOS et al., 2020).

Na Figura 39 está ilustrada a interface do aplicativo do Motor WEG Scan e os dados medidos pelo sensor inteligente e que podem ser observados por meio do Smartphone.

Figura 39 - Dados coletados

Temperatura	44 °C
Vibração axial	1,24 mm/s
Vibração radial-Y	1,1 mm/s
Vibração radial-X	1,92 mm/s
Velocidade	895 rpm
A medição de temperatura foi realizada às 09:00 e vibração às 09:00 no dia 05/11/20	
Dados de placa do motor	
Alimentação	440V
Carcaça	225S/M
Classe térmica	H

Fonte: (ANJOS et al., 2020).

Na Figura 39, nota-se na parte superior as grandezas medidas pelo sensor, tais como: temperatura que no momento da medição marcava 44 °C, vibração no eixo axial de 1,24mm/s, vibração no eixo radial-Y de 1,1mm/s, e vibração no eixo radial-X de 1,92mm/s e a velocidade síncrona do motor de 895 rpm. Já na parte inferior da figura, constam os dados de placa do motor: a tensão de alimentação da rede de 440V, a carcaça do motor item que define tamanho e distanciamento da furação da base, a classe térmica representada na figura pela letra H, que define a máxima temperatura suportada pelo equipamento igual a 180 °C sem que esse sofra danos.

Conforme observado na Figura 40 há um ruído no espectro na posição axial da ordem de 0,96 mm/s. De acordo com o manual de vibração, o evento se caracteriza em motor acoplado a carga por correias. De acordo com o manual, e análise do profissional, conclui-se que a causa da falha seria pontual nos rolamentos. Foi solicitado ao profissional de lubrificação para lubrificar os mesmos. Após a lubrificação dos rolamentos o ruído baixou para a ordem de 0,55 mm/s. Na Figura 41 apresentam-se os valores de medição de vibração axial e vibração radial coletados no mesmo equipamento pelos dois sensores.

Figura 40 - Análise de frequência e vibração do ativo



Fonte: (ANJOS et al., 2020).

Figura 41 - Comparativo de dados coletados dos dois dispositivos



Fonte: (ANJOS et al., 2020).

Na Tabela 5 foi feito o comparativo das medições realizadas. A primeira coluna apresenta os valores medidos pelo sensor de vibração Motor Scan WEG e a segunda coluna apresenta os valores medidos pelo sensor acelerômetro coletor pontual OneProd.

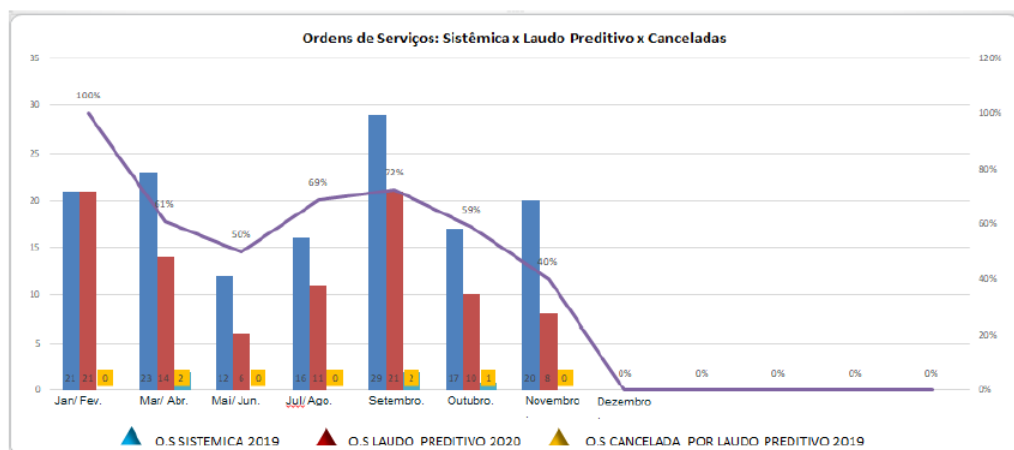
Tabela 3 : Comparativo entre os dados coletados pelos dispositivos

	Medição Motor WEG Scan (mm/s)	Medição OneProd (mm/s)	Diferença entre os equipamentos
Velocidade (Horizontal)	2,132	2,95	0,818
Velocidade (Vertical)	3,323	3,45	0,127
Velocidade (Axial)	8,976	9,66	0,684

Fonte: (ANJOS et al., 2020).

Tomando por base relatórios preditivos, de intervenções indicadas com base em laudos preditivos e arquivos do sistema de manutenção da empresa foi realizado um levantamento do número de intervenções ocorridas nos anos de 2019 e 2020 no motor objeto de estudo, conforme demonstrado na Figura 42.

Figura 42 - Comparativo de intervenções no ativo de estudo



Fonte: (ANJOS et al., 2020).

De acordo com a Figura 42, o monitoramento do motor passou a ser feito via sensor Motor Scan, durante o ano de 2020 ocorreu uma queda no número de ordens de serviços emitidas via laudos preditivos em comparação ao ano anterior. Além disso, por intermédio do monitoramento via sensor Motor Scan foi feita uma estatística das causas de falhas que ocorreram no motor elétrico, que é apresentada no gráfico da Figura 43.

Figura 43 - Retrospecto de falhas do ativo



Fonte: (ANJOS et al., 2020).

Conforme citado anteriormente nas Figuras 42 e 43, o sensor Motor Scan além de medir vibração, mede também temperatura. Outra vantagem do sensor Motor Scan é que ele realiza a coleta dos dados de forma automática e o monitoramento é online, podendo ainda essa coleta ser realizada por um profissional que não seja especialista de manutenção preditiva, mas que disponha de um aparelho smartphone, e que tenha nele o aplicativo instalado.

Esse poderá se conectar ao sensor e fazer a importação dos dados com apenas um clique, e enviá-lo para a nuvem onde o profissional especialista da área de manutenção preditiva fará a interpretação desses dados, tornando as tomadas de decisões mais assertivas em um tempo estimado de menos de um dia. Dessa forma, mitigou-se os problemas de tempo que ocorriam no sistema de manutenção do tipo rota, que muitas vezes ocasionava a falha do equipamento devido o profissional não ter tido o tempo hábil para tratar os dados coletados.

A exemplo da mineradora citada neste artigo sabe-se que em caso de parada não programada do motor objeto de estudo, que é considerado crítico no processo, ocorre o desbalanceamento do circuito de flotação fazendo com que o processo não consiga fazer a flotação do material e que consequentemente esse material seja drenado para o circuito aberto, que por sua vez pode ser drenado ao circuito de rejeito. Desse modo, a indisponibilidade desse motor gera uma perda na produção de muitos quilos de ouro por dia acarretando um prejuízo financeiro considerável para a empresa.

Portanto, ficou evidente as vantagens de se implementar uma tecnologia que facilita o monitoramento, principalmente para ativos que são críticos para o funcionamento da linha de produção. O dispositivo além de apresentar alta velocidade na aquisição e processamento de dados, contribui para tomadas de decisões rápidas, o que são essenciais para se obter maior eficiência, e tirando ao máximo de proveito da vida útil do motor.

3.2.3 Estudo de Caso 3

Neste estudo de caso, será observado a importância, mais uma vez, do uso de sensores inteligentes para melhor administrar os ativos da empresa multinacional Corteva Agriscience, que surgiu da fusão dos negócios da Dow Química e da DuPont.

A Corteva atua na área de sementes, proteção de cultivos e agricultura digital, além de estar comprometida com práticas agrícolas sustentáveis.

Atualmente, a Corteva possui 4 mil pesquisadores, 150 centros de pesquisa em 25 países e está presente em seis continentes. No Paraguai possuem um escritório, e no Brasil contam com 25 unidades, dessas 10 são dedicadas à pesquisa e desenvolvimento de novos produtos para atender às necessidades da região.

O processo produtivo da unidade de Jacareí - SP, possui pastas com alto teor de sólidos e com características incrustantes, o que exige uma alta disciplina de limpeza para garantir e manter um bom desempenho dos equipamentos.

Apesar de empresa possuir contratos de manutenções preditivas mensais, que realizam análise de vibração dos ativos com certa frequência, ainda sim, situações críticas surgem devido ao estado emergencial dos equipamentos e suas taxas de falhas. Entretanto, por conta dessa planta industrial funcionar 24 horas por dia, durante os 7 dias da semana, não há paradas frequentes para que sejam realizadas manutenções e limpezas.

As manutenções preditivas mensais não eram capazes de identificar algumas falhas ou comportamentos anômalos, além da realizarem de backups para os ativos em caso de defeitos. De acordo com o líder de manutenção, apesar da empresa apresentar boas bases de manutenções preventivas e preditivas, devido à ausência do monitoramento *on-line*, alguns comportamentos anormais não eram possíveis ser detectados.

Após uma análise das condições de operação e segurança do ambiente, no qual as máquinas elétricas estavam instaladas, verificou-se que o sensor *Smart Trac* era o mais indicado. O responsável pela gestão de ativos implementou o uso do sensor, em até 7 ou 8 equipamentos selecionados, por serem os ativos que apresentavam possibilidades de aparições de falhas. Em poucos meses de uso, diversos alertas foram notificados e identificados. Atualmente a empresa conta com 10 dispositivos espalhados pela fábrica, priorizando os equipamentos mais essenciais na linha de produção. Na Figura 44, encontra-se um dos equipamentos que são monitorados pelo sensor.

Figura 44 - Smart Trac instalado em um ativo



Fonte: (TRACTIAN, 2022).

Segundo o líder de manutenção, a empresa possui alguns ativos que foram imprescindíveis à implementação dos sensores inteligentes, dentre eles duas bombas e um exaustor devido a elevada detecção de falhas observadas. Uma semana antes de uma parada planejada, a vibração de um dos ativos subiu muito, o que gerou um alerta pelo *Smart Trac*. Foram realizadas análises de vibração pontuais por um técnico e não foi detectada nenhuma anomalia. Uma semana depois, o sensor alertou a equipe técnica devido a um comportamento espectral de vibração incomum. Como as manutenções preventivas acontecem de forma mensal, a equipe técnica não seria capaz de identificar a anomalia até a próxima inspeção. Essa situação anteriormente citada, deixa explícito como os sensores inteligentes auxiliam empresas em detecções prematuras de falhas, nesse caso, vibração anormal, antes que uma falha venha ocorrer ou até mesmo a parada do ativo.

De acordo com líder de manutenção, o sensor foi muito útil para as tomadas de decisão, referente ao planejamento, ou seja, se necessitará realizar uma parada ou não. Nas Figuras 45 e 46, pode-se acompanhar outras detecções prematuras de falhas. Além da anomalia na assinatura de vibração do equipamento, também foi detectado um desbalanceamento e um desalinhamento.

Figura 45 - Desbalanceamento detectado



Fonte: (TRACTIAN, 2022).

Figura 46 - Desalinhamento detectado

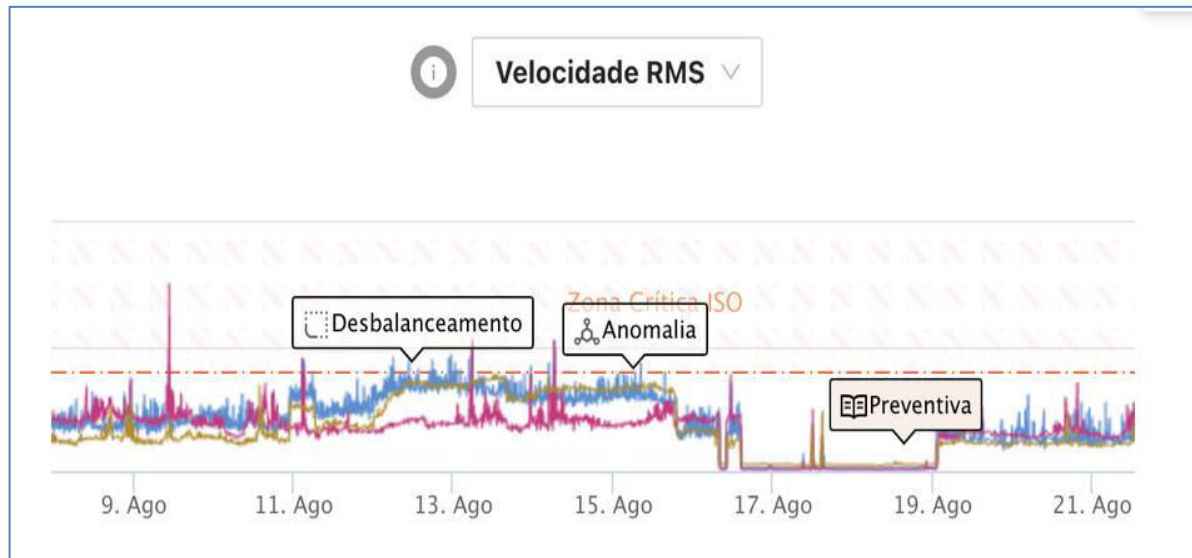


Fonte: (TRACTIAN, 2022).

Ao analisar a Figura 45, verifica-se que o alerta gerado foi devido a um desbalanceamento no 1º harmônico (H1). O valor medido do H1 é muito desproporcional, quando comparado a média de padrão do equipamento. Após o

alerta, uma manutenção preventiva foi realizada e os níveis de velocidade RMS diminuíram, conforme pode-se notar na Figura 47.

Figura 47 - Espectro da velocidade RMS



Fonte: (TRACTIAN, 2022).

Conforme citado anteriormente, outro problema identificado, no mesmo período, foi um leve desalinhamento. Quando o valor do segundo harmônico (H2) ao ser comparado ao primeiro harmônico, resulta em um valor alto, o desalinhamento é constatado. Neste caso, o H2 aumentou 30% a mais que o H1.

Os alertas anteriormente citados evitaram um prejuízo na escala de R\$60 mil, pois com as detecções prematuras de anomalias que apresentam alto potencial de evolução, pode-se realizar manutenções preventivas para sanar os problemas. Sem esse monitoramento on-line contínuo, tais irregularidades provavelmente ficariam desconhecidas, podendo resultar na falha do equipamento em alguma hora, impactando a linha de produção.

Finalizando, o responsável destaca a importância de se detectar as falhas de forma prematura: “A identificação destas falhas em seu início, permitiu que fizéssemos um reparo simples, barato e que quase não impactou a produção.”

3.2.4 Estudo de Caso 4

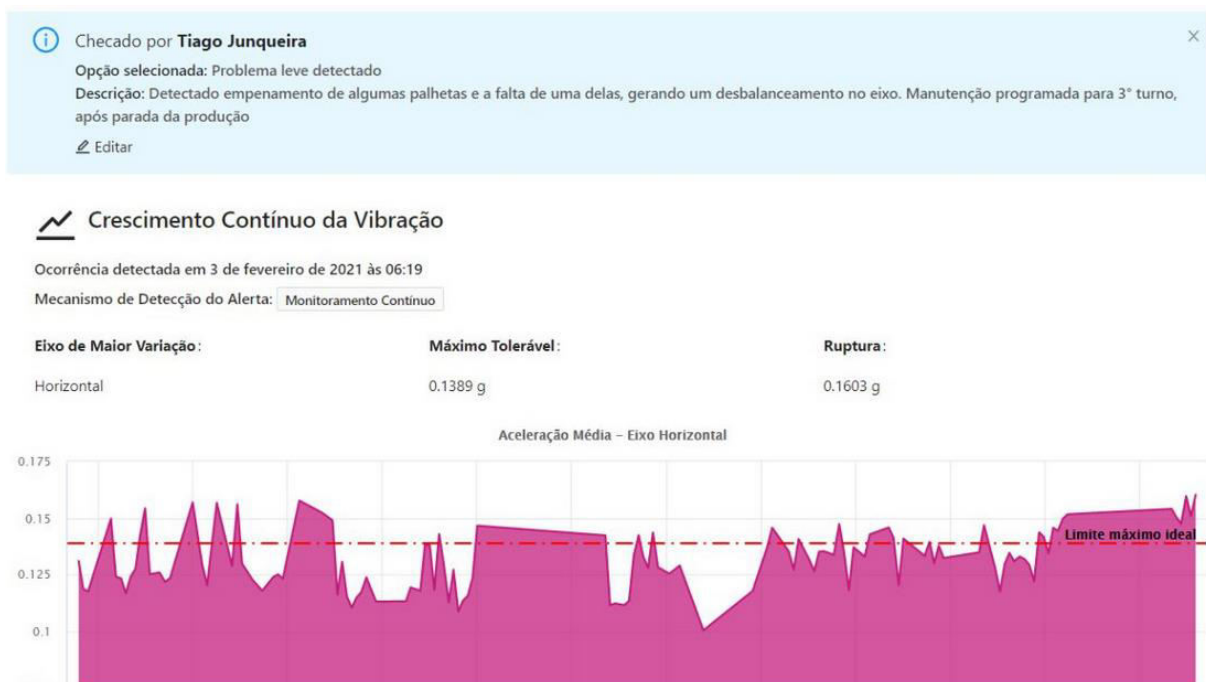
O próximo estudo de caso será abordado a mudança gerada na manutenção de ativos da empresa AmstedMaxion que fabrica rodas de aço, fundidos ferroviários para truques, sistemas de choque e tração de fundidos industriais. Localizada em Cruzeiro – SP e considerada a maior fundição da América do Sul, por utilizar tecnologias de ponta para a produção de peças na faixa de 10 quilos a 5 toneladas em aço carbono e baixa-liga. A empresa abastece diversas áreas como industriais, ferroviárias, mineração, construção civil, sucroalcooleira, entre outras.

Tiago Junqueira é o supervisor de manutenção e responsável por gerir os ativos da empresa. Após tomar conhecimento dos sensores inteligentes, especificadamente do Smart Trac, em janeiro de 2021 foram instaladas 12 unidades em equipamentos da planta industrial. Antes do uso dos sensores, quebras e falhas inesperadas faziam parte da rotina da AmstedMaxion, não havendo possibilidades de obtenção de informações, além de prever quais equipamentos poderiam surgir falhas.

De acordo com o supervisor de manutenção, houve um aumento significativo na quantidade de informação sobre os ativos, devido ao uso da plataforma. O que facilitou na gestão dos equipamentos, possibilitando entender melhor as ocorrências, evitando inúmeros ativos fora de operação. Os dados coletados pelo sensor, processados e enviados para a plataforma, ajudou a equipe de manutenção atuar preventivamente.

O misturador de areia F1135 e a máquina de decapagem mecânica F5226, apresentam necessidade periódica, dessa forma, com os dados transmitidos pela plataforma, há uma alta facilidade em identificar algo anômalo, a fim de evitar evoluções das falhas que resultariam em uma quebra grave e por consequência, a parada da produção. Na Figura 48 pode-se notar o acompanhamento realizado por Tiago na vibração do ativo.

Figura 48 - Monitoramento de vibração no ativo



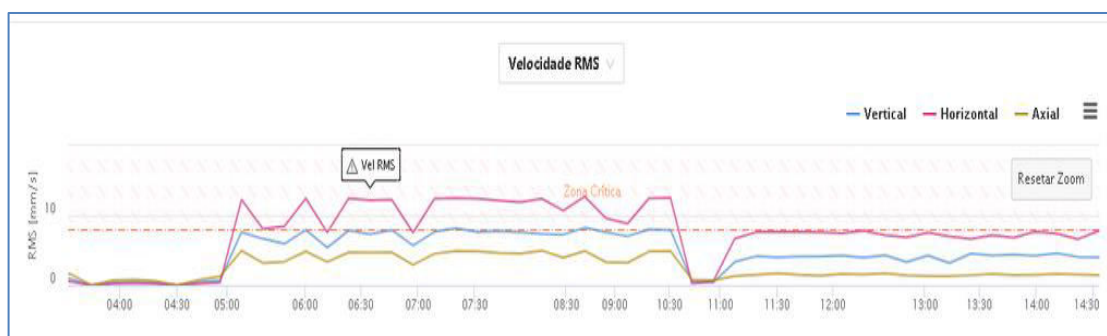
Fonte: (TRACTIAN, 2022).

Com os alertas emitidos pela plataforma, o usuário pode analisar e gerar uma manutenção preventiva para solucionar ou, ao menos controlar, as irregularidades detectadas pelo sensor. O espectro de vibração ilustrado anteriormente refere-se ao misturador de areia. Após a manutenção preventiva realizada, houve uma diminuição em 40% na vibração do equipamento.

Depois de um certo período de uso dos sensores, foi possível averiguar o padrão de velocidade de vibração do ativo monitorado, que neste caso, resumem-se em 8 mm/s no eixo horizontal e 4,5 mm/s no eixo vertical.

Outro alerta gerado foi devido ao aumento de vibração no eixo horizontal, apresentando alguns picos anômalos de 28,908 mm/s e no eixo vertical de 23.902 mm/s, conforme está ilustrado na Figura 49.

Figura 49 - Alerta gerado devido ao aumento no nível global de vibração



Fonte: (TRACTIAN, 2022).

Logo após o alerta gerado, o gestor pôde ter uma rápida tomada de decisão, optando por uma manutenção preventiva que diminuiu em 65% no eixo horizontal e 50% no eixo axial as vibrações anteriores, resultando respectivamente em 10 mm/s e 13 mm/s.

Os destaques após implementação dos sensores foram que a confiabilidade e a disponibilidade aumentaram, reduzindo as intervenções não programadas nos ativos. Outro ponto positivo é a praticidade de comunicação entre o usuário e a plataforma, que segundo Tiago, economiza tempo e dinheiro por ser possível se comunicar de maneira 4G.

4 CONCLUSÃO

Com a chegada da globalização, as empresas viram-se obrigadas a melhorarem a qualidade de seus produtos e o desempenho de seus sistemas, tudo visando a competitividade do mercado de trabalho. Para isso, surgiram as necessidades de redução na probabilidade de falhas em suas linhas de produção. O motor de indução trifásico (MIT) por ser o grande responsável em manter essas linhas de produção em operação, ganhou grande destaque, além de preocupações na prevenção de possíveis falhas desses equipamentos.

A manutenção preditiva representa o presente das equipes modernas na gestão de ativos de empresas, pois há uma grande facilidade na coleta e análise de dados de equipamentos em operação. Com a chegada das tecnologias inovadoras da Indústria 4.0, a manutenção preditiva passou a representar o futuro também, uma vez que proporciona um controle ainda maior sobre as linhas de produção e na gestão de seus ativos.

Este trabalho partiu do interesse em se estudar e verificar a aplicação das tecnologias da indústria 4.0 no monitoramento de motores elétricos, afim de se prever falhas. Desta forma, objetivou-se o estudo dos sensores inteligentes atuando no monitoramento de motores elétricos.

Para tanto, realizou-se uma pesquisa bibliográfica por meio de buscas em diversas bases de dados para obtenção de materiais bibliográficos correspondentes à temática abordada. Esta etapa foi importante para a verificação dos principais produtos que estão em uso atualmente no mercado bem como suas vantagens e desvantagens. Portanto, foi possível verificar a efetividade destas tecnologias no planejamento de manutenções, proporcionando melhor disponibilidade dos equipamentos e redução dos custos de manutenção. Além de melhor direcionar as equipes de manutenção nas tomadas de decisões, resultando em uma melhora significativa referente à confiabilidade e manutenibilidade das intervenções preditivas nos ativos.

Como sugestão para trabalhos futuros, fazer uma análise específica de como a implementação destes sensores inteligentes melhoram a gestão de manutenção nos setores industriais.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB ABILITY – Smart Sensor [S.l.]; Disponível em: < <https://new.abb.com/motors-generators/service/advanced-services/smart-sensor> >, Acesso em: Abril de 2022.

ABECOM [S.l.]; Falhas em motores elétricos: saiba quais são as principais, Disponível em <<https://www.abecom.com.br/falhas-em-motores-eletricos/>>, Acesso em: Abril de 2022.

ALMEIDA, PAULO S., “Indústria 4.0: princípios básicos, aplicabilidade e implantação na área industrial”, São Paulo: Érica, 2019.

ANJOS, L. O.; SILVA, T. J. S.; SEVERO, D. S. M., OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA EM MOTORES ELÉTRICOS DE BAIXA POTÊNCIA: Um artigo original, 2020.

ARAÚJO, R. S., “Desgaste Prematuro e Falhas Recorrentes em Rolamentos de Motores de Indução Alimentados por Inversores: Análise e Proposta de Solução”, PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. 2004.

ABNT, Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade: terminologia. Rio de Janeiro, 1994.

BALDISSARELI, L.; FABRO, E. “Manutenção Preditiva na Indústria 4.0”, Scientia cum Industria, vol.7, n. 2, pp. 12-22, 2019.

BORLIDO, D. J. A. “Indústria 4.0: aplicação a sistemas de manutenção”. FEUP, 2017.

CAMPOS, R.N. Análise Experimental de Balanceamento de Rotores pelo Método de Otimização “Four Run Method Accelerated.” Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

DALENOGARE, L. S., PRETTO, A.; WIECZOREK, G.; AYALA, N. F.; BENITEZ, G. B.; FRANK, A. G. et al., “O Impacto da Indústria 4.0 no Modelo de Negócios de Empresas de Automação Brasileiras”, IJIE, Florianópolis, SC, Brasil, V.11, N.21, P.01-13, 2019.

DIAS, Gabriel Martins. O que é Indústria 4.0?, Doutor IoT, São Paulo, 26 de jul. de 2022. Disponível em: <<https://www.doutoriot.com.br/negocios/industria-40/o-que-e/>>. Acesso em: 29 de jul. de 2022.

GURSKI, Carlos Alberto. Curso de formação de operadores de refinaria: noções de confiabilidade e manutenção industrial. Curitiba: Petrobras: UnicenP, 2002.

JÚNIOR, L. C. F.; SILVA, R. S. “Máquinas Elétricas”. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.

KARDEC, A.; NASCIF, J. “Manutenção: Função Estratégica”, 3ª ed., Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2009.

KOSOW, I. L. “Máquinas Elétricas e Transformadores”. Porto Alegre: Globo, 1982.

LABRE, P. P. V. Q., “Análise de Vibração e Termografia na Manutenção e Confiabilidade de Equipamentos em uma Usina de Beneficiamento de Sementes”, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

MARTINS, F. J.; FABRO, E. “Uso do sensor inteligente na manutenção preditiva do motor de uma extrusora”. Scientia cum Industria, vol. 8, n. 2, pp. 1-9, 2020.

MORAES, R. B. S., “Indústria 4.0: Impactos Sociais e Profissionais”, 1ª ed. – São Paulo: Blucher, 2021.

NETTO, A. P. “Manutenção Industrial”. Indaial: UNIASSELVI, 2018.

PAZ, A. C. M.; LOOS, M. J. “A importância da computação em nuvem para a indústria 4.0”. Revista Gestão Industrial, vol. 16, n. 2, pp. 166-185, 2020, doi: 10.3895/gi. v16 n2.9317.

RADETZKE, V. S.; SANTOS, A. F. L.; LIMANA, E. S.; TAMBARA, V. B.; SILVA, A. C. C. J., “Conceitualidade x Realidade, a conjuntura atual para a implementação da indústria 4.0 no Brasil”. IFFAR, 2020.

SACOMANO, J. B.; GOLÇALVES, R. F.; SILVA, M. T.; BONILLA, S. H.; SÁTYRO, W. C., “Indústria 4.0 conceitos e fundamentos”. 2018.

SHAEFFLER Smart Check, Disponível em: <<https://www.schaeffler.com.br/pt/products-and-solutions/industrial/industry4.0/digital-services/index.jsp>>, Acesso em: Abril de 2022.

SCHWAB, K. “A Quarta Revolução Industrial”. 1ª ed., 2016.

SILVA, D. A. Da., “Diagnóstico de Equipamentos de Propulsão Naval Através de Análise de Vibração”. Rio de Janeiro-RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

HONDA F; MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA Guia rápido para uma especificação precisa (SIEMENS), Ed 2006

TRACTIAN Sensor Inteligente [S.I.], Disponível em: < <https://traction.com/sensor-traction> >, Acesso em: Março de 2022.

UMANS, S. D., “Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley”. Porto Alegre: AMGH, 7ª ed. 2014.

WEG [S.I.]; Guia de especificação de Motores Elétricos, Disponível em: < <https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia->

de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf >, Acesso em: Abril de 2022.

WEG [S.l.]; Visão explodida motor de indução, Disponível em <
<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/he2/hd3/WEG-vista-explodida-do-motor-trifasico-w22-premium-efficiency-ie3-50009253-banner-portuguese-web.pdf> >
Acesso em: Abril de 2022.