



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE SOBRAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

YOHANNA MARIA MENEZES DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DA REDUÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO DE MOTORES
ELÉTRICOS A PARTIR DO USO DE TÉCNICAS PREDITIVAS FUNDAMENTADAS
NA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE**

SOBRAL-CE

2024

YOHANNA MARIA MENEZES DO NASCIMENTO

ANÁLISE DA REDUÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO DE MOTORES
ELÉTRICOS A PARTIR DO USO DE TÉCNICAS PREDITIVAS FUNDAMENTADAS NA
MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica do Campus de
Sobral da Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do grau de bacharel
em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof. Ma. Nilena Brito Maciel
Dias.

Coorientador: Prof. Dr. André dos Santos Lima.

SOBRAL - CE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- N199a Nascimento, Yohanna.
ANÁLISE DA REDUÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS A PARTIR DO USO DE TÉCNICAS PREDITIVAS FUNDAMENTADAS NA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE / Yohanna Nascimento. – 2024.
121 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2024.
Orientação: Profa. Ma. Nilena Brito Maciel Dias.
Coorientação: Prof. Dr. André dos Santos Lima.
1. manutenção. 2. MCC. 3. motores elétricos. I. Título.

CDD 621.3

YOHANNA MARIA MENEZES DO NASCIMENTO

ANÁLISE DA REDUÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO DE MOTORES
ELÉTRICOS A PARTIR DO USO DE TÉCNICAS PREDITIVAS FUNDAMENTADAS NA
MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica do Campus de
Sobral da Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do grau de bacharel
em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 25/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ma. Nilena Brito Maciel Dias (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. André dos Santos Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Me. Erick Frota da Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha família.

E a todos aqueles que já não posso encontrar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me mostrar que, apesar de todas as dificuldades, essa conquista chegaria em minha vida.

Aos meus pais, Aurélio, Tácia e Célia. Em especial, ao meu pai, que com muito esforço e dedicação sempre batalhou para me dar a melhor educação. Se cheguei aqui, foi porque ele preparou o caminho.

Ao meu companheiro, André, que foi minha calma, meu suporte e a alegria dos dias em que pensei em desistir.

Aos meus irmãos Yohanmes, Agda e João Davi, que sempre se mostraram orgulhosos da minha trajetória independente do que acontecesse.

Aqueles que se foram ao longo desses anos, Vó Antonieta, Vó Aurilene, Tia Bete e Tio Bebeto, que se fizeram presentes desde o colchão inflável que eu ganhei para dormir no primeiro semestre em Sobral até o último de seus dias, que eu possa orgulhá-los de onde estejam ao exercer minha profissão.

Aos professores orientadores deste trabalho, que dedicaram seu tempo e apoio.

“Não é o que o mundo reserva para você, mas
o que você traz para o mundo”
(Anne with an E)

RESUMO

Movidos pela competitividade do mercado e pela necessidade de atender requisitos operacionais cada vez mais exigentes, as indústrias têm buscado a mitigação de custos, juntamente com a otimização da disponibilidade e confiabilidade de seus sistemas. Nesse contexto, a gestão da manutenção surge como um segmento que oferece diversas oportunidades, com a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) se apresentando como uma alternativa para auxiliar as instituições a alcançarem um modelo de gestão da manutenção proativa, atingindo metas preestabelecidas com um ótimo custo-benefício. A MCC se baseia na utilização de técnicas e ferramentas de forma estruturada, implementando ações de manutenção estratégicas gerando o aumento da confiabilidade e disponibilidade total do sistema, consequentemente reduzindo os custos operacionais e otimizando a alocação de esforços de mão de obra. No entanto, a aplicação efetiva da MCC requer a execução de uma série de etapas, desde a compreensão dos sistemas que compõem a planta até a definição de planos de manutenção otimizados, focando na melhoria contínua do processo. Isso demanda um alto nível de maturidade das equipes de implementação e da alta gestão da empresa. Assim, considerando o intenso desenvolvimento da gestão de manutenção ao longo das gerações e as especificidades únicas de cada organização, é justificável adaptar as melhores práticas da MCC à realidade do negócio. Portanto, este trabalho realiza uma revisão histórica da manutenção, destacando as tendências globais que influenciaram a gestão de manutenção a ocupar a posição estratégica atual, com o objetivo de reunir um conjunto de ações para desenvolver uma metodologia de manutenção de motores elétricos focada em confiabilidade, redução de falhas e alocação eficiente de capital em uma indústria de grande porte.

Palavras-chave: manutenção; MCC; motores elétricos.

ABSTRACT

Driven by market competitiveness and the need to meet increasingly demanding operational requirements, industries have been seeking cost mitigation, alongside the optimization of the availability and reliability of their systems. In this context, maintenance management emerges as a sector that offers various opportunities, with Reliability-Centered Maintenance (RCM) presenting itself as an alternative to help institutions achieve a proactive maintenance management model, reaching pre-established goals with an excellent cost-benefit ratio. RCM is based on the structured use of techniques and tools, implementing strategic maintenance actions to reduce operational costs and optimize labor effort allocation, resulting in increased system reliability and overall availability. However, the effective application of RCM requires the execution of a series of steps, from understanding the systems composing the plant to defining optimized maintenance plans, focusing on continuous process improvement. This necessitates a high level of maturity from implementation teams and company senior management. Therefore, considering the intensive development of maintenance management across generations and the unique specifics of each organization, it is justifiable to adapt the best practices of RCM to the business reality. Hence, this work provides a historical review of maintenance, highlighting the global trends that influenced maintenance management to hold the current strategic position, aiming to gather a set of actions to develop a methodology for electric motors maintenance focused on reliability, fault reduction, and efficient capital allocation in a large-scale industry.

Keywords: maintenance; RCM; electric motors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma das revoluções industriais e seus principais aspectos	21
Figura 2: Fluxograma das filosofias de manutenção	26
Figura 3: Fluxograma de classificação da manutenção corretiva	32
Figura 4: Fluxograma de classificação da manutenção preventiva	35
Figura 5: Fluxograma de classificação da manutenção preditiva	39
Figura 6: Diagrama de decisão referente ao tipo de atividade de manutenção recomendada ..	41
Figura 7: Organograma de uma organização com PCM e Engenharia de Confiabilidade	42
Figura 8: Motores elétricos de corrente alternada	49
Figura 9: Vista explodida de um modelo de motor de indução	50
Figura 10: Comparativo entre tipos de rotores de motor de indução	51
Figura 11: Placa de identificação de um motor WEG – W22 Premium	52
Figura 12: Árvore de falha – motor parado	55
Figura 13: Árvore de falha – Motor sem partida	56
Figura 14: Árvore de falha – Motor sobreaquecido	56
Figura 15: Árvore de falha – Motor em curto circuito	57
Figura 16: Principais causas de falhas em rolamentos	60
Figura 17 - Características construtivas dos enrolamentos de um motor de indução trifásico	62
Figura 18: FTA dos eventos causadores de envelhecimento e falha em isolamentos	63
Figura 19: a. Coleta de imagem com termovisor; b. Visão de temperatura em infravermelho	66
Figura 20: Superfície de enrolamentos com presença de contaminação	76
Figura 21: Representação da corrente de fuga indutiva	77
Figura 22: circuito equivalente monofásico de um motor de indução trifásico	80
Figura 23: Representação da ferramenta PDCA.....	86
Figura 24: Máquina injetora rotativa de termoplástico	87
Figura 25: Modelo de compressor de ar	88
Figura 26: Modelo de bomba centrífuga	89
Figura 27: Modelo de <i>chiller</i>	89
Figura 28: Modelo de torre de arrefecimento	90
Figura 29: Exemplo de sistema de exaustão, com motor e torre	91
Figura 30: Esquema de sistemas que alimentam o processo de injeção	92
Figura 31: Instrumentos de coleta de dados de Análise de Vibração	97
Figura 32: Instrumento de coleta de dados de Análise de Circuitos de Motores.....	98

Figura 33: Fluxo de ações da rotina de manutenção preditiva	100
Figura 34: ME-0187 diagnosticado com características de contaminação, após aberto	106

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Tipos de curva de probabilidade de falha	27
Gráfico 2: Representatividade das curvas dos padrões de falha	28
Gráfico 3: Curva de Potencial de Falha	29
Gráfico 4: Distribuição de consumo energético nas indústrias	47
Gráfico 5: Distribuição do consumo de energia de motores na indústria brasileira	47
Gráfico 6: Componentes que apresentam falhas em motores.....	58
Gráfico 7: Principais modos de falhas em motores elétricos.....	58
Gráfico 8: Causas de falhas em motores elétricos	59
Gráfico 9: Causas ocultas de falhas em motores elétricos	60
Gráfico 10: Variação de temperatura ao longo do tempo	66
Gráfico 11: Frequências de vibração características por tipo de falha	69
Gráfico 12: Comportamento das correntes do circuito equivalente do sistema de isolamento	74
Gráfico 13: Perfil de Resistência de Isolação de uma isolação saudável	75
Gráfico 14: Perfil de resistência de isolação na presença de umidade	77
Gráfico 15: Perfil de resistência de isolação na presença de contaminação	78
Gráfico 16: Perfil de resistência de isolação envelhecido	79
Gráfico 17: Visualização gráfica dos percentuais de classificação por sistema	102
Gráfico 18: Classificação geral dos motores do parque fabril.....	102
Gráfico 19: PRI de um motor com umidade antes e depois da manutenção corretiva	104
Gráfico 20: PRI de um motor com contaminação antes e depois da manutenção corretiva ..	105
Gráfico 21: Comparativo do índice de queima de motores entre 2021 e 2023	107
Gráfico 22: Classificação geral dos motores ao final de 2023	108
Gráfico 23: Acumulado de custos com rebobinamento de motores ao longo dos anos	109
Gráfico 24: Comparativo de custos de manutenção – geral	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes térmicas	53
Tabela 2: Graus de proteção contra corpos sólidos estranhos e contato acidental	53
Tabela 3: Indica o grau de proteção contra penetração de água no interior do motor	53
Tabela 4: Valores de referência de limites de vibração global	68
Tabela 5: Valores de referência para envelopes de aceleração por classe de rolamento	68
Tabela 6: Níveis de tensão recomendados para os ensaios de isolamento	72
Tabela 7: Valores de referência para resistência de isolamento medida a 40°C	72
Tabela 8: Valores de referência para índice de polarização	73
Tabela 9: Valores de referência para Análise de Circuito de Motores	81
Tabela 10: Mapeamento de motores por sistema e potência	91
Tabela 11: Definição de níveis de gravidade da matriz de priorização	92
Tabela 12: Definição de níveis de urgência da matriz GUT	93
Tabela 13: Definição de níveis de tendência da matriz GUT	93
Tabela 14: Plano de manutenção preditiva de motores	94
Tabela 15: Valores de referência para resistência de isolamento	97
Tabela 16: Valores de referência dos parâmetros obtidos com o Motor Genie (MCA)	99
Tabela 17: Classificação do equipamento com base nos critérios de severidade	101
Tabela 18: Resultados da aplicação do plano de ensaios, primeira medição	103
Tabela 19: Tabela de cálculo do índice de priorização – Modelo de uma semana aleatória ..	103
Tabela 20: Quantidade de equipamentos rejuvenescidos na oficina de motores	106
Tabela 21: Classificação dos motores, pós ações recomendadas	107
Tabela 22: Estratificação dos custos de manutenções realizadas na oficina de motores	109
Tabela 23: Mapeamento dos modos de falhas de queimas de motores	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos
CBM	<i>Condition-Based Maintenance</i>
CC	Corrente Contínua
CCV	Custo do Ciclo de Vida do Ativo
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>
FS	Fator de Serviço
FTA	<i>Failure Tree Analysis</i>
GUT	Gravidade, Urgência e Tendência
HP	<i>Horse Power</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IP	<i>Ingress Protection</i>
IP	Índice de Polarização
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
kW	Kilowatt
MCA	<i>Motor Circuit Analysis</i>
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
MIT	Motor de Indução Trifásico
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PCM	Planejamento e Controle de Manutenção
PCV	Policloreto de Vinila
PDCA	<i>Plan, Do, Check, Act</i>
PF	<i>Potential Failure</i> ou Potencial de Falha
POP	Procedimento Operacional Padrão
PRI	Perfil de Resistência de Isolamento
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
RI	Resistência de Isolação
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	19
2 MANUTENÇÃO COMO FUNÇÃO ESTRATÉGICA	20
2.1 Gerações da manutenção	22
2.1.1 Primeira geração da manutenção	22
2.1.2 Segunda geração da manutenção	23
2.1.3 Terceira geração da manutenção	23
2.1.4 Quarta geração da manutenção	24
2.1.5 Quinta geração da manutenção	25
2.1.6 Sexta geração da manutenção	25
2.2 Tipos de manutenção	26
2.2.1 Manutenção corretiva	30
2.2.2 Manutenção preventiva	32
2.2.3 Manutenção preditiva.....	36
2.3 Abordagens contemporâneas da gestão da manutenção	40
2.3.1 Planejamento e controle da manutenção	42
2.3.2 Manutenção centrada em confiabilidade	43
3 CONTEXTO INDUSTRIAL	46
3.1 Motores elétricos	48
3.1.1 Tipos de motores elétricos	48
3.1.2 Especificidades de motores elétricos	51
3.2 Falhas em motores elétricos	54
3.2.1 Falhas em rolamentos	60
3.2.2 Falhas em enrolamentos	61
3.3 Métodos de predição de falha em motores elétricos	64
3.3.1 Monitoramento de temperatura	65
3.3.2 Análise de vibrações mecânicas	66
3.3.3 Padrão indicativo de falha por variação de parâmetros elétricos	69
3.3.3.1 Ensaio de resistência de isolamento	70
3.3.3.2 Análise de Circuito de Motores	80
4 ESTUDO DE CASO	83
4.1 Motivações e Contextualização	83
4.2 Estruturação da metodologia	85
4.2.1 Planejamento e mapeamento da criticidade de processos e equipamentos	87

4.3 Desenvolvimento do Plano de Manutenção Preditiva	93
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	101
6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	112
REFERÊNCIAS	114
ANEXO A – RELATÓRIO DIAGNÓSTICO – ENSAIO DE MOTORES	121
ANEXO B – FORMULÁRIO DE MANUTENÇÃO – OFICINA DE MOTORES	122

1 INTRODUÇÃO

O mercado industrial passou por constantes mudanças desde seus primeiros passos, datados do final do século XVIII. Estas mudanças, apesar de todas as fases da revolução industrial e contextos históricos, possuem um propósito em comum: competitividade e poder econômico. Esse propósito fomentou uma intensa renovação de todos os segmentos que compõem a estrutura industrial, incluindo a manutenção.

Manutenção é termo utilizado pelas organizações para abordar a forma como previnem as falhas nas suas instalações físicas, cujo papel é fundamental na produção dos seus bens e serviços (SLACK *et al.*, 2011). Esse conceito se estabeleceu ao longo dos anos em três modalidades: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva. Cada modalidade possui características relevantes para a produtividade e são estabelecidas com base em uma série de fatores. No ambiente industrial, estes fatores são determinados pelas funções de produção e manutenção, que compartilham os equipamentos destinados à operação das linhas e processos. Nesse sentido, um dos maiores desafios para a manutenção é atingir um perfil de disponibilidade dessas máquinas através dos planos de gestão de manutenção, diante do cenário conflitante de paradas de máquinas em meio à rotina produtiva.

Entretanto, com a automatização dos parques industriais, os crescentes volumes de produção e a exigência de controle de qualidade, a ocorrência de uma parada de produção pode gerar prejuízos consideráveis em toda a cadeia. Desse modo, a prevenção dessas paradas envolve esforços de várias áreas, reforçando a necessidade de um setor de manutenção estruturado e alinhado estrategicamente com o processo de produção (VIANA, 2020).

Nesse contexto, a manutenção passa a ter duas abordagens, a manutenção tradicional e a manutenção estratégica. Para os autores Kardec e Nascif (2019), para ser estratégica, a manutenção necessita estar alinhada aos pilares de negócio da empresa. Isto é, deve-se deixar o modelo tradicional, que realiza reparos quando os equipamentos falham, e agir antes, estruturando alternativas que eliminem as paradas não programadas. Com esse intuito, surgiram metodologias voltadas para a atuação da manutenção como função estratégica e o conceito de um novo indicador que teria como objetivo medir a capacidade de um equipamento estar operando dentro dos parâmetros esperados, das condições de produção e sem riscos de parada imprevisíveis: a confiabilidade.

Nessa nova perspectiva da manutenção, uma das metodologias que ganhou destaque pelos resultados e modelo de gestão foi a Manutenção Centrada em Confiabilidade.

Esse método surgiu com o objetivo de direcionar os esforços da manutenção para componentes e sistemas onde a confiabilidade é fundamental, contudo, sua função principal é a adoção de melhores práticas por parte da manutenção para garantir o desempenho, a segurança e a preservação do ambiente a um melhor custo-benefício (MOUBRAY, 2000). Assim, a manutenção, antes vista como uma despesa industrial, vem firmando sua identidade como função estratégica, apresentando os impactos positivos da gestão de manutenção por meio dos conceitos de engenharia e confiabilidade (PEREZ-GONZALEZ e FRAMINAN, 2014).

Atualmente, a manutenção tem se destacado através da mudança de padrões e tem sido abordada como uma oportunidade para aumentar a lucratividade. De maneira geral, essa perspectiva deriva da característica de previsibilidade obtida por meio de estudos relacionados à manutenção preditiva. A implantação de técnicas de predição para a possibilidade de prever paradas e atuar de maneira técnica tem sido cada vez mais explorada por pesquisadores com o propósito de maximizar as aplicações desse modelo de manutenção, através da proposição de novas metodologias que incrementem o conhecimento científico sobre as teorias até então estudadas (LEME, 2017).

Ao mesmo tempo em que os conceitos de manutenção precisaram se ajustar ao mercado e às novas tecnologias, os métodos produtivos também passaram por mudanças com o objetivo de alcançar modelos de produção mais eficientes. Dentre as contribuições tecnológicas mais significativas, as máquinas elétricas se destacam como um dos artificios de produtividade em larga escala utilizados até os dias de hoje. Assim, os motores elétricos se tornaram a força motriz principal para as aplicações industriais.

Vale ressaltar que a aplicação dessas máquinas não se restringe a fins gerais. Sua utilização abrange funções de risco e em ambientes severos, pela robustez e versatilidade. Nas plantas industriais, o uso geral de motores elétricos inclui bombas de sucção e de elevação de pressão, transportadores verticais e horizontais, máquinas-ferramentas, máquinas centrífugas, prensas, elevadores, equipamentos para embalagem entre outros. Dentre as aplicações em locais de risco ou zonas perigosas, podem estar fisicamente localizados em plantas petroquímicas e de gás natural, por exemplo, mostrando sua importância direta e indireta para o processo industrial (LAMIN FILHO; PEDERIVA e BRITO, 2014).

Dada a importância deste item para o segmento industrial, a necessidade de disponibilidade dessas máquinas reforça a importância e urgência da implementação de técnicas avançadas de manutenção. Assim, quando a confiabilidade de um motor interfere diretamente no desempenho da produção, a manutenção preditiva de motores elétricos torna-se imprescindível (PICAZORÓDENAS *et al.*, 2013). Vale ressaltar que isso gera reconhecimento

da manutenção como fator de impacto na competitividade e lucratividade (TROJAN e MORAIS, 2012).

1.1 Objetivos

Diante da conjuntura que permeia uma gestão de manutenção estratégica e da visualização dos motores elétricos como prioridade na criticidade dos processos de manutenção, este estudo de caso tem por objetivo realizar uma revisão dos principais tópicos referentes a manutenção e aplicações de manutenção à motores elétricos, de modo a analisar a eficácia da implementação de um modelo de gestão de manutenção centrado em confiabilidade, no aprimoramento e aplicação de métodos de predição de falhas em motores elétricos de um parque industrial.

As observações deste estudo pretendem:

- Solução de problemática 1: Propor estratégias para redução de custos de manutenção com falhas e paradas não programadas de motores elétricos;
- Solução de problemática 2: Determinar a causa raiz, para a recorrência de queima de motores do cenário de estudo;
- Estabelecer um modelo de sistema de gestão de manutenções preditivas;
- Criar indicadores de controle de manutenção industrial, *Key Performance Indicator* (KPI);
- Fornecer conceitos e dados que contribuam com os estudos na área.

2 MANUTENÇÃO COMO FUNÇÃO ESTRATÉGICA

As organizações de classe mundial são aquelas que buscam a excelência em seus serviços e produtos. Para isso, estão em uma busca constante de inovação e aplicação tecnológica em todos os seus processos produtivos, a fim de direcionar o negócio de acordo com o que é exigido pelas mudanças do mercado (QUEIROZ, 2018).

Esses fatores de constante desenvolvimento e complexidade tecnológica são motivados pela lucratividade, isto é, produzir mais com o menor custo possível. Para alcançar esse cenário, é importante observar que, à medida que a produção aumenta, os custos envolvidos para produzir também irão subir. Assim, para melhorar a qualidade e manter uma margem de lucro em crescimento, as perdas de processos devem ser minimizadas.

Perdas no processo, são todos os eventos que interrompem a cadeia de confecção de um produto, podem ser relacionados à matéria-prima, a erros de operação, erros de planejamento ou a paradas repentinas das máquinas envolvidas. Este último, em especial, é o evento relacionado a perdas de maior impacto negativo nos custos, pois a ocorrência de parada repentina no processo pode comprometer a matéria-prima, o planejamento e conseqüentemente o produto final. Além disso, a mão de obra de operação, caso não seja remanejada, também é apontada como uma perda durante a indisponibilidade da máquina. Diante disso, observa-se a necessidade de definição de medidas que controlem e previnam essas paradas. Nesse sentido, o setor responsável por esse controle e previsão é a manutenção (LIZMAYER, 2015).

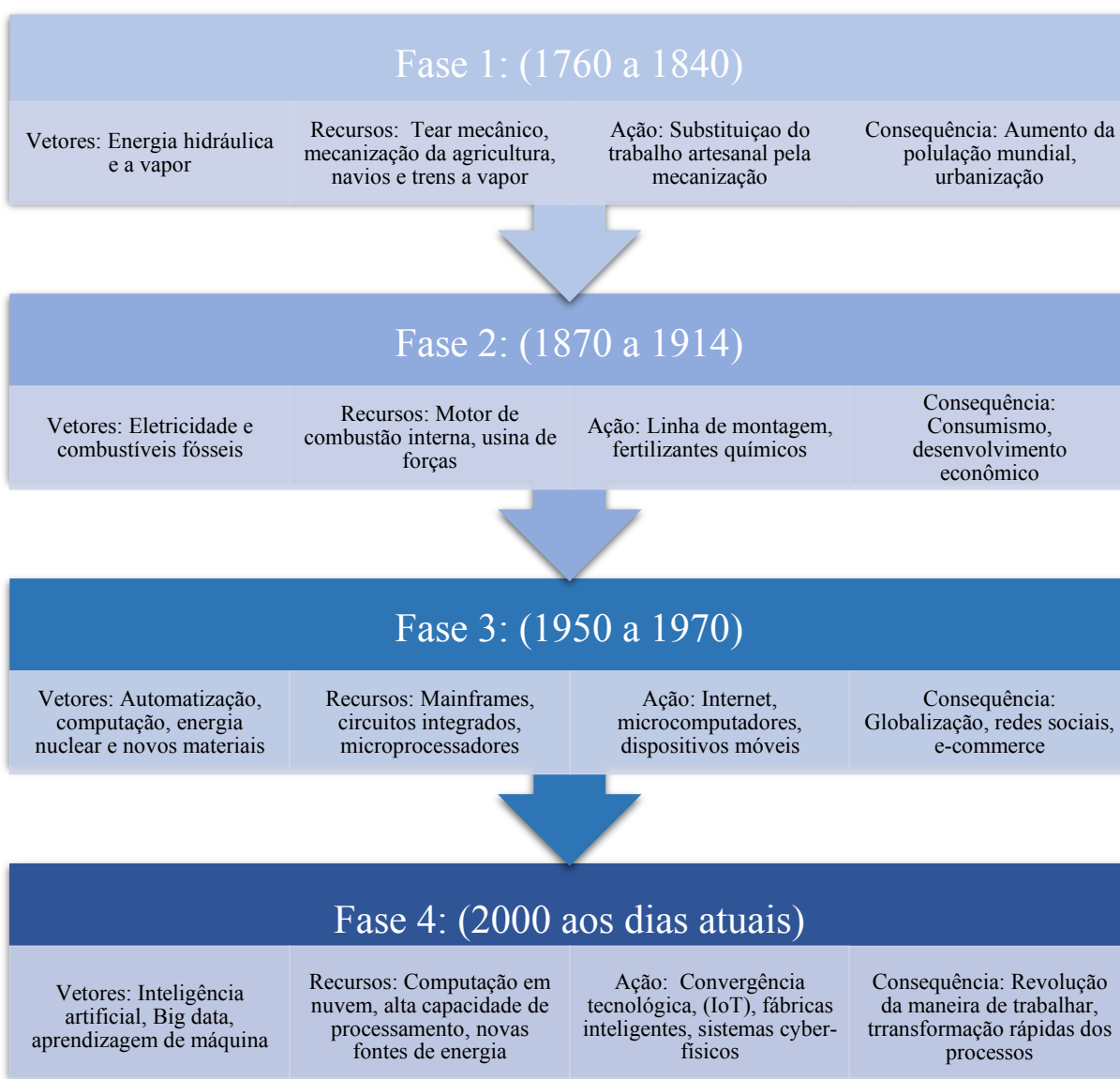
A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT define a manutenção na NBR 5462 - Confiabilidade e Manutenibilidade como “A combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida” (ABNT, 1994, p. 6). A norma também define o termo operação: “Combinação de todas as ações técnicas e administrativas destinadas a permitir que um item cumpra uma função requerida, reconhecendo-se a necessidade de adaptação na ocorrência de mudanças nas condições externas” (ABNT, 1994, p. 2). Note que essas ações, apesar de estarem relacionadas, são distintas e atuam correlacionadas entre si. A operação está ligada à disponibilidade de um determinado sistema ou equipamento funcionar de forma efetiva, dadas as condições e ajustes exigidos pelo cenário em que este está inserido, enquanto que a manutenção está relacionada ao conjunto de ações que possibilitam que um determinado sistema ou equipamento entre em operação (AZEREDO, 2023).

Nesse sentido, para Baran *et al.*, (2014), um dos setores de maior impacto dentro de uma empresa é a manutenção. O autor define a manutenção como sendo um elo que interliga

a operacionalidade dos processos com o corpo estratégico, tornando possível um maior valor agregado no cumprimento de metas e objetivos. Ainda, a gestão de manutenção consegue reduzir custos com equipamentos ociosos, ao mesmo tempo em que consegue ampliar a disponibilidade dos ativos e gerar um aumento da capacidade de produção. Assim, a manutenção é considerada uma função estratégica, agregando valor ao produto.

Entretanto, essa visão positiva da manutenção é recente. A necessidade gerada ao longo das revoluções industriais fomentou o aprimoramento de técnicas de manutenção que acompanhassem a tendência do mercado. Neste sentido, é ilustrada na Figura 1 a perspectiva da manutenção ao longo dos anos com a decorrência das revoluções no âmbito industrial e suas principais características.

Figura 1: Fluxograma das revoluções industriais e seus principais aspectos



Fonte: Elaborado pelo autor (OLIVEIRA, 2018 com adaptações).

2.1 Gerações da manutenção

Devido ao longo processo de desenvolvimento dos conceitos ligados à manutenção, autores como Teles (2019) defendem que a história da manutenção teve quatro marcos importantes, ou quatro gerações. Já Kardec e Nascif (2019) acreditam, com sua releitura, que podemos visualizar seis gerações que são resultados das adequações e das principais características de suas épocas.

2.1.1 Primeira geração da manutenção

A primeira geração aconteceu em paralelo com o fim da segunda revolução industrial e início da terceira revolução, os maquinários em sua maioria possuíam uma mecânica simples, de estrutura pouco complexa e eram superdimensionados. Dada a conjunção da economia da época, o foco operacional da máquina não era prioridade, o mantimento contava com atividades sistemáticas apenas de limpeza e lubrificação e os reparos eram realizados sempre após a quebra. Logo, a manutenção nessa primeira fase era do tipo corretiva não planejada. (KARDEC e NASCIF, 2019).

A primeira geração é marcada pelo fato de que realizar manutenção em uma máquina, era definido pelo ato de reparar um equipamento que estivesse avariado. Devido a isso, esse modelo de atuação gerou um alto custo com os grupos de reparo e com os consertos propriamente ditos, além de consequentemente gerarem uma baixa disponibilidade dos ativos (MORTELARI; SIQUEIRA; PIZZATI, 2019).

Esse período marcou também o fim da Segunda Guerra Mundial, quando a economia mundial estava aquecida e se preparava para a reestruturação do mercado, onde a competitividade crescia exponencialmente. Então, a busca por melhores estratégias produtivas e econômicas trouxe à tona a percepção de que não era economicamente viável operar até a quebra dos equipamentos, abrindo as portas para a implementação de ações preventivas (TELES, 2019).

2.1.2 Segunda geração da manutenção

Entre os anos de 1950 e 1970, notou-se uma maior demanda de produtividade alinhada à disponibilidade. A necessidade de aumento de produção fez com que a preocupação se voltasse apenas para a correção de falhas. Esse processo tinha o intuito de prevenir falhas, entretanto, por não possuir uma estruturação adequada, passou rapidamente a elevar os custos com manutenção. Assim, começaram as discussões para estruturar um sistema de prevenção eficaz, e então surgiu o que se conhece hoje como manutenção preventiva (HENRIQUE, 2023).

Na segunda geração, os custos de manutenção superaram consideravelmente os outros custos operacionais. Esse fator econômico exigiu ações estratégicas para as metas que a indústria possuía para os anos seguintes, trazendo à tona um dos pilares importantes da manutenção moderna, o Planejamento e Controle da Manutenção (KARDEC e NASCIF, 2019).

Segundo Rolim (2015), essa geração foi marcada por um sistema de produção em linha contínua, com o intuito de trazer esse conceito para a sociedade, gerando necessidade e dependência dos produtos produzidos, que resultava em aumento da demanda.

Outro marco importante foi o avanço nas técnicas aplicadas para otimizar e reduzir os impactos ocasionados por parada de máquinas. A manutenção entra em um processo de renovação de seus métodos, iniciando os primeiros testes de substituição de peças por carga horária de operação do equipamento. Além disso, no fim desta época também surgem especulações sobre o conceito de manutenção preditiva como uma opção, onde se tem como premissa avaliar a condição dos ativos e predizer qual o melhor momento para realizar ações corretivas. (ROLIM, 2015).

2.1.3 Terceira geração da manutenção

A terceira geração iniciou-se na década de 1970, período em que o processo de mudanças nas indústrias estava acelerado. As paradas de produção trouxeram vários problemas generalizados, visto que o mecanismo de produção da época era conhecido como *just-in-time*. Esse modelo de produção baseava-se na utilização de pequenos estoques para a produção que estava em andamento, de modo que qualquer parada na cadeia produtiva paralisava toda a fábrica. Com isso, verificou-se um impacto negativo na qualidade dos produtos, prazos de entrega e capacidade produtiva. Dessa forma, a necessidade de observação constante de condições de processos deu origem à manutenção preditiva (KARDEC e NASCIF, 2019).

Essa necessidade de monitoramento das variáveis do processo fez emergir a automação conjunta da eletromecânica. O crescimento desse conceito e os aparatos oferecidos para garantir qualidade, mostraram para os mais diversos setores da indústria que a confiabilidade e disponibilidade eram pontos-chave e estratégicos para o ganho de produtividade. No entanto, quanto mais automatizado se tornasse um processo, maiores as chances de ocorrências de falhas, o que dificultava o mantimento dos padrões de qualidade previamente definidos (KARDEC e NASCIF, 2019).

O Brasil acompanhava boa parte dos principais aspectos de cada fase com grandes estudos direcionados para o setor de manutenção, até que, em 17 de outubro de 1984, é fundada a Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos – ABRAMAN. Essa instituição tem promovido, nos últimos anos, eventos para difundir estudos, pesquisas e estratificação de dados industriais, se tornando um órgão fundamental para o crescimento dos investimentos em gestão de ativos e a divulgação da importância da gestão de manutenção estratégica (ABRAMAN, 2024).

2.1.4 Quarta geração da manutenção

A quarta geração da manutenção, oriunda do início dos anos 2000, trouxe a proposta de uma manutenção mais enxuta, minimizando as manutenções de natureza corretiva e preventiva, focada em analisar os efeitos e os modos das falhas. Esta nova perspectiva também aborda os conceitos de saúde e segurança e a preocupação com o meio ambiente. Neste ponto, com uma estratégia de gestão de manutenção e um planejamento voltado para confiabilidade e disponibilidade, notou-se uma redução das paradas de equipamentos e, conseqüentemente, dos impactos negativos no processo produtivo (KARDEC e NASCIF, 2019).

Autores como Teles (2019) e Silveira (2018) defendem a ideia de 4 gerações da manutenção e definem que a quarta geração trouxe o conceito de indústria 4.0. Ademais, Silveira (2018) afirma que essa nova classe de manutenção abrange as principais inovações tecnológicas e o que há de mais atualizado no mercado de Tecnologia da Informação - TI e sistemas automatizados implementados nos processos de manufatura. Isto é, com o uso de tecnologias como IoT (Internet das coisas), IoS (Serviços embutidos em IoT) e sistemas de monitoramento *in loco*, os processos industriais se tornaram cada vez mais dinâmicos, autônomos e eficazes.

2.1.5 Quinta geração da manutenção

Com o foco direcionado para a gestão de ativos, em 2005, surge a quinta geração da manutenção. Nessa fase, as máquinas deveriam trabalhar em sua máxima capacidade para a obtenção de melhor performance e retorno. Logo, com o monitoramento eficaz das condições de operação, possível de forma online e offline, a manutenção preditiva se torna a grande aposta nessa fase e seu crescimento foi ainda mais rápido (GREGÓRIO; SILVEIRA, 2018).

Segundo Kardec e Nascif (2019), nessa fase surgiu uma grande preocupação em alcançar os pontos ótimos de operação das máquinas e com a garantia da qualidade de execução dos planos sistemáticos. Essa preocupação estabeleceu modelos de excelência com engenharia de manutenção e seus resultados apresentaram impactos diretos no mantimento do negócio. Aparecendo mais uma vez, o setor de manutenção como fator influente nas tomadas de decisões e agravante de resultados planejados sendo alcançados.

2.1.6 Sexta geração da manutenção

A ideia de o mundo estar passando pela sexta geração da manutenção é defendida e explicada pelos autores Kardec e Nascif (2019). Segundo o livro “Manutenção: função estratégica” publicado em 2019, a sexta geração foi criada em 2010 na Alemanha, com a ascensão do conceito de indústria 4.0. Esse termo foi associado a uma série de estratégias de produtividade com as ferramentas tecnológicas tratadas na 4ª revolução industrial adotada em 2012 pelo governo alemão. Nesse contexto, o cenário de complementar IoT, IoS, automação, captura e análise de dados (Big Data) com inteligência artificial tornam possíveis opções de previsibilidade e estratégias de uma forma nunca vista antes no cenário mundial. Além disso, essa variedade de ferramentas torna possível um aprimoramento do tipo de controle de variáveis existente e controle de máquinas do sistema. O banco de dados, em conjunto com esse sistema de controle aprimorado, agora terá a autonomia de prever comportamentos e antecipar tomadas de decisão. Esse sistema independente e circular é denominado manutenção inteligente, com uma nova característica que diferencia essa fase das outras, a manutenção prescritiva (VIANA, 2020).

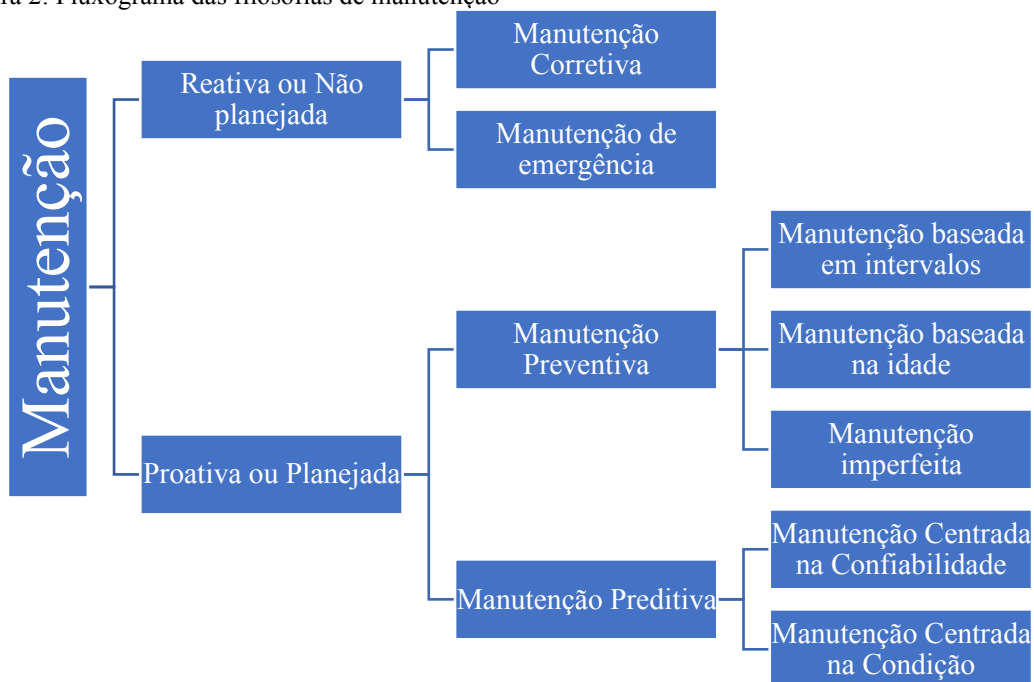
Apesar dos problemas políticos e de se estimar um atraso em cerca de 50 anos, quando os avanços industriais do Brasil são comparados com as revoluções industriais de países centrais, observam-se conquistas relevantes e que tiveram grandes impactos nos setores de

inovação e produtividade. Assim, quando ações de manutenção possibilitam crescimento financeiro, garantindo qualidade, confiabilidade e disponibilidade dos ativos, estas passam a ser ações estratégicas de negócio (VIANA, 2020).

2.2 Tipos de manutenção

Os autores Kothamasu, Huang e Verduin (2009) afirmam que as filosofias de manutenção possuem diversos aspectos que as distinguem entre si, diferenciando-as como reativas e proativas. Deste modo, a fim de diferenciar as principais filosofias de manutenção, é exposto na Figura 2 um esquema destacando os principais tipos de manutenção com base em seus aspectos.

Figura 2: Fluxograma das filosofias de manutenção



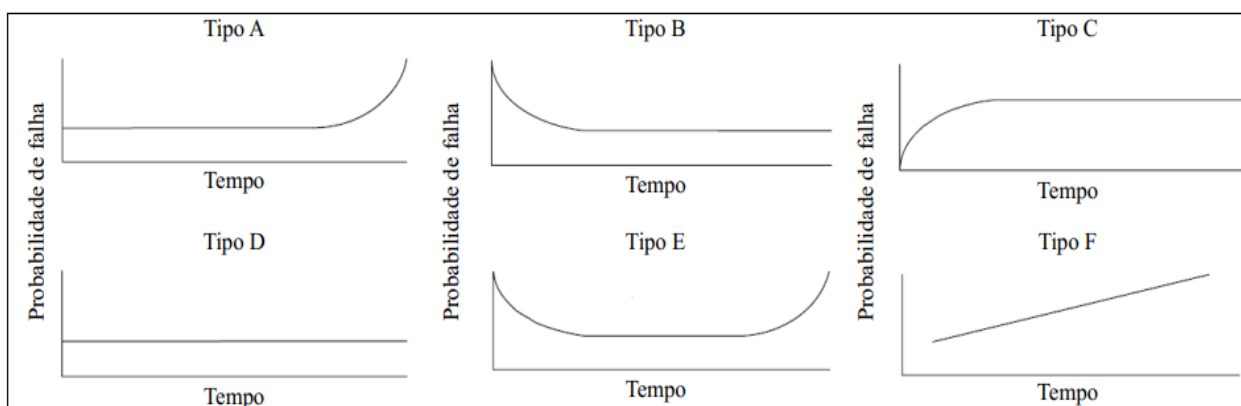
Fonte: Elaborado pelo autor (KOTHAMASU, HUANG e VERDUIN, 2009 com adaptações).

Assim, para melhor entendimento de como se classificam os tipos de manutenção, faz-se necessário ter clareza sobre o que de fato são as falhas e suas tipicidades, seu comportamento e suas variações.

A saber, a NBR 5462:1994 – Confiabilidade e Mantenabilidade define falha como sendo o evento do término da capacidade de um item desempenhar a função requerida, onde após isto, se estabelece um estado de pane.

Ao longo das gerações, nota-se a predominância da manutenção baseada no tempo, como evidenciado durante a segunda geração, onde a visão adotada era que a falha estava sempre ligada ao tempo de operação. Logo, a partir desse entendimento, era esperado que a probabilidade da ocorrência de falhas aumentasse com o passar do tempo para todo e qualquer sistema. Entretanto, estudos práticos conduzidos na década de 90 comprovaram que este comportamento não é um padrão válido para todos os componentes (NASA, 2008). Assim, no Gráfico 1, estão dispostos os padrões de curvas obtidos no estudo, onde a probabilidade de falha é plotada em função do tempo.

Gráfico 1: Tipos de curva de probabilidade de falha



Fonte: NASA, (2008).

De forma pioneira, em 2008, a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos da América (*National Aeronautics and Space Administration – NASA*) demonstrou seis tipos de padrões de probabilidade de falha com relação ao tempo de operação de uma máquina ou componente. São eles:

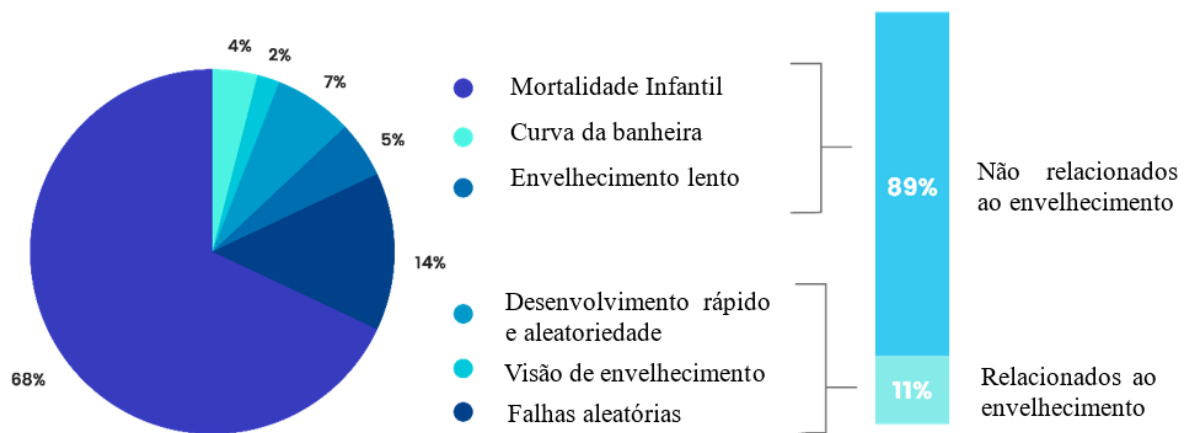
- A. Onde a probabilidade de falha é constante e aumenta repentinamente ao se aproximar do final da vida útil do equipamento;
- B. Onde a probabilidade de falha é alta logo no início da operação (mortalidade infantil), cai repentinamente até atingir um determinado valor e se mantém constante;
- C. Onde a probabilidade de falha é mínima no início da operação, mas aumenta rapidamente até alcançar um determinado valor onde se mantém constante;
- D. Onde a probabilidade de falha é sempre constante;
- E. Conhecida como curva da banheira, combina os tipos A e B;

F. Com o aumento da probabilidade de falha desde o início da operação, sem a possibilidade de identificar um momento de aumento drástico da probabilidade de falha.

Esses principais tipos de padrões de falhas podem descrever o comportamento de uma infinidade de sistemas, a depender de suas particularidades construtivas e operativas, evidenciando que não é apenas o tempo que definirá quando as falhas irão ocorrer.

De fato, a distribuição dos tipos falhas de acordo com suas probabilidades obtido pelo estudo é apresentada no Gráfico 2.

Gráfico 2: Representatividade das curvas dos padrões de falha



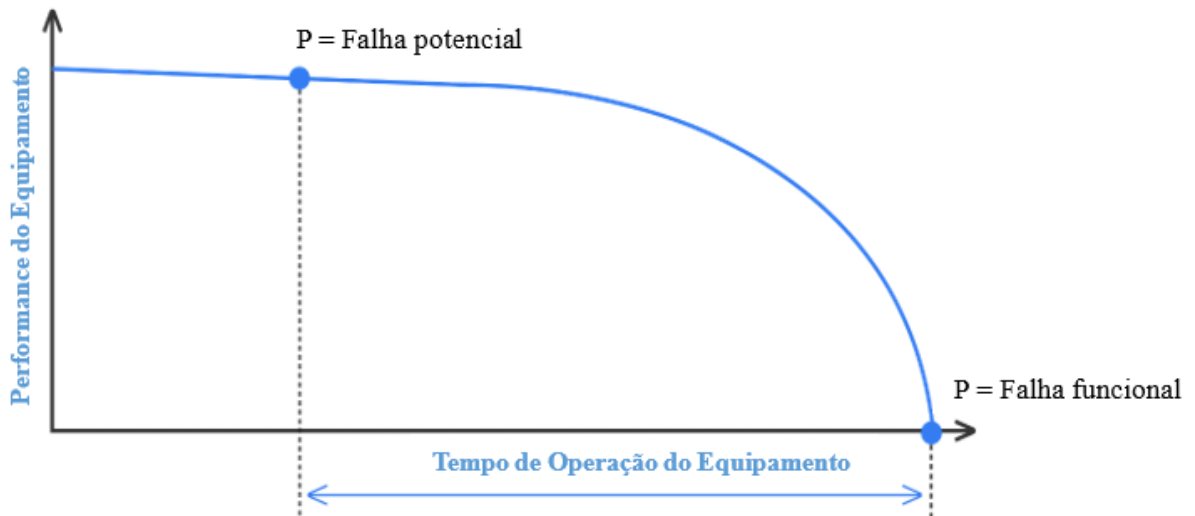
Fonte: NASA, (2008).

Por tanto, foi observado no estudo que apenas 11% das falhas estão relacionadas ao envelhecimento do equipamento. Isso comprova que, com a devida gestão de manutenção, 89% dos equipamentos poderão estar confiáveis e disponíveis em um tempo maior que o esperado (MARINELLI, 2022).

Para tanto, faz-se necessário o entendimento do comportamento da performance do equipamento em função do tempo. A curva que apresenta esse comportamento é conhecida como curva PF - *Potential Failure* ou Potencial de Falha, ilustrada no Gráfico 3.

Esta análise é uma potente ferramenta diagnóstica na gestão de manutenção, visto as possibilidades de intervenções antes da falha. De forma resumida, a curva PF consiste em um gráfico representado por dois eixos principais, onde é demonstrado a performance do equipamento em relação à sua durabilidade (MARINELLI, 2022).

Gráfico 3: Curva de Potencial de Falha



Fonte: Elaborado pelo autor.

A depender do nível do estudo realizado, muitos pontos podem ser inferidos da curva PF, mas dois deles são particularmente importantes, conforme destacados no Gráfico 3. São eles:

- Ponto P (potencial): pode-se chamá-la de modo de falha ou sintoma. É o momento em que a falha nasce no ativo, podendo ainda estar em seu estágio inicial, sendo detectável por técnica de Manutenção Preditiva, mas faz com que sua performance caia. (MARINELLI, 2022).
- Ponto F (funcional): ao contrário da falha potencial, a falha funcional se caracteriza por ocasionar a incapacidade do ativo em continuar exercendo as suas funções de maneira eficaz e satisfatória. Uma falha funcional inclui a incapacidade de funcionar no nível de desempenho em que foi especificado como ideal e/ou satisfatório, sendo de fácil detecção, podendo ser verificada através da manutenção preditiva e preventiva (MARINELLI, 2022).

2.2.1 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva é definida pela NBR 5462:1994 – Confiabilidade e Manutenibilidade, como “manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida” (ABNT, 1994).

Na manutenção corretiva, a falha funcional do equipamento precisa ocorrer para que o reparo seja realizado. Assim, esta manutenção também é conhecida como manutenção em falhas (NAYRAN, 2012). Entretanto, sempre que possível, a ação corretiva deve ser realizada logo após a falha, de forma a evitar maiores perdas e complicações aos instrumentos de produção, à segurança do operador e ao meio ambiente (VIANA, 2020).

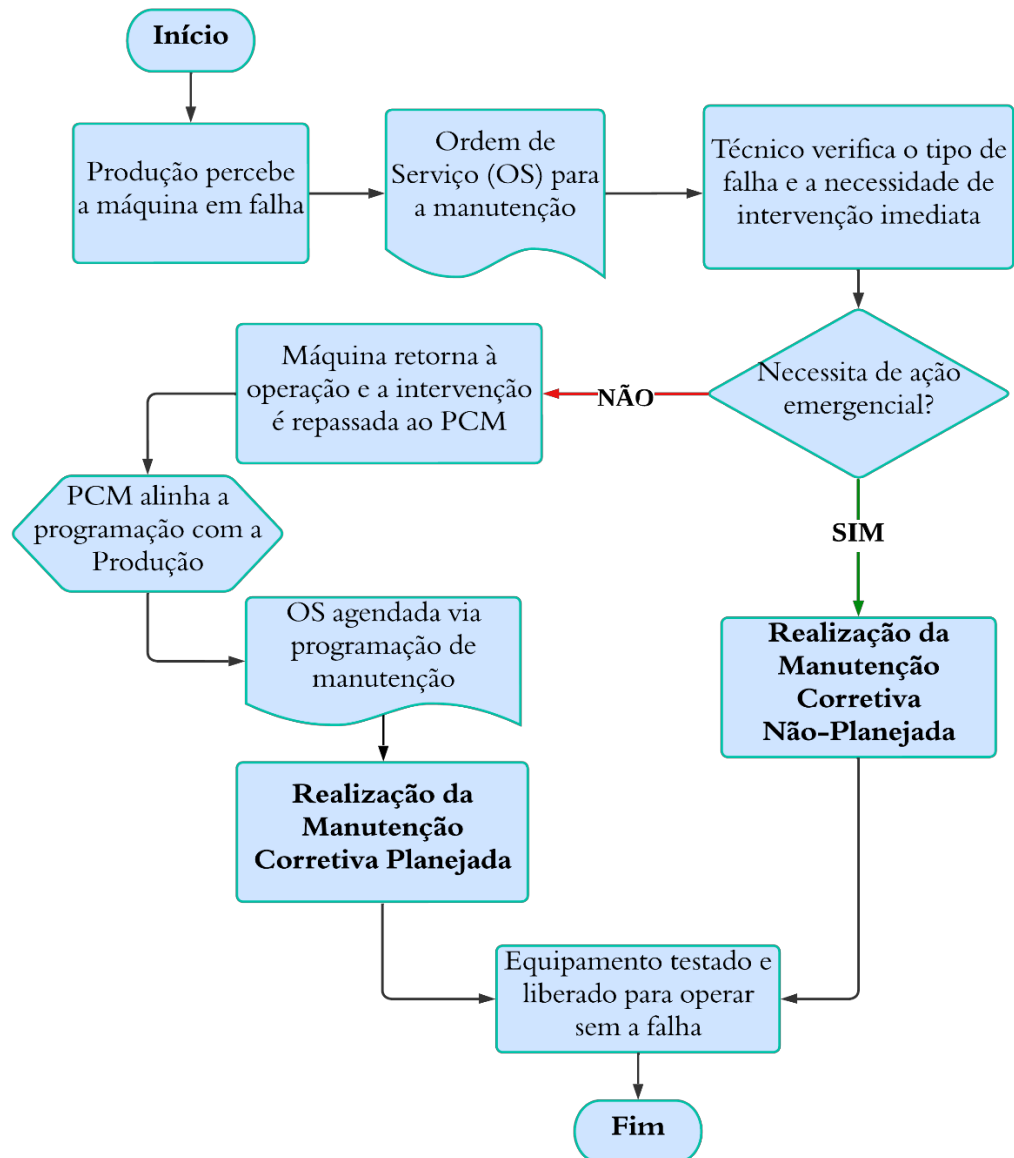
Para Kardec (2019), a manutenção corretiva é caracterizada por ser realizada em equipamentos que apresentam defeito ou um desempenho diferente do esperado, e apresenta os conceitos para as duas perspectivas da manutenção corretiva.

- a. **Manutenção Corretiva Não Planejada:** “É a manutenção que não foi programada e consequentemente implica em custos mais altos, pois a produção é interrompida devido à quebra inesperada do equipamento”.
Esta modalidade de manutenção acontece imediatamente após a ocorrência de problemas e tem o objetivo de reestabelecer a máquina e seu desempenho. Por ser uma ação reativa, quase sempre acontece em cunho emergencial para atender situações inesperadas que comprometem a disponibilidade do equipamento e a capacidade de produção. Vale ressaltar o agravante gerado aos custos de manutenção envolvendo mão-de-obra, recursos e principalmente as perdas ao longo de toda a cadeia de produção (KARDEC e NASCIF, 2019).
- b. **Manutenção Corretiva Planejada:** A manutenção corretiva planejada é quando há a possibilidade de preparação para o atendimento da falha, logo, a situação não gerou uma parada de produção, mas há uma correção a ser realizada. Assim, é possível coletar informações para que haja planejamento da manutenção corretiva antes que a falha funcional aconteça, caracterizando-se por ter um custo menor e por possuir um processo mais rápido e seguro que as atividades não planejadas. (KARDEC e NASCIF, 2019).
A manutenção corretiva planejada possui um conceito mais elaborado, quando comparada à manutenção corretiva não planejada, pois está ligada, de certo modo, à

prevenção, sendo ela a parte ativa pós-inspeção realizada nos equipamentos, seja essa inspeção periódica ou não. Assim, graças ao monitoramento dos ativos, é possível obter um conhecimento prévio da falha e buscar melhores soluções, bem como encontrar o período de menor impacto para a produção, para que essa intervenção seja realizada da melhor forma.

Então, é ilustrado no fluxograma a seguir da Figura 3, o processo de classificação da manutenção com base na tomada de decisão diante de uma falha e como ela se apresenta.

Figura 3: Fluxograma de classificação da manutenção corretiva



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.2 Manutenção preventiva

Conforme a NBR 5462, a manutenção é considerada preventiva quando “[...] efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item” (ABNT, 1994).

Esta modalidade de manutenção, como sua denominação sugere, é para prevenir danos. Para tal objetivo, essa manutenção é efetuada com base em um plano elaborado com antecedência e periodicidade bem definida, independente de uma necessidade imediata, com o

intuito de evitar avarias e falhas que comprometam o pleno funcionamento do equipamento (MURÇA, 2012). Segundo Vergara (2013), este plano será construído com uma base de dados sistemáticos, estudos e as orientações de fabricação. Com isso, a manutenção preventiva realizará paradas planejadas para substituição de peças que ainda apresentem a opção de utilização. Entretanto, o sentido dessa “pausa” é a tentativa de manter o ponto ótimo de operação do equipamento.

A frequência correta dessas ações de pausa e verificação é um fator relevante para o resultado, ou seja, quanto mais precisa for a periodicidade de realização da manutenção preventiva, menor será a probabilidade de ocorrer falha durante a operação (SLACK *et al.*, 2011). Esta ação de inspeção possui um roteiro que norteia o operador na identificação de pontos de atenção. O roteiro periódico de inspeção deve ocorrer antes da falha funcional. Para isso, a execução desse roteiro tem como base o tempo médio entre as falhas e também o intervalo de tempo determinado para aquele tipo de inspeção (NAYRAN, 2012).

Levando em consideração o custo agregado a cada falha e os impactos gerados a toda a cadeia de produção, meio ambiente, saúde e segurança, essa modalidade de manutenção desempenha um papel crucial, pois a manutenção preventiva sempre será direcionada antes da ocorrência da falha, possibilitando um esquema de planejamento, gerenciamento de recursos e estudo de modos e efeitos de falha do equipamento em questão (KARDEC e NASCIF, 2019).

De maneira específica, os planos de manutenção preventiva possuem muitas inspeções e boa parte será comum aos modelos de equipamentos de mesma função, independentes da organização. Geralmente são agendadas inspeções para validar a condição de operação de peças e/ou substituição de itens que normalmente se degradam com a operação, como filtros, óleos, correias e lubrificantes, por exemplo. Essa manutenção pode e deve gerar outras manutenções para a correção de anomalias encontradas ao longo da execução da preventiva. Como visto anteriormente, a corretiva planejada é uma das possíveis ações que irão derivar dessa inspeção e que será planejada para ser executada, por motivos como ausência de recursos, impossibilidade de parada do equipamento ou até mesmo a espera de um tempo adequado para a execução (GULATI, 2013).

Um dos pontos mais relevantes para a construção de um plano eficaz de manutenção preventiva são os dados de operação do equipamento, no entanto, na ausência de dados de um equipamento ou histórico de falhas, a manutenção preventiva recorre ao recurso da “vivência” com a máquina e à literatura disponível. Nesse caso, recolher todas as informações possíveis com os operadores desse equipamento a respeito de falhas, rotina de operação e tempo de uso

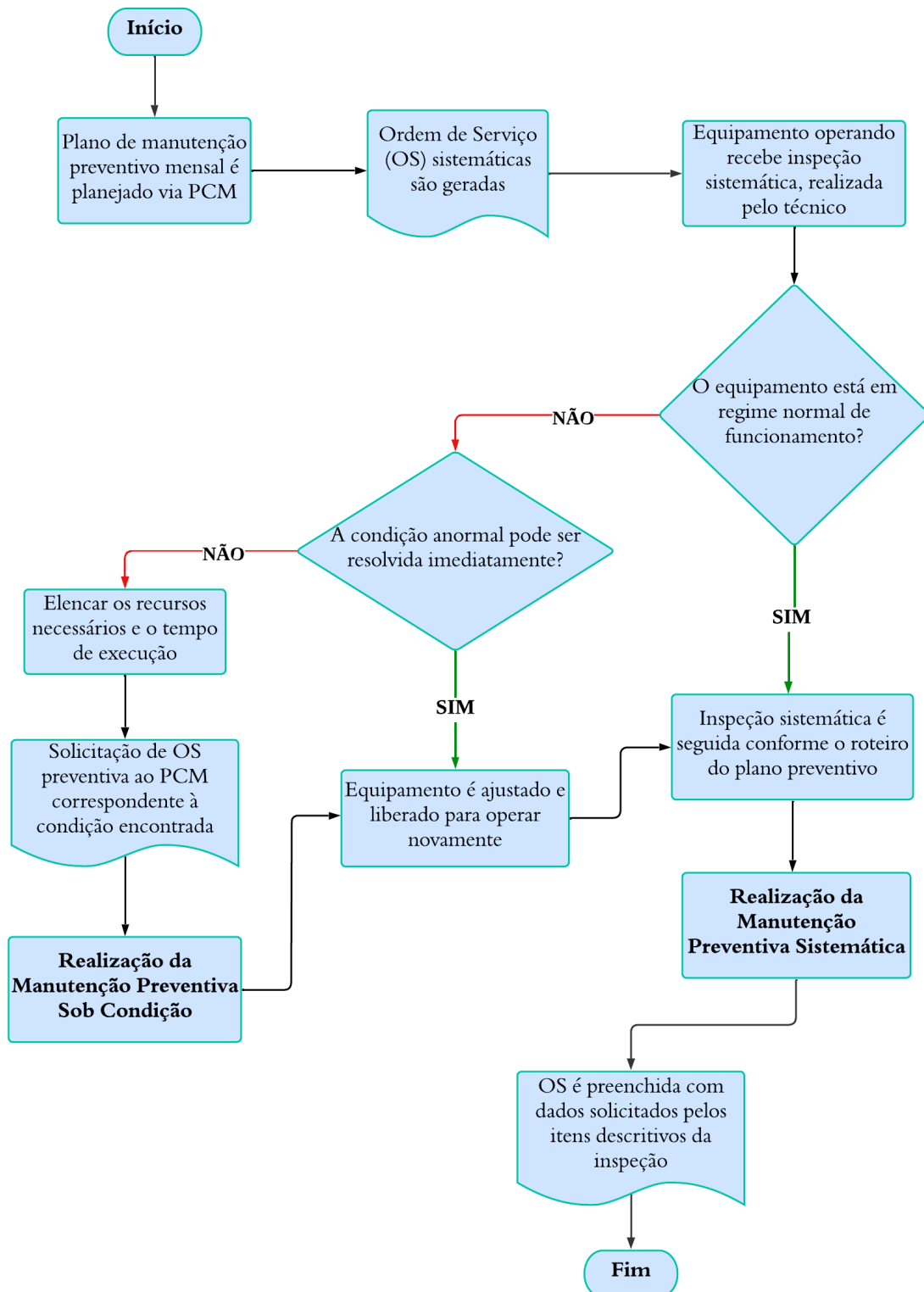
da máquina são fatores decisivos para o critério de priorização e definição de ações apropriadas (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

Dessa forma, a manutenção preventiva caracteriza-se como sistemática, quando se baseia em um plano periódico ou sob condição, quando derivada de uma necessidade identificada por inspeção (VIANA, 2020).

É importante ressaltar que quando se compara a manutenção corretiva com a preventiva sob condição, se deve lembrar que na corretiva a principal característica é o fato de esta ser realizada para corrigir problemas e defeitos que já aconteceram. Ou seja, trata-se de um tipo de ação diferente da manutenção preventiva. A preventiva sob condição por sua vez, tem o objetivo de identificar os problemas e defeitos antes de eles causarem algum prejuízo por meio de “sintomas” que o equipamento apresenta antes de falhar e que podem ser tratados. Portanto, a manutenção corretiva pode ser evitada com a manutenção preventiva, que consegue antever problemas antes de eles começarem a causar prejuízos (TOTVS, 2023).

Nesse sentido, é ilustrado no fluxograma a seguir da Figura 4, o processo de classificação da manutenção preventiva, com base em uma inspeção e os seus possíveis cenários.

Figura 4: Fluxograma de classificação da manutenção preventiva



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.3 Manutenção preditiva

Em conformidade com a NBR 5462, “A manutenção preditiva é 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” (ABNT, 1994).

O que diferencia a manutenção preditiva das outras observadas é a aplicação de probabilidade para predição de comportamentos. Este modelo de manutenção vai utilizar conceitos de controle de processo estatístico, análise de tendências e limiares pré-selecionados, para definir prazos de manutenções e quais as ações ideais a serem realizadas. Dessa forma, ela consegue realizar previsões de tendências de falha e seus respectivos impactos, garantindo uma antecipação maior que a manutenção preventiva (GULATI, 2013).

Assim, objetiva-se em calcular o ponto exato da necessidade de intervenção mantenedora, conseguindo, dessa forma, evitar a parada da máquina para desmonte ou intervenções complexas, até o limite de vida útil dos componentes. As atribuições da manutenção preditiva compreendem o monitoramento de uma máquina ou peça, por meio de medições e modulações estatísticas para predizer o quanto próximo está de ocorrer uma avaria ao objeto de estudo (ROLIM, 2015).

Segundo Nepumoceno (2014), essa manutenção traz a proposta de definir, em uma instalação fabril, quais os critérios e parâmetros serão selecionados em cada conjunto de operação que passa por manutenção e, então, iniciar um processo de análise e teste que proponham ações preditivas para evitar situações de falha que comprometam a capacidade produtiva ou até mesmo a perda dos equipamentos por rotinas de uso inadequadas. Vale ressaltar que as manutenções preditivas geram economias significativas pelos riscos iminentes corrigidos. Para tais entregas, a inspeção por meio de técnicas preditivas envolve a realização de tarefas que têm como objetivo monitorar a máquina ou suas peças por meio de medições, utilizando ensaios não destrutivos, o que torna possível um melhor aproveitamento de todas as peças e insumos de substituição periódica, estes, em algumas ocasiões, são substituídos com sua funcionalidade em bom estado (VIANA, 2020).

Outro ponto de vista, observado por Gulati (2012), é que dentro da manutenção preditiva está a Manutenção Baseada na Condição (*Condition-Based Maintenance - CBM*), que busca avaliar a condição de um equipamento através de monitoramento periódico ou contínuo

com o objetivo de realizar a manutenção em um ponto programado no tempo, quando a atividade de manutenção é mais rentável, mas antes de ocorrer uma falha do equipamento em serviço.

Note que a manutenção sob condição aparece em ambos os aspectos: preventivo e preditivo. O que vai distinguir as ações tomadas são justamente os critérios analisados e a classificação em que eles se enquadram, conforme embasamento nos conceitos pré-estabelecidos pela engenharia de manutenção e os planos de controle de manutenção que estão em vigor para aquele equipamento que está em análise. No sentido de tomada de decisão, Teles (2019) define os principais objetivos da Manutenção Preditiva nas indústrias:

- a. Determinar antecipadamente a necessidade de serviços de manutenção em uma peça ou componente específico de uma máquina ou equipamento;
- b. Eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção;
- c. Aumentar o tempo de disponibilidade das máquinas e equipamentos;
- d. Reduzir as intervenções de corretiva;
- e. Impedir o aumento dos danos;
- f. Aproveitar a vida útil total dos componentes e de um equipamento;
- g. Aumentar o grau de confiabilidade das máquinas e equipamentos.

Estes objetivos gerais norteiam e definem as principais técnicas de manutenção preditiva a serem adotadas em acordo com o parque fabril, planta e equipamentos críticos. Existem diversas técnicas preditivas, algumas amplamente utilizadas nas indústrias, por sua facilidade e custo-benefício de implantação.

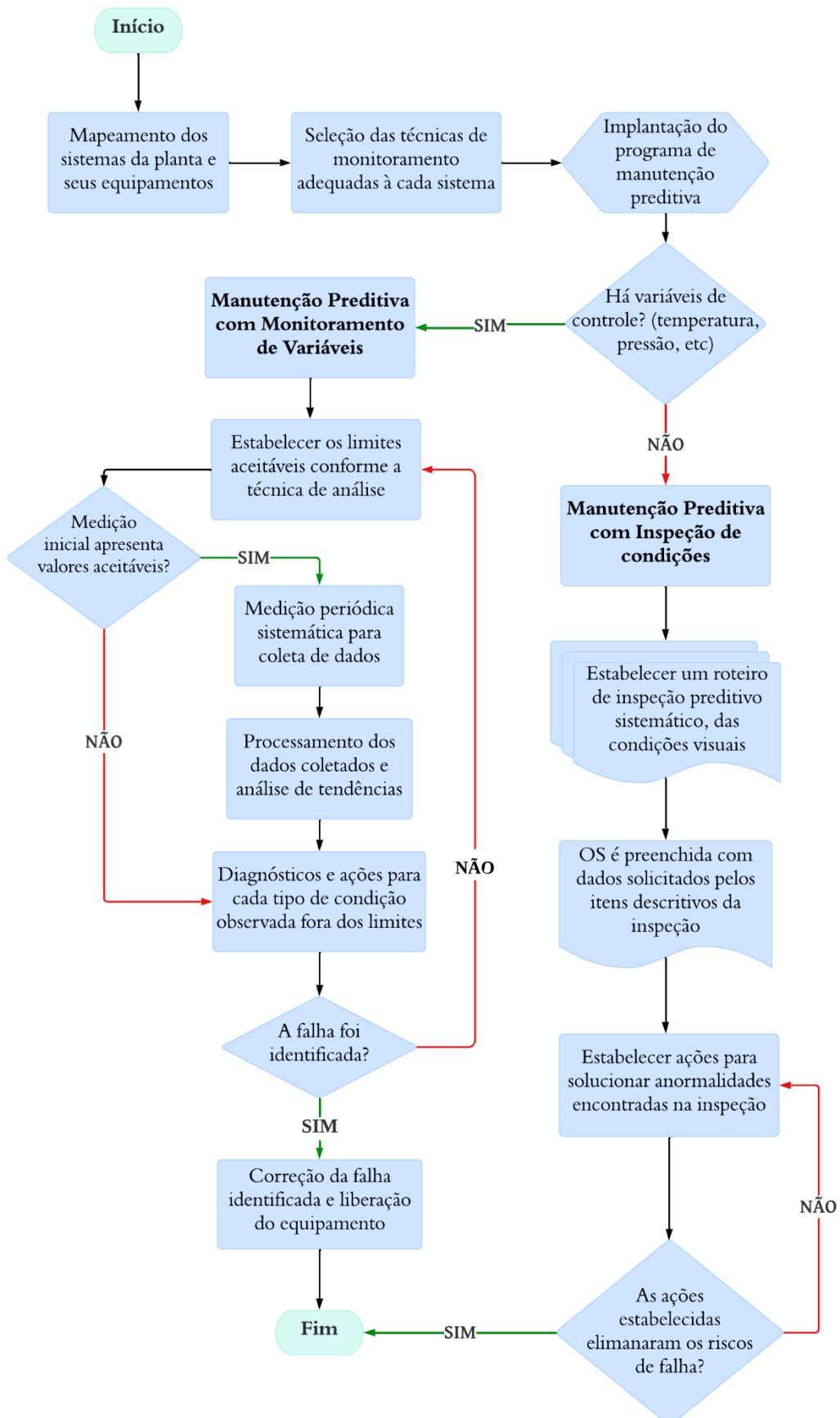
- **Ensaio por ultrassom:** A técnica se dá com o uso de um detector de emissões acústicas ultrassônicas que capta ondas sonoras acima do alcance da audição humana. Podem ser identificados deterioração de revestimentos; vazamentos de ar comprimido, gás e vácuo; defeitos em soldas, entre outros.
- **Análise de Vibrações Mecânicas:** É um processo capaz de identificar potenciais falhas nos componentes rotativos de um equipamento. Seus dados podem evitar que um equipamento tenha uma parada por quebra de um eixo ou rolamento, por exemplo. Visto que todo equipamento possui uma frequência de vibração quando está funcionando, a análise de vibração capta esta frequência por meio de acelerômetros ligados a sensores

instalados em pontos estratégicos. Por meio de conversão de energia mecânica de vibração em energia elétrica, os sinais são avaliados para detectar anormalidades.

- **Análise de Óleos Lubrificantes:** Essa técnica coleta uma amostra do óleo do equipamento para análise das propriedades dos fluidos, contaminação e tamanhos de partículas. Esta é uma das técnicas não destrutivas e não invasivas usadas na manutenção preditiva. A análise da contaminação permite saber quais são os tipos e de onde vêm os contaminantes do óleo, se existem outros tipos de lubrificantes misturados e se há algum sinal de vazamento interno, com isso conseguem, em alguns casos, identificar degradação de peças internas por meio da identificação de partículas.
- **Termografia:** Esta técnica utiliza uma câmera termográfica, que cria uma imagem com as diferentes temperaturas em um corpo. Assim, mostra defeitos que seriam invisíveis a olho nu. Por tratar de variações elevadas de temperatura, a termografia é bastante utilizada na manutenção de equipamentos de sistemas de troca de calor, arrefecimento, aquecimento e climatização de ambientes.
- **Endoscopia ou Buroscopia Industrial:** É uma técnica de inspeção visual que possibilita acessar locais internos que não podem ser vistos por uma inspeção simples, ou seja, diretamente pelo técnico de manutenção. Permite inspecionar esses locais sem desmontar o equipamento, reduzindo principalmente o tempo de manutenção.
- **Análise de Circuitos de Motores:** Através dessa técnica, são realizados testes focados na avaliação da condição da tensão e da corrente que alimentam o circuito do motor com objetivo de identificar se existe baixa qualidade na alimentação, o que pode afetar muito negativamente o desempenho do motor.
- **Análise de Resistência de Isolamento:** Este método pode ser utilizado em diversos equipamentos elétricos, como geradores, transformadores e motores, bem como alimentadores. Se baseia em um ensaio de funcionamento da máquina para monitorar as condições do isolamento dos enrolamentos ou cabos, onde com base nos valores medidos é possível identificar curto-circuito, umidade ou partículas em excesso e prever possíveis falhas, tendo em vista que o isolamento avariado é a principal causa desse problema.

Assim, é ilustrado no fluxograma a seguir da Figura 5, um resumo dos passos que fazem parte do processo de implantação de ações preditivas em uma planta industrial e os passos após a realização destas ações.

Figura 5: Fluxograma de classificação da manutenção preditiva



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 Abordagens contemporâneas da gestão da manutenção

Para analisar o formato de atuação da manutenção nas organizações, se faz necessário entender como ela foi implantada e sua setorização, pois estes fatores são determinísticos para os resultados de uma estratégia de gestão. Para a perspectiva da manutenção, há pontos cruciais em uma organização que determinam o sucesso e a adequação dos métodos de manutenção escolhidos. A centralização ou descentralização, manutenção interna ou terceirização são aspectos que devem ser definidos de acordo com a estrutura que a organização possui para a qualidade de execução, ou seja, a capacidade de manutenção. Estas atribuições devem estar pautadas em uma divisão clara e objetiva de responsabilidade, facilidade de supervisão através de relatórios com *insights* efetivos, minimização dos custos de manutenção e uma gestão de cadeia eficaz (HAROUN e DUFFUAA, 2009).

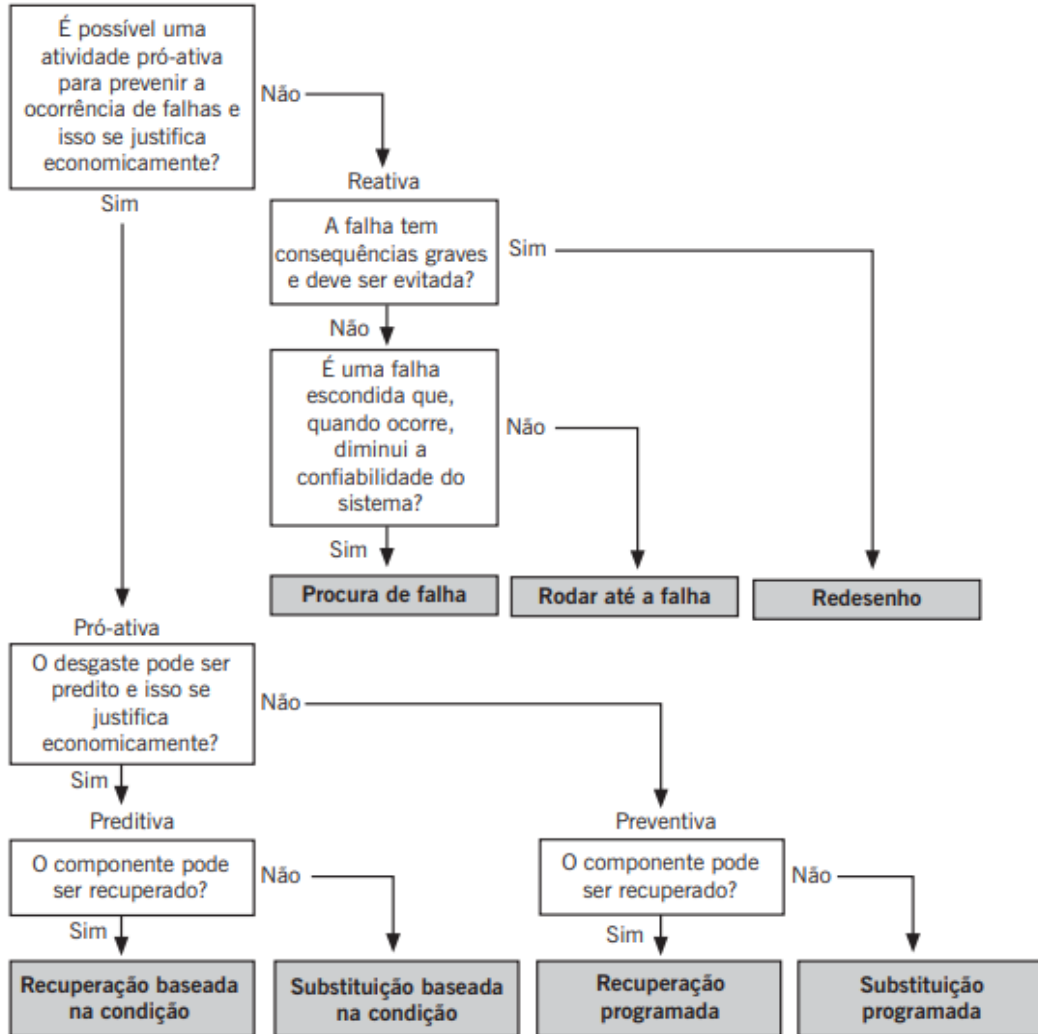
Os autores Fogliato e Ribeiro (2009), apresentam em sua obra “Confiabilidade e Manutenção Industrial” uma estratégia para implementação de um modelo de gestão voltado a minimizar riscos e aumentar os resultados por meio de planos de manutenção eficazes. Boa parte das organizações que desempenham um plano estratégico de manutenção seguem uma estratégia semelhante, que pode ter etapas mais enxutas ou com maior nível de detalhamento a depender do seguimento e interesses do negócio.

De maneira resumida, a princípio são definidos os conceitos que norteiam o modelo de gestão e a equipe é capacitada, após isso o plano geral é definido e dentro do plano podem ser abordadas diversos métodos de previsão como técnicas estatísticas e de gestão de risco. Para controle do plano, são criados indicadores de desempenho e setores de acompanhamento e execução das ações de manutenção. Além disso, a identidade da manutenção dentre outros setores é estabelecida com base nas ações que são estruturadas diante de cenários do processo que exigem resposta eficazes e de menor impacto. Dentre as etapas dessa estratégia, os autores apresentam um diagrama de tomada de decisão para auxiliar na definição das atividades de manutenção frente a situações de impacto no contexto industrial, conforme diagrama mostrado na Figura 6.

O esquema da Figura 6 sugere uma ação adequada para cada circunstância de falha, com o objetivo de verificar a possibilidade de preveni-las e, em caso positivo, direcionar para as próximas ações: preditivas ou preventivas. Contudo, nos casos em que a predição não pode ser feita, devido a quaisquer motivos, a recomendação é o uso de manutenção preventiva,

cenário em que o reparo ou a substituição são feitos a intervalos predefinidos (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

Figura 6: Diagrama de decisão referente ao tipo de atividade de manutenção recomendada



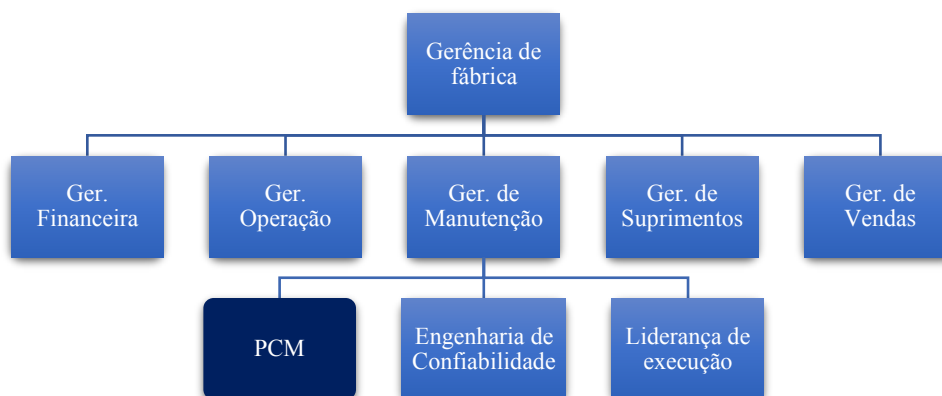
Fonte: (FOGLIATO e RIBEIRO, 2019).

Este modelo de gestão lucrativa abrange conceitos da Manutenção Centrada em Confiabilidade – MCC, Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance – TPM*) e Manutenção Baseada em Condições (COETZEE, 1999). Vale ressaltar que esse modelo de gestão é um processo iterativo e altamente dinâmico, portanto as estratégias devem ser adequadas a essas mudanças. (ISHIZAKA e NEMERY, 2014).

Assim, diante da necessidade de planejamento, controle, acompanhamento das ações da manutenção e definição das melhores práticas, surgiram, em muitas industriais, os

setores de PCM - Planejamento e Controle de Manutenção e Engenharia de Confiabilidade, correlacionados conforme exposto na Figura 7 (ROLIM, 2015).

Figura 7: Organograma de uma organização com PCM e Engenharia de Confiabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor (VIANA, 2013 com adaptações)

2.3.1 Planejamento e controle da manutenção

O PCM entende-se por um conjunto de ações em série que almejam garantir os interesses econômicos e produtivos de uma organização através de um sistema elaborado de análises e planos de manutenção (FILHO, 2008). Conforme Souza (2013), o PCM trata-se de várias ações para preparar, programar, controlar e checar se as atividades de manutenção estão sendo cumpridas de acordo com o que estipulado, e, sempre que necessário, adotando ações corretivas para mitigar desvios operacionais que impeçam a plena operação da produção.

O planejamento de ações de manutenção e controle dos dados produzidos por inspeções ou manutenções ativas são de grande impacto para a correção efetiva de erros. Além disso, permitem a melhoria contínua de processos e operações de equipamento com planos elaborados com base nesses dados. Essa gestão promove maior controle dos sistemas internos e suas eventuais mudanças (OLIVEIRA, 2014).

Este setor tem como missão colocar em harmonia todos os processos iterativos com as ações de manutenção, para identificar datas de manutenções, recursos necessários, tempo previsto de trabalho, ferramentas e materiais, profissionais capacitados ao tipo de serviço, dentre outros aspectos relevantes encontrados no cenário de produção (SILVA, 2018). Assim, consegue garantir o crescimento de confiabilidade e disponibilidade dos ativos de maneira a otimizar os recursos e mão de obra da área de manutenção. Fisicamente, representa um núcleo

com estrutura de supervisão, engenheiro de confiabilidade, inspetores, planejadores e programadores para analisar, planejar, programar e controlar os serviços (XAVIER, 2013). Segundo Viana (2013), o PCM é um órgão *staff*, ou seja, de suporte à manutenção, sendo ligado diretamente à gerência de departamento.

A gestão partida de um setor de manutenção com um PCM efetivo será mais técnica e levará em consideração a estratégia de negócio. Ramos e Schrattnner (2020) descrevem o método de estruturação das ações, destacando que para a realização do planejamento é necessária uma análise dos ativos da empresa, manuais de fabricantes e documentações. De modo a relacionar todas essas informações com a realidade do setor de manutenção e da empresa, para traçar a melhor estratégia de execução de manutenções, com a definição de manutenções preventivas, preditivas e inspeções periódicas dos ativos. Possibilitando a garantia de eficiência dos equipamentos, cumprimento de prazos e atendimento às demandas de produção, através de uma gestão eficaz capaz de estruturar um plano de contingência para conter anormalidades e um sistema de diagnóstico geral, como sugere Oliveira (2012).

Portanto, o PCM consegue assessorar a gerência e conseqüentemente a direção por todas as atividades que consegue gerir e controlar: negociações entre a produção e manutenção, planos e treinamentos, controle de atividades programadas e entregas de projetos, detalhar responsabilidades, além de promover avaliações sobre os pontos de perda de produtividade e dentro dessa realidade produzir sugestões, dentre outras atividades de gestão de rotina (BRANCO FILHO, 2007).

2.3.2 Manutenção centrada em confiabilidade

Para entendimento dos princípios que envolvem a Manutenção Centrada em Confiabilidade, os conceitos de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade precisam ser definidos para melhor entendimento da metodologia.

A NBR 5462:1994 – Confiabilidade e Manutenibilidade, define Confiabilidade como: “A capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”. E esclarece que o termo confiabilidade é usado como uma medida de desempenho de confiabilidade (ABNT, 1994).

Define também Disponibilidade como: “A capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade,

mantenabilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados”, onde Manutenibilidade é entendida como “A capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos” (ABNT, 1994).

A MCC, também conhecida como RCM (*Reliability Centered Maintenance*), é uma metodologia que visa identificar e prevenir falhas para minimizar perdas decorrentes da quebra de equipamentos. Desenvolvida nos Estados Unidos, essa metodologia surgiu na mesma época em que imergia o conceito de Manutenção Baseada em Condições. O conceito de confiabilidade surgiu nos estudos de análises de falhas em equipamentos eletrônicos para uso militar durante a década de 50. Após o término da Segunda Guerra Mundial, devido à falha nos protótipos dos mísseis que estavam sendo desenvolvidos na Alemanha, foi contratado o matemático Robert Lussier para analisar o sistema operacional (VIANA, 2020).

Após o surgimento desse conceito, foi criada em 1960 uma célula de pesquisa e desenvolvimento nas disciplinas de engenharia, para estruturar um programa de confiabilidade para os equipamentos da indústria aeronáutica, na *Federal Aviation Administration* (KARDEC e NASCIF, 2019). Em meados de 1978, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos recebia um relatório estruturado sobre a temática de confiabilidade, de autoria dos pesquisadores Nowlan e Heap: “As ferramentas analíticas fundamentais foram criadas para estimar a confiabilidade de componentes, sistemas mecânicos e, principalmente, elétricos” (SAE, 2002).

Com os estudos desenvolvidos e análise do sistema, foi proposta a lei da probabilidade de um produto com componentes em série. A função estabelece que a confiabilidade de um sistema em série é igual ao produto das confiabilidades de seus componentes (VIANA, 2020). Os conceitos foram aplicados inicialmente nas esferas de manutenção do governo e seus resultados geraram interesses externos. Assim, os princípios da MCC começaram a ser utilizados em diversas indústrias.

No contexto industrial, o método vai selecionar as ações de manutenção adequadas a cada caso para manter a disponibilidade e confiabilidade de qualquer processo produtivo, de maneira que o Custo do Ciclo de Vida do Ativo – CCV seja reduzido ao máximo viável. Sabendo que o CCV é a somatória de todos os investimentos no sistema ou equipamento, desde o processo de especificação, desenho de projeto, fabricação, operação, manutenção e, por fim, a depreciação.

A implantação da MCC inicia com a seleção de um sistema para estudo, onde, geralmente, a delimitação desse sistema aponta para altos índices de perdas produtivas, taxa de

falhas elevadas e recorrentes, e/ou custos elevados com manutenção, sabendo que os custos sempre serão impactados por falhas. Esse sistema em análise deve ser descrito ao nível de detalhamento que possibilite determinar claramente a importância e função de cada equipamento do processo, levando em consideração sua posição na cadeia de produto (AZEREDO, 2023).

Após o detalhamento, é realizado um estudo para mapear as falhas e construída a Árvore de Análise de Falhas, do inglês *Failure Tree Analysis - FTA*, onde é possível visualizar como estas se relacionam, sendo a parte primária da metodologia de análise de falhas funcionais (IBM, 2024).

Adicionalmente, a Análise de Modos e Efeitos de Falhas, conhecida popularmente como FMEA (do inglês *Failure Mode and Effects Analysis*), tem por objetivo definir e analisar os potenciais efeitos e modos de falha de cada equipamento do sistema. Essa ferramenta produz um relatório macro, onde são evidenciados aspectos como severidade das falhas, previsibilidade e probabilidade de ocorrência. Assim, é possível definir estratégias adequadas a cada componente do sistema, para mitigar as causas e minimizar os efeitos adversos, aumentando consequentemente, a confiabilidade do equipamento. O resultado dessa análise determina a estratégia de manutenção que irá prevenir a falha, se serão adotadas técnicas de ensaios/inspeções preditivas, se a manutenção preventiva consegue entregar o esperado com um menor custo, ou se, estrategicamente, a melhor abordagem para o negócio e sistema é a manutenção corretiva, realizando o reparo após a falha ou substituindo o equipamento por um modelo de melhor performance (ABRAMAN, 2023).

Dessa forma, é por ter como objetivo a confiabilidade do sistema com base no estudo da estratégia mais adequada ao que o equipamento necessita dentro do contexto operacional e o plano do negócio, que a Manutenção Centrada em Confiabilidade foi escolhida para estudo de caso nesse trabalho. Os conceitos e estratégias aplicados para esse estudo de caso são explanados nos capítulos seguintes, onde são detalhadas as melhores práticas dos vários conceitos apresentados.

3 CONTEXTO INDUSTRIAL

A busca por melhores e mais rápidas formas de produzir trouxe ao mundo diversas inovações na comunicação, nos transportes, no seguimento bélico, entre outros. Este ritmo se tornou ainda mais frenético com a descoberta da eletricidade. A energia elétrica aplicada aos motores, com o estudo desenvolvido do dínamo, deu à indústria uma das maiores e mais importantes contribuições dessas revoluções, o motor elétrico. A máquina elétrica passou por diversos aprimoramentos realizados ao longo do tempo e todos os estudos desenvolvidos para otimização dos motores devem-se à importância dessas máquinas para o mercado industrial em geral. Isto é, os motores elétricos desempenham um papel insubstituível nos processos industriais, sendo componentes de alta criticidade, por estarem interligados ou integrados a máquinas que compõem a dinâmica das etapas de produção. Desta forma, este é um recurso essencial para a produção em seus mais variados segmentos (BENBOUZID, 2000).

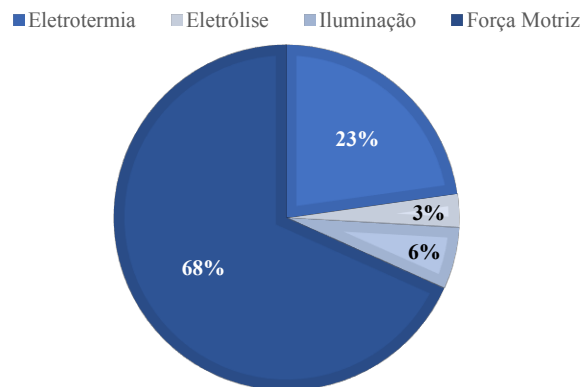
O nível de importância dos motores elétricos na indústria fica evidente quando se verifica o impacto que esse tipo de equipamento gera no consumo de energia elétrica, refletindo a significativa parcela desses equipamentos dentro da indústria. Uma visão do consumo de energia elétrica pelo setor industrial, divulgada em um estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), demonstra que as indústrias brasileiras respondem por quase 40% da eletricidade consumida no Brasil.

Ademais, destaca-se que os principais impactos desse resultado de consumo nas indústrias foram observados em um estudo complementar do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL, apresentando a distribuição do consumo industrial por uso final, conforme ilustrado no Gráfico 4, destacando a geração de força motriz como a principal fonte de consumo dentro do ambiente industrial, com 68% do consumo total. Adicionalmente, em uma perspectiva global, segundo Bonanomi (2016), os motores elétricos nas indústrias consomem cerca de 40% de toda a energia elétrica gerada no mundo.

Ainda segundo o estudo do PROCEL, no mapeamento das finalidades de utilização dos motores elétricos de acordo com as áreas de aplicação na indústria, o consumo de energia é bem dividido entre processos produtivos e processos secundários, conforme evidenciado no Gráfico 5 a seguir.

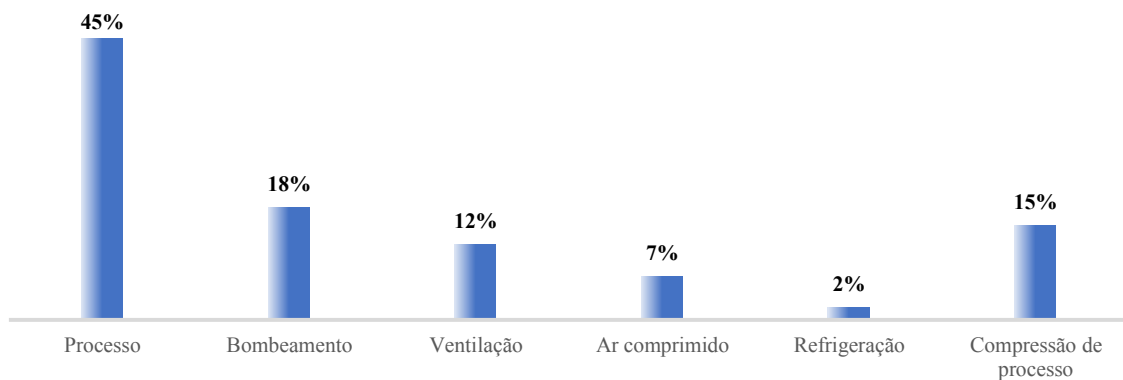
Pode-se inferir dos resultados dispostos no Gráfico 5 que, além do uso em processos fins, correspondente a 45 % do consumo, equipamentos como bombas, compressores, refrigeradores e condicionadores de ar, juntos, são responsáveis por 54% da demanda de energia e na eficiência geral do sistema elétrico das indústrias.

Gráfico 4: Distribuição de consumo energético nas indústrias



Fonte: Elaborado pelo autor (PROCEL, 2008 com adaptações)

Gráfico 5: Distribuição do consumo de energia de motores na indústria brasileira



Fonte: Elaborado pelo autor (PROCEL, 2008 com adaptações)

Os dados obtidos evidenciaram a grande relevância do ativo motor elétrico, tornando-se extremamente necessário garantir níveis de disponibilidade elevados. Logo, as falhas em motores começaram a ser estudadas de maneira detalhada pela engenharia, visto que a ausência de intervenções durante o processo de envelhecimento dos equipamentos leva a falhas funcionais e perdas no processo. Dessa forma, o mapeamento e diagnóstico de falhas se tornou uma ferramenta importante para prevenção de paradas e para apoiar na investigação de consumo (LOISELLE; XU e VOLOH, 2015). Vale ressaltar que, historicamente, os motores elétricos não foram uma das principais causas de paradas produtivas nas plantas. No entanto, com o envelhecimento dos parques fabris, houve um aumento significativo de problemas em motores, que levou à necessidade de implementação de técnicas para avaliação da saúde dos motores elétricos, possibilitando identificar principalmente a perda de eficiência dessas máquinas (TOLIYAT e KLIMAN, 2004).

3.1 Motores elétricos

O motor elétrico tornou-se uma das contribuições mais significativas do homem, em todo o desenvolvimento das inovações e suas tecnologias. Uma máquina não poluente, de baixo custo de produção, construção simples e com um impacto em áreas tão relevantes como a saúde, educação, qualidade de vida das pessoas e o mercado em geral nos seus mais diversos segmentos, gerando movimento às indústrias de todos os países (WEG, 2020).

Com distinção apenas em tamanho, recursos e materiais aplicados para a construção dos motores, o princípio de funcionamento básico dessas máquinas não sofreu alterações de formas significativas. Nota-se que os motores atuais apresentam um sistema mais robusto em termos de proteção e modelo construtivo, porém com pesos consideravelmente menores. Em 1891, um motor trifásico possuía 66kg para 1kW de potência, enquanto que em 1984, essa relação de peso/potência atinge uma entrega de 6,8kg/kW (BARROS *et al.*, 2010). Além disso, exemplos significativos dessas alterações foram os sistemas de ventilação mais eficientes, possibilitando uma melhor troca térmica e conseqüentemente melhor performance da máquina elétrica e a melhoria dos materiais utilizados para isolamento (ELETROBRÁS, 2009).

A evolução na forma construtiva dos motores também deu origem a uma vasta opção de motores existentes no mercado. De maneira resumida, existem três tipos diferentes de motores elétricos, que são: motores de corrente contínua, motores de corrente alternada e os motores universais de corrente alternada e corrente contínua. Destes, os motores de corrente contínua e de corrente alternada apresentam mais aplicações comerciais, possuindo uma maior variabilidade de modelos.

3.1.1 Tipos de motores elétricos

Os motores CC, são máquinas que além de funcionar como motores, também funcionam como geradores de energia elétrica e são alimentados por corrente contínua (MATTEDE, 2014). Na Figura 8 a seguir, estão dispostos os principais tipos de motores de encontrados no ambiente industrial.

Figura 8: Motores elétricos de corrente alternada



Fonte: Elaborado pelo autor.

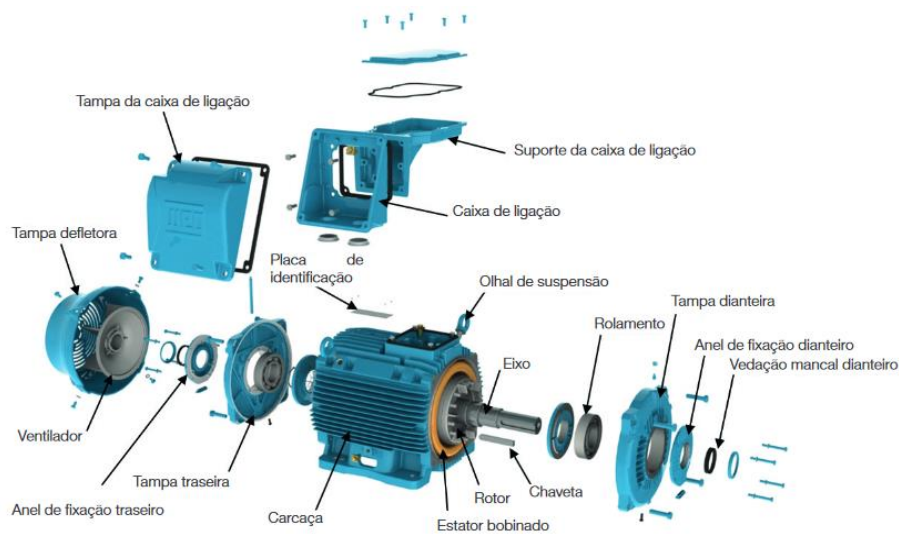
Um modelo de motor de corrente contínua tem como suas principais partes construtivas: armadura, composta por um rotor de núcleo de ferro e bobinas na sua superfície ligadas ao comutador com a conexão elétrica à fonte externa realizada pelas escovas, e estator que é composto por um material ferromagnético que pode apresentar polos salientes para alocação das bobinas de campo, ou polos lisos quando utilizados ímãs permanentes. Esse modelo de motor, apesar de apresentar vantagens com relação ao controle de velocidade, é pouco utilizado por suas desvantagens. Quando comparado com um motor de corrente alternada, possui gastos de manutenção e fabricação mais elevados, necessita de maiores cuidados na partida e o desgaste das escovas, ocasionado pelo regime de trabalho, exige uma curta periodicidade de intervenções, gerando paradas mais frequentes, o que não é viável para uma aplicação em cadeia produtiva.

Alternativamente, os motores de corrente alternada – CA, podem ser classificados pelo tipo de alimentação, monofásico ou trifásico, e pelo princípio de funcionamento, motor elétrico síncrono e assíncrono ou de indução, onde cada classe possui suas particularidades e

finalidades distintas (MATTEDE, 2014). Dentre os vários tipos de motores CA, o modelo mais utilizado nos processos industriais é o Motor de Indução Trifásico – MIT, um motor assíncrono, que possui como uma das principais características que distingue os motores de indução é sua excitação única. Apesar de tais máquinas possuírem enrolamentos de campo e armadura, ou seja, bobinas condutoras no estator e no rotor, a fonte de energia é conectada apenas ao enrolamento de campo ou enrolamentos do estator. A indução permite que as correntes circulem no enrolamento de armadura, e esse mecanismo permite a criação de uma distribuição de corrente no condutor, que vai interagir com a distribuição do campo, produzindo assim, torque líquido unidirecional (DEL TORO, 1999).

É exposto na Figura 9, os detalhes construtivos de um típico motor de indução trifásico utilizados nas indústrias. No esquema, é possível observar o rotor e o estator bobinado, conforme descrito anteriormente. Os terminais das bobinas do estator são dispostos na caixa de ligação, assim, são eletricamente conectados para induzir corrente no rotor e produzir movimento através da interação de campo, ou seja, produzir energia mecânica.

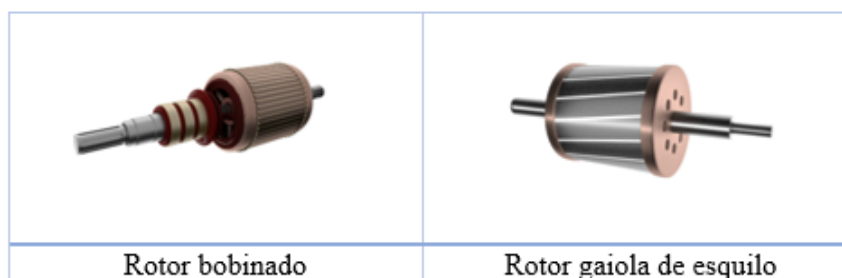
Figura 9: Vista explodida de um modelo de motor de indução



Fonte: WEG (2020).

O MIT pode apresentar dois tipos de rotores, o rotor gaiola de esquilo e o rotor bobinado, conforme comparativo exposto na Figura 10.

Figura 10: Comparativo entre tipos de rotores de motor de indução



Fonte: Elaborado pelo autor (UFRN, 2024 com adaptações).

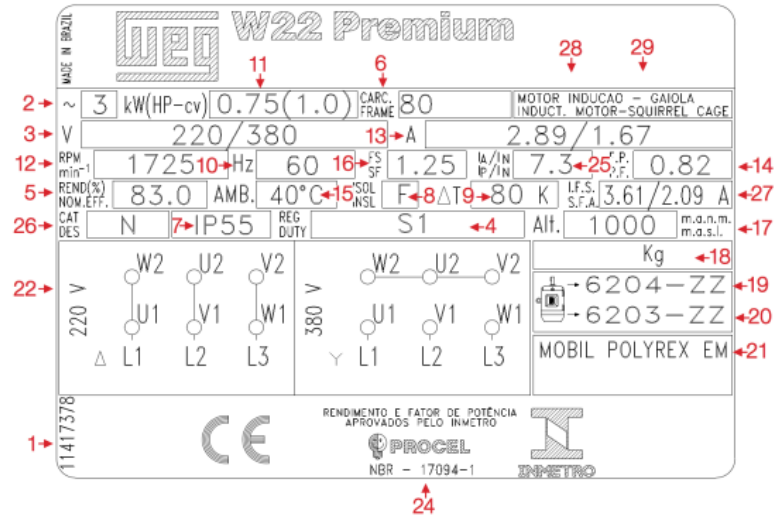
O modelo de rotor gaiola de esquilo ficou popularmente conhecido por essa denominação, pois remete às rodas em que esquilos de estimação correm. Sua estrutura é constituída por barras de material condutor e são interligadas por meio de anéis de curto-circuito. As velocidades de trabalho, geralmente, são consideradas constantes e podem apresentar diferentes valores, de acordo com o projeto que o motor está inserido, aplicação e carga atribuída ao eixo (KEEPFY, 2023). Já o modelo de motor de rotor bobinado possui enrolamentos trifásicos semelhantes aos enrolamentos do estator. Seus terminais são conectados entre si, por meio de escovas, aos anéis no eixo no rotor. Por exigirem uma manutenção mais complexa, devido ao desgaste das escovas e anéis, o custo de operação desse motor torna-se maior, quando comparado com o motor de rotor gaiola. Por esse motivo, os motores com rotor do tipo gaiola de esquilo são mais utilizados no mercado (CHAPMAN, 2013). Neste trabalho, será abordado apenas o motor de indução trifásico do tipo rotor gaiola de esquilo.

3.1.2 Especificidades de motores elétricos

Apesar de o motor elétrico ser um equipamento de funcionamento simples, existem muitos aspectos que devem ser considerados antes de definir o motor adequado para cada aplicação. Para tanto, de forma a padronizar as variáveis que devem ser consideradas nas definições dos equipamentos, existem normas que definem valores de referência para esses dados, como modo de funcionamento, tipo de carcaça, padrão de fabricação entre outros.

A norma brasileira NBR 17094 - Máquinas Elétricas Girantes - Parte 1: Motores de Indução Trifásicos, determina que todo motor deve possuir uma placa de identificação, constando todas as informações construtivas e de operação. É apresentado na Figura 11 a seguir, um modelo de placa de identificação de um motor de indução trifásico.

Figura 11: Placa de identificação de um motor WEG – W22 Premium



Fonte: WEG, 2017.

Da Figura 11 indentifica-se: número de série (1), distinção da tensão de alimentação (2), tensões nominais (3), regime de operação (4), rendimento (5), tipo de carcaça (6), nível de proteção (7), classe térmica (8), máxima diferença de temperatura entre o bobinado e o ar ambiente (9), frequência da rede elétrica (10), potência mecânica nominal (11), rotação (12), correntes elétricas (13), fator de potência (14), temperatura ambiente máxima (15), fator de serviço (16), altitude máxima (17), massa (18), rolamento do lado acoplado (19), rolamento do lado oposto ao acoplado (20), lubrificante (21), arranjos elétricos (22), norma técnica que atende (24), razão da corrente de partida com a nominal (25), categoria de torque por velocidade (26), corrente elétrica no fator de serviço (27), tipo de motor (28), tipo de rotor (29). Destes, os parâmetros que mais impactam na definição de ações de manutenção são:

- **Classes Térmicas e Sistemas de isolamento:** a classe térmica representa a temperatura máxima que o enrolamento do equipamento pode alcançar no seu ponto mais quente, ao estar operando em carga nominal, sem diminuição da vida útil do sistema de isolamento elétrica (WEG, 2023). As normas de materiais e sistemas isolantes são expostas na Tabela 1.

Tabela 1: Classes térmicas

Temperatura (°C)	Classes de temperatura	
	IEC 60085	UL 1446
90	Y (90 °C)	-
105	A (105 °C)	-
120	E (120 °C)	120 (E)
130	B (130 °C)	130 (B)
155	F (155 °C)	155 (F)
180	H (180 °C)	180 (H)
200	N (200 °C)	200 (N)
220	R (220 °C)	220 (R)
240	-	240 (S)
acima de 240°C	-	Acima de 240 (C)
250	250	

Fonte: WEG (2023).

- **Grau de proteção (7):** é denominado pelas letras IP (*Ingress Protection*) e dois dígitos numéricos, onde o primeiro representa a proteção contra contatos acidentais e entrada de sólidos e o segundo, representa o grau de proteção contra a penetração de líquidos. A ABNT NBR-IEC 60034-5 define os graus de proteção conforme as classificações na Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2: Graus de proteção contra corpos sólidos e contato acidental

1º algarismo	
Algarismo	Indicação
0	Máquina não protegida
1	Máquina protegida contra objetos sólidos maiores que 50 mm
2	Máquina protegida contra objetos sólidos maiores que 12 mm
3	Máquina protegida contra objetos sólidos maiores que 2,5 mm
4	Máquina protegida contra objetos sólidos maiores que 1 mm
5	Máquina protegida contra poeira
6	Máquina totalmente protegida contra poeira

Fonte: WEG (2023).

Tabela 3: Indica o grau de proteção contra penetração de água no interior do motor

2º algarismo	
Algarismo	Indicação
0	Máquina não protegida
1	Máquina protegida contra gotejamento vertical
2	Máquina protegida contra gotejamento de água, com inclinação de até 15°
3	Máquina protegida contra aspersão de água
4	Máquina protegida contra projeções de água
5	Máquina protegida contra jatos de água
6	Máquina protegida contra jatos potentes
7	Máquina protegida contra os efeitos da imersão temporária
8	Máquina protegida contra os efeitos da imersão contínua

Fonte: WEG (2023).

- **Tipos de Lubrificantes (21):** O tipo de graxa ou lubrificante utilizado nas partes rotativas do motor também deve ser observado, visto que determinados componentes químicos podem interferir na vida útil do motor, ocasionando corrosão, por exemplo. A graxa indicada para motores elétricos é uma graxa que possui capacidade de ser usada em condições especiais de carga e temperatura. Suas características devem suportar uma alta rotação e vibração. Além disso, por estar em contato com a parte interna do motor, é imprescindível a utilização de graxas à base de poliéster. Este material é ideal para rolamentos em motores, pois apresenta níveis elevados de proteção contra a corrosão e oxidação precoce do equipamento (LUMOBRAS, 2024).

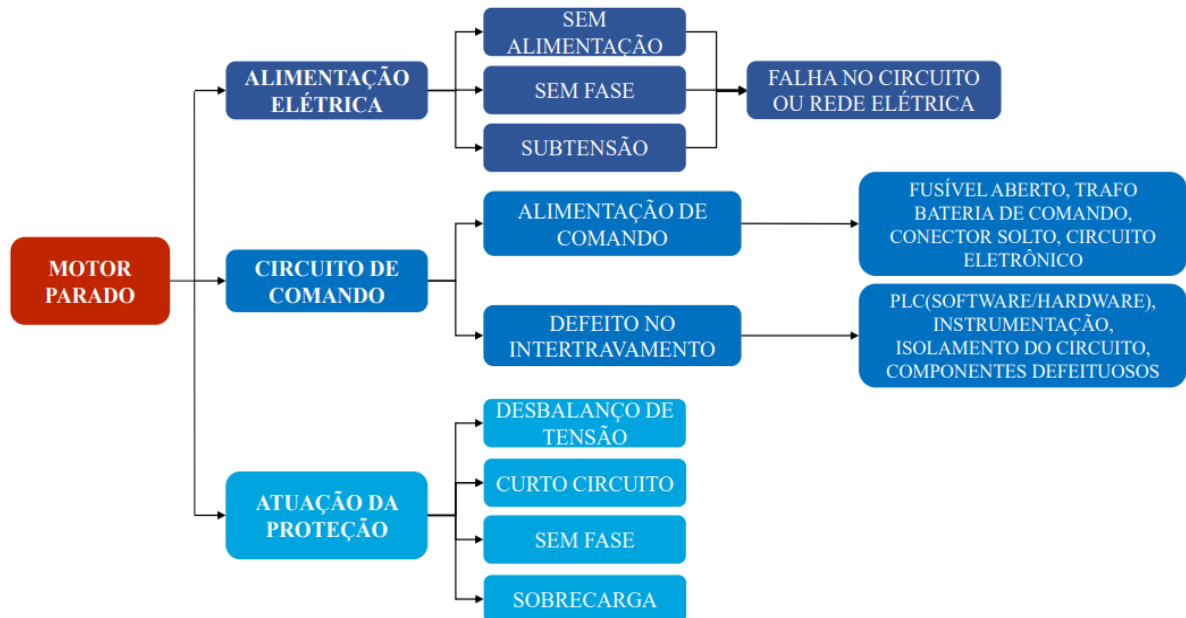
3.2 Falhas em motores elétricos

Naturalmente, ao longo do tempo, é normal ocorrer a deterioração de todo equipamento. No caso dos motores elétricos, o processo de envelhecimento pode levar anos e até décadas, no entanto, quando utilizados de forma inadequada, ou seja, além de seus limites de funcionamento, ocorrem perdas consideráveis em relação ao seu projeto de fabricação e operação, sendo observadas falhas precoces. De fato, existem diversas situações que podem levar a máquina a operar além de suas características nominais de serviço e chegar à falha. A saber, dentre as causas mais frequentes de falhas em motores elétricos, observam-se: sobrecarga, desbalanço de tensão, operação monofásica, sobre ou subtensão, ventilação deficiente, ciclos de carga muito rápidos, umidade e vibração (BULGARELLI, 2006). Deve-se destacar também que a grande maioria das falhas prematuras, seja no estator ou no rotor, parte estática e parte girante, respectivamente, são ocasionadas por uma combinação de esforços que atuam negativamente nesses componentes. Assim, os motores em regime de operação, com uma ou mais dessas falhas citadas, podem apresentar condições que tendem a reduzir a sua qualidade de funcionamento e até mesmo causar a redução da vida útil, culminando na queima prematura do motor (BONNET, 1992).

Para identificar como essas falhas são geradas, é necessário entender não somente as causas, mas o conjunto de acontecimentos que levam à ocorrência de uma falha funcional. Uma das maneiras mais práticas de fazer isso é através da aplicação da FTA, que consiste em um mapeamento hierarquizado dos possíveis eventos que podem levar um sistema ou equipamento à falha. Assim, para representar graficamente o relacionamento das falhas dos

motores, é comum empregar uma estruturação que contenha: as causas, principais contribuições e fatores ocultos principais, de forma similar ao que é exposto na Figura 12, tomando como ponto de partida o estado inicial do motor.

Figura 12: Árvore de falha – motor parado

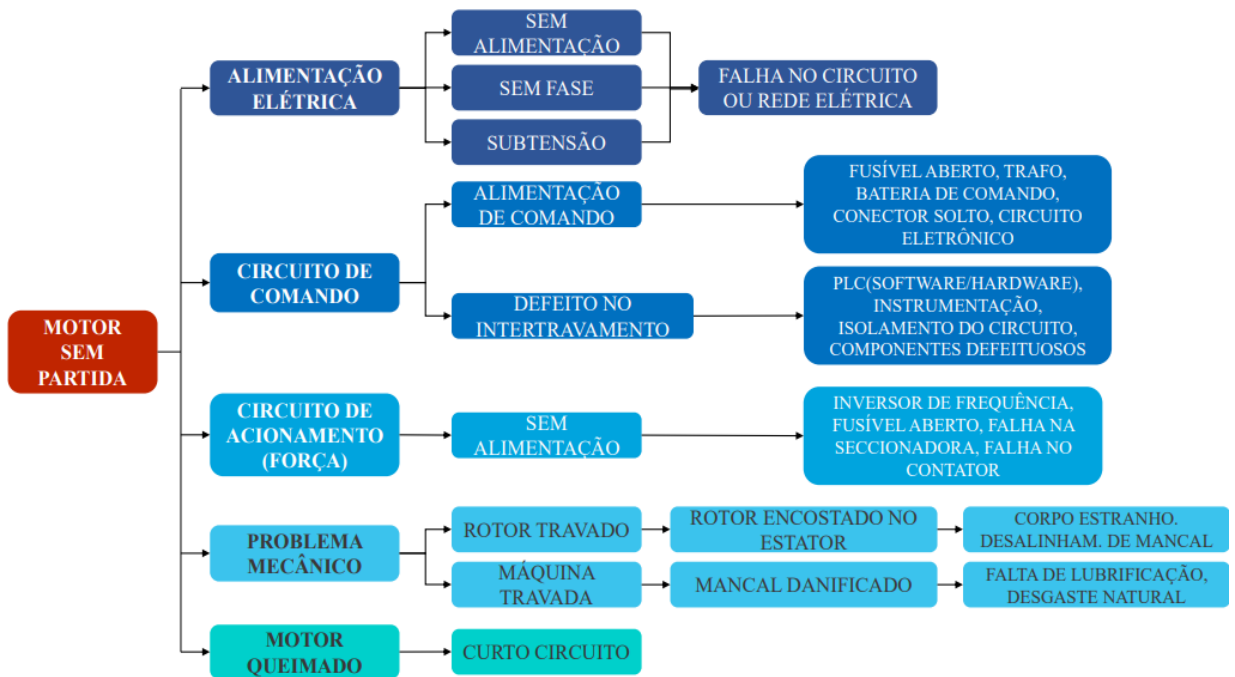


Fonte: TRACTIAN (2023, com adaptações).

Pode-se inferir da Figura 12 que existem três razões principais para o motor elétrico estar parado, cada uma dessas com suas causas e contexto, formando uma teia de possibilidades. Ao realizar a leitura do topo para baixo da FTA da Figura 12, pode-se verificar que existe a possibilidade de um fusível aberto estar interrompendo a alimentação elétrica do circuito de comando, permanecendo o motor parado.

De forma análoga, muitas outras possíveis causas podem ser mapeadas para a falha do motor elétrico, assim como ilustrado nos outros cenários expostos nas figuras Figura 13, Figura 14 e Figura 15, onde os eventos de topo são diferentes falhas do equipamento, indo da condição de indisponibilidade, à falha potencial e à falha funcional, respectivamente.

Figura 13: Árvore de falha – Motor sem partida



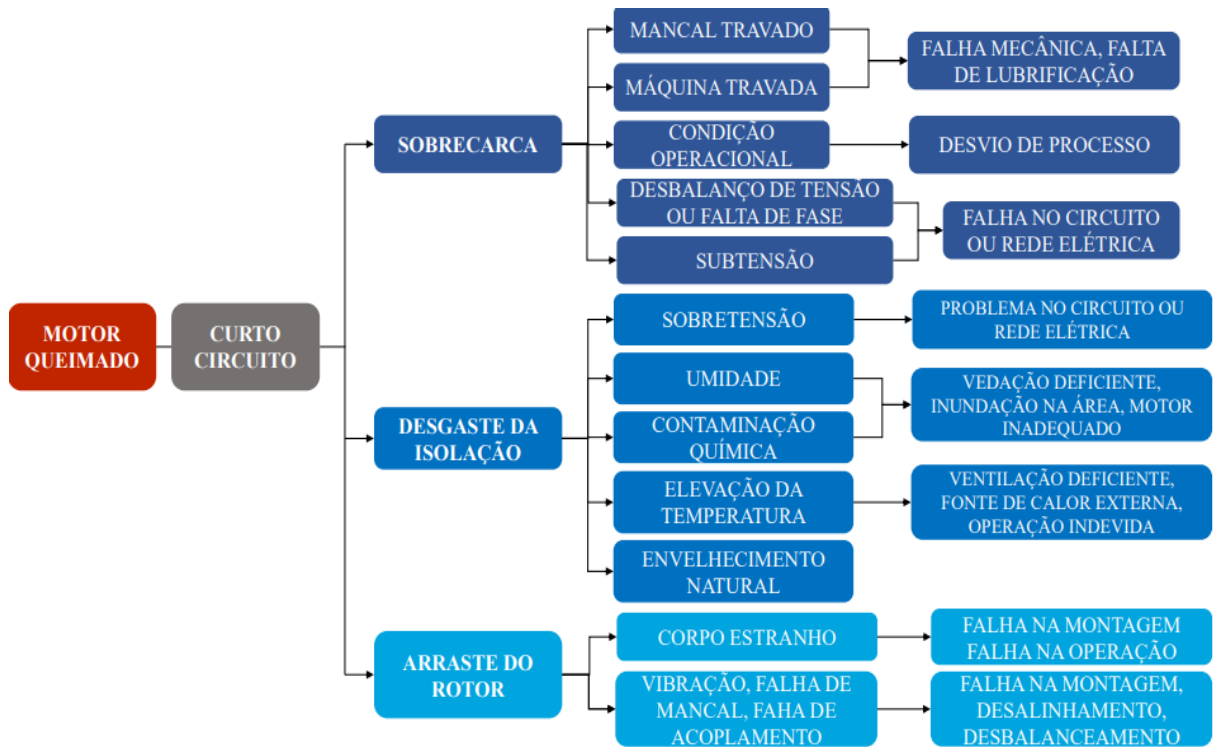
Fonte: TRACTIAN (2023, com adaptações).

Figura 14: Árvore de falha – Motor sobreaquecido



Fonte: TRACTIAN (2023, com adaptações).

Figura 15: Árvore de falha – Motor em curto circuito



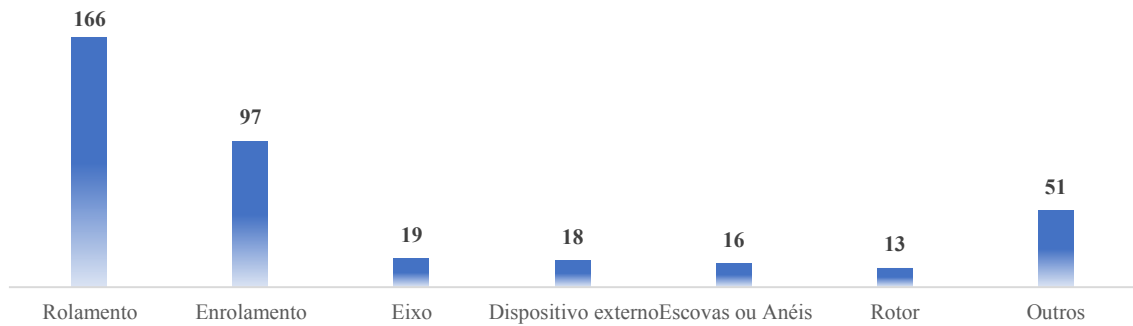
Fonte: TRACTIAN (2023, com adaptações).

Logo, infere-se que o cenário de operação do motor é fator determinante para a tendência de falhas, e muitos estudos buscam mapear as características que ocasionam cada tipo de falha, com o objetivo de diagnosticá-las e conhecer a fonte desses distúrbios, para mitigá-los. Isso fica evidente ao tomar como referência um estudo de destaque, realizado pelo *Motor Reliability Working Group*, o Subcomitê de Confiabilidade de Sistemas de Energia da Sociedade de Aplicações da Indústria do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos - IEEE.

O estudo realizado em um conjunto de 1141 motores mapeou os componentes, causas, contribuições e fatores ocultos que ocasionam falhas em motores elétricos. A pesquisa aborda, inicialmente, os componentes que apresentam falhas em motores e a tendência de ocorrência dessas falhas, conforme evidenciado pelos dados que são expostos no Gráfico 6.

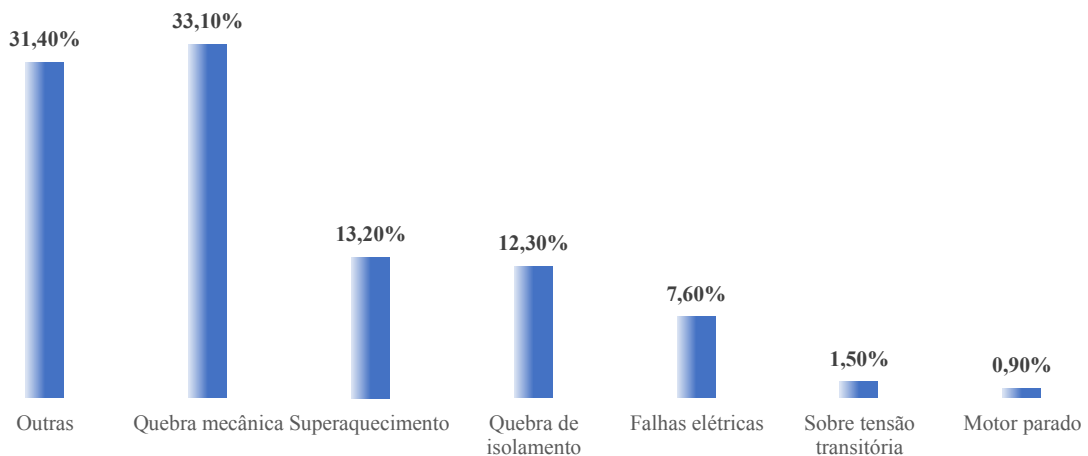
Conforme os dados obtidos, verifica-se que rolamentos e enrolamentos representam aproximadamente 70% das ocorrências de falhas em componentes de motores. Em seguida, com base nos componentes que apresentam falhas e sua função, a pesquisa apresenta os principais modos das falhas ocorridas em motores elétricos. Os resultados obtidos para estes indicadores estão dispostos no Gráfico 7.

Gráfico 6: Componentes que apresentam falhas em motores



Fonte: BELL *et al.* (1985, com adaptações).

Gráfico 7: Principais modos de falhas em motores elétricos

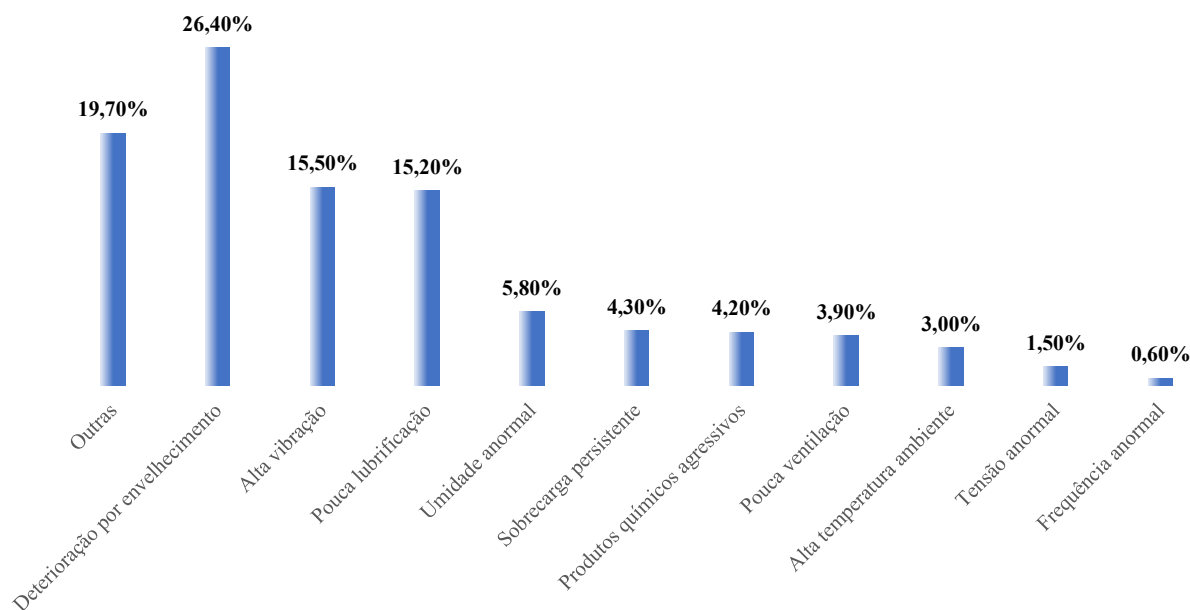


Fonte: BELL *et al.* (1985, com adaptações).

Assim, pode-se constatar que quebra mecânica, superaquecimento e quebra de isolamento são as principais causas iniciais de uma falha. Além disso, o estudo enfatiza a semelhança dos dados obtidos para causas iniciais com um outro estudo realizado pouco mais de 20 anos antes, em 1973, quando as três principais causas foram as mesmas ou mais de uma dessas combinadas, associadas à deterioração normal pelo tempo de operação dos motores. Vale ressaltar que a pesquisa de 1985 foi realizada de forma mais abrangente e detalhada (IEEE, 1985). Nesse sentido, nota-se que, apesar dos avanços tecnológicos ocorridos de uma pesquisa para a outra, as situações que colocam motores em um regime de operação forçado são praticamente as mesmas e que esses indícios podem ser inspecionados, antes que os danos ocasionados ao componente evoluam até a falha funcional.

Então, para mapear as origens dos modos de falhas listados no Gráfico 7, são apresentadas no Gráfico 8 as principais causas para as falhas nos motores elétricos avaliados, sendo estes os pontos de partida para os modos de falhas, identificadas no Gráfico 7.

Gráfico 8: Causas de falhas em motores elétricos



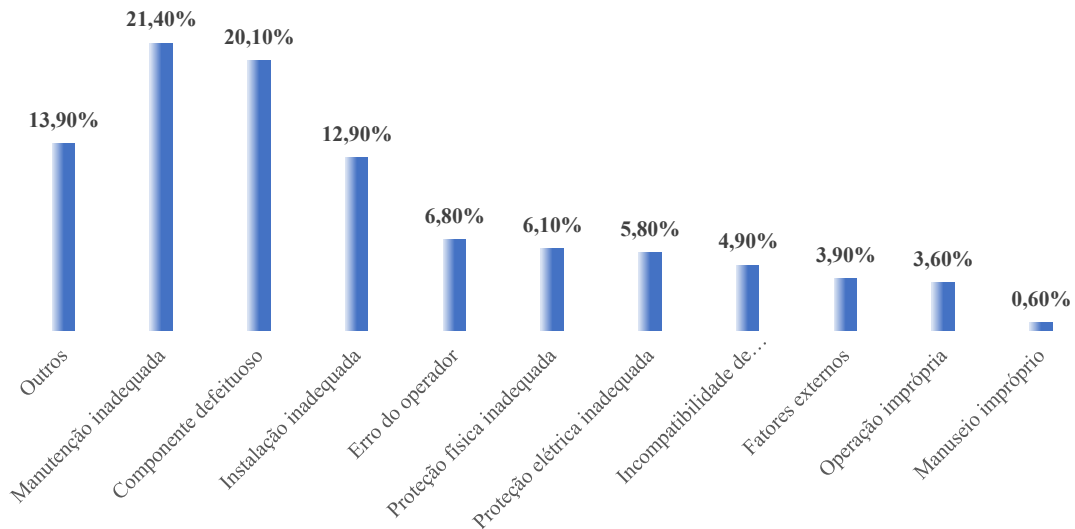
Fonte: BELL *et al.* (1985, com adaptações).

Nota-se então que deterioração por envelhecimento, alta vibração e pouca lubrificação foram as principais causas diagnosticadas. Por outro lado, existem causas ocultas, que apresentam impacto significativo nas falhas em motores e devem ser mapeadas em qualquer estruturação de uma árvore de falhas. A pesquisa elencou pelo menos 10 fatores ocultos, que podem ser comuns em qualquer ambiente industrial e que são geradores ou agravantes de falhas e são dispostos no Gráfico 9.

Assim, é possível observar que mais da metade dos fatores ocultos que podem gerar uma falha podem ser tratados com a revisão ou criação de um plano de manutenção adequado ao equipamento, sua rotina de operação e ao cenário físico em que está inserido.

Deste modo, é válido afirmar que a grande maioria dos indicadores investigados converge para dois tipos de falhas em motores elétricos, as falhas mecânicas, tendo como principais ofensores os rolamentos, e as falhas elétricas, tendo o enrolamento como o ponto mais sensível, sendo que tanto as falhas mecânicas como as falhas elétricas podem ser geradas ou aceleradas pela condição de operação dos ativos.

Gráfico 9: Causas ocultas de falhas em motores elétricos

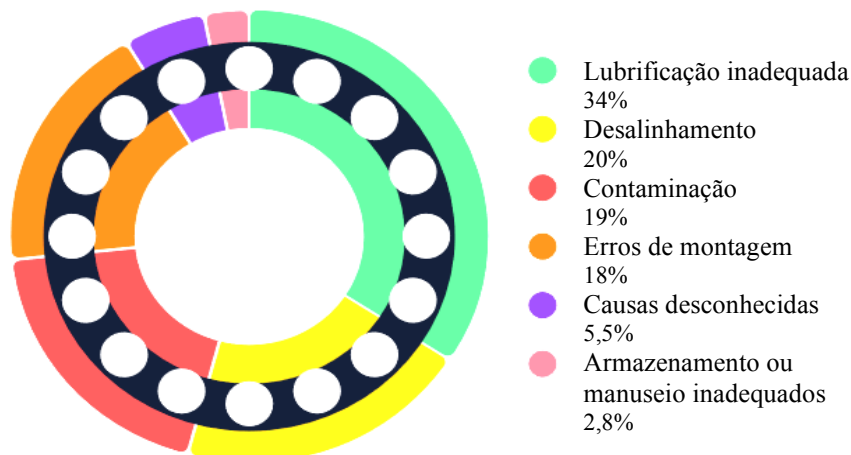


Fonte: BELL *et al.* (1985, com adaptações).

3.2.1 Falhas em rolamentos

Devido às características dinâmicas dos motores e conforme detalhado pelo tópico 3.2 *Falhas em motores* elétricos, os rolamentos são os elementos mais suscetíveis a falhas nos motores elétricos. Ainda, segundo levantamento da Tractian (2023), uma das grandes fornecedoras de dispositivos e *softwares* de gestão de vida útil de motores elétricos do mercado, as principais causas de falhas em rolamentos são: lubrificação inadequada, desalinhamento, contaminação, erros de montagem, causas desconhecidas, armazenagem e manuseio inadequados. Ademais, a representação dos percentuais dessas causas é exposta na Figura 16.

Figura 16: Principais causas de falhas em rolamentos



Fonte: TRACTIAN (2023, com adaptações).

Pode-se observar na Figura 16, que mais da metade das causas de falhas de rolamentos estão relacionadas com a lubrificação e contaminação. Além do exposto, segundo Koyo Seiko (2022), autor do livro “Rolamentos: Falhas, Causas e Contramedidas” do inglês “*Rolling Bearings: Failures, Causes and Countermeasures*”, em algumas aplicações esse número pode chegar a até 80% das causas de falhas, e afirma que, por essa razão, esse processo não pode ser negligenciado.

Além disso, percebe-se que desalinhamento e erros de montagem representam uma parcela expressiva do total de falhas nos rolamentos, demonstrando que as principais causas de queimas de motores provocam falhas funcionais nos rolamentos. Assim, é comum que existam planos de manutenção dedicados ao acompanhamento da vida útil de rolamentos, geralmente análise de vibrações mecânicas aliada a um plano sistemático de lubrificação, onde é possível identificar condições anormais como desalinhamento, desbalanceamento, erros de montagem, problemas de lubrificação e desgastes dos rolamentos (CARVALHO, 2015).

3.2.2 Falhas em enrolamentos

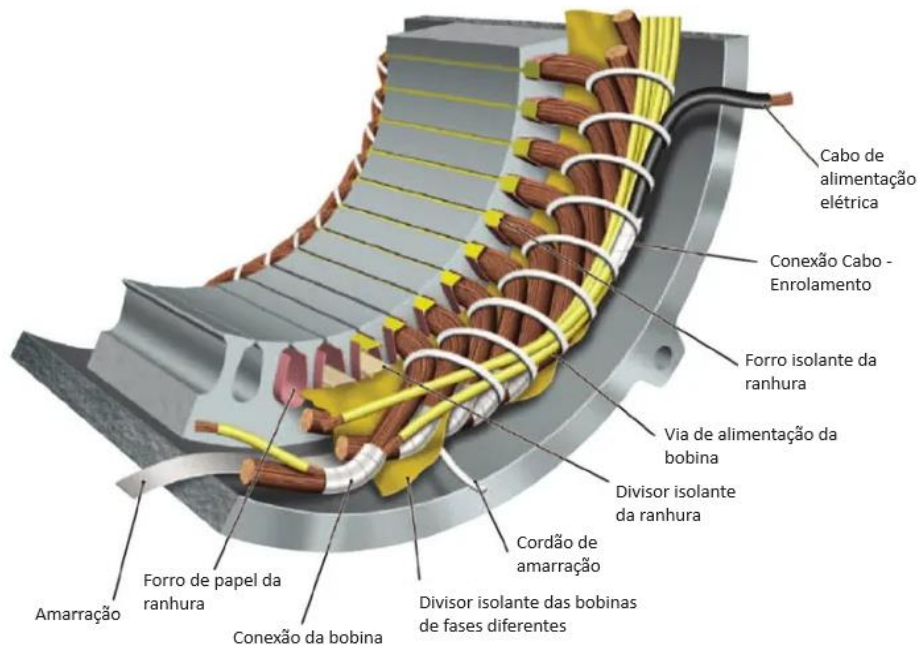
Apesar de os rolamentos serem os componentes que mais apresentam falhas em motores elétricos, devido às suas características construtivas, os enrolamentos necessitam de uma atenção especial, visto que, são muitos os fatores que podem levar à queima do motor elétrico.

Um detalhamento desses fatores é exposto na Figura 17, onde são exibidos os elementos que compõem o enrolamento do estator de um motor elétrico de indução trifásico típico.

Nota-se que os enrolamentos possuem vários adereços para garantir o pleno funcionamento no motor, tais como: isolamento das bobinas, em relação ao material metálico do estator e em relação às bobinas de outras fases, isolamento elétrica entre as espiras de uma mesma bobina, isolamento das conexões, amarrações das bobinas para limitar a vibração durante o funcionamento, etc. Percebe-se, então, que a isolamento elétrica de um motor é um ponto crítico do equipamento, necessitando de cuidados e monitoramento, visto que, mesmo com todos os elementos de controle, falha nos enrolamentos são bastante comuns, especialmente quando o motor opera fora das suas condições normais (BELL *et al.*, 1985). Segundo levantamentos da WEG (2019), uma das maiores fabricantes e prestadoras de serviços de motores elétricos do

mercado nacional, os principais modos de falhas em enrolamentos de motores elétricos são: curto entre espiras ou bobinas, curto entre fases, curto na conexão, curto na saída da ranhura ou no interior dela, muitos desses causados por: picos de tensão, desbalanceamento de tensão, rotor travado, superaquecimento e falta de fase.

Figura 17 - Características construtivas dos enrolamentos de um motor de indução trifásico



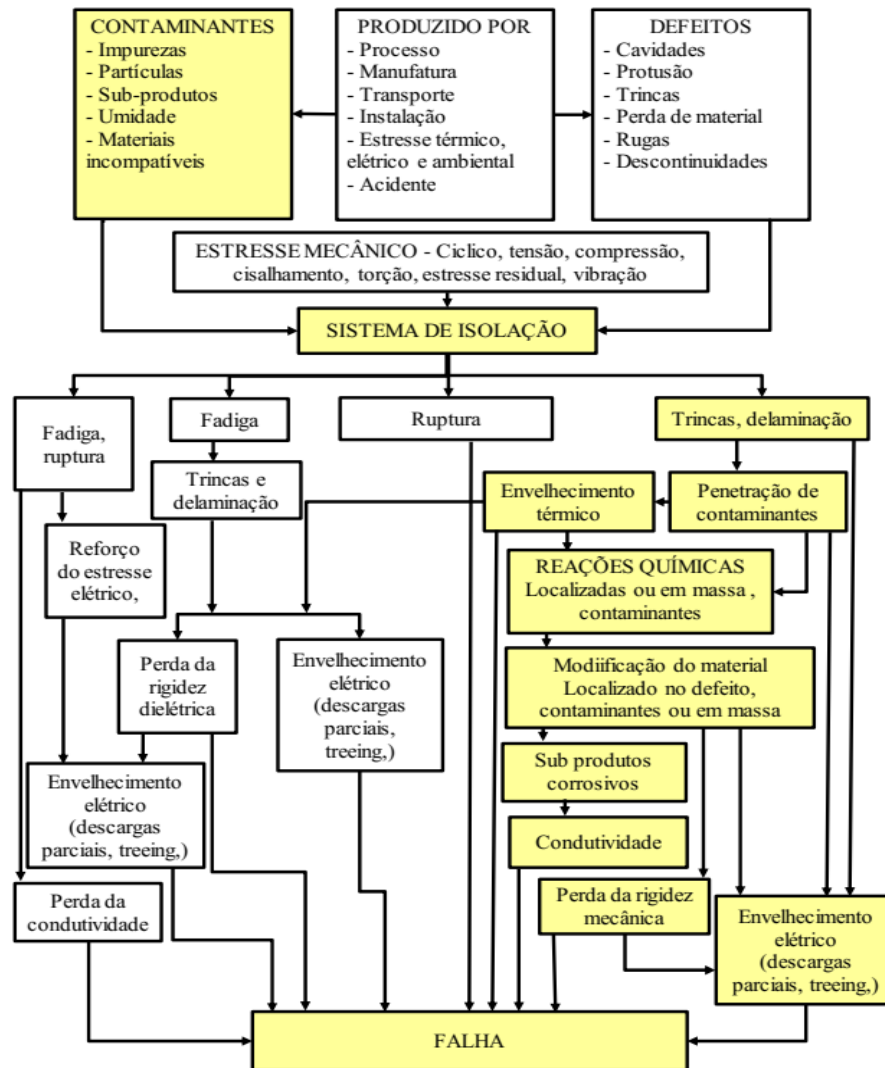
Fonte: TECH BRIEFS (2019, com adaptações).

Os sistemas de isolamento dos fios que formam as espiras dos enrolamentos elétricos, em geral, são formados por compostos de materiais como mica, epóxi e poliéster (WEG, 2023). Como esses materiais possuem permissividades e condutividades elétricas diferentes, quando são submetidos a tensões elétricas, se estabelecem nas interfases entre os materiais mecanismos de polarização elétrica. Em isolações com um bom estado de conservação, esse efeito é mínimo, mas em enrolamentos contaminados por corpos estranhos, submetidos à umidade ou envelhecidos, esse efeito pode evoluir para o fenômeno de descargas parciais, que consiste em descargas elétricas entre dois elementos submetidos a uma diferença de potencial elétrico, deteriorando completamente a isolação e causando a queima do motor (IEEE STD 43 – 2013). Dito isto, pode-se afirmar que, caso o sistema de isolação elétrica dos enrolamentos esteja fragilizado, a probabilidade de ocorrer uma queima por todas as causas já mencionadas neste trabalho aumenta de forma inestimável.

Nesse sentido, a norma IEC 60505 estabelece uma base para estimar o envelhecimento dos sistemas de isolamento elétrico sob condições de fadiga de tensões elétricas,

térmicas, mecânicas, ambientais ou combinações destas (IEC 60505, 2011). Na Figura 18, é apresentado um ciclo de fatores de estresse a que o isolamento pode estar submetido.

Figura 18: FTA dos eventos causadores de envelhecimento e falha em isolamentos



Fonte: IEC 60505, (2011).

Pode-se inferir da FTA exposta na Figura 18, que as falhas nos enrolamentos podem estar relacionadas com erros de fabricação, aplicação indevida e contaminantes, sendo que para cada item desse existe uma variedade de fatores que podem contribuir para a falha. Deste modo, um plano de manutenção dedicado a prolongar a vida útil de motores elétricos deve ser capaz de identificar estes tipos de condições anormais de funcionamento com margem de tempo para atuar de forma corretiva antes da falha potencial.

3.3 Métodos de predição de falha em motores elétricos

As técnicas de manutenção mais utilizadas atualmente se concentram em selecionar variáveis de controle e monitorar as condições para a detecção de modos de falhas específicas, com ênfase em um dos três componentes principais do motor elétrico: rolamentos, estator ou rotor (BENBOUZID, 2000).

Para consolidar a técnica de predição mais adequada para cada aplicação, é realizado um levantamento das falhas recorrentes, além de verificar as condições de operação dos equipamentos, identificando os pontos críticos para o processo. Ou seja, conhecer a problemática apresentada pelo sistema e investigá-la. Vale ressaltar que, enquanto a detecção visa encontrar a falha, o diagnóstico visa descobrir o tipo de falha e sua respectiva causa (CHOW, 2000).

Deste modo, os autores Zhongming e Bin, (2000), listaram os métodos principais para detecção e identificação de falhas em um motor elétrico:

- a. Monitoramento da resistência de isolamento;
- b. Análise de Circuitos de Motores (Motor Circuit Analysis - MCA);
- c. Monitoramento da vibração;
- d. Monitoramento de campo eletromagnético usando bobinas de busca;
- e. Medição de temperatura;
- f. Medição infravermelha;
- g. Medição do ruído acústico;
- h. Monitoramento de emissões de radiofrequências;
- i. Medição de descarga parcial.

Cada método disposto possui suas vantagens e desvantagens, de modo que a técnica preditiva escolhida em cada caso é a que melhor se adapta ao cenário produtivo e à estratégia de manutenção utilizada. Nesse sentido, muitos métodos de detecção de falhas e diagnósticos vêm sendo desenvolvidos, envolvendo diferentes grandezas físicas. Estes métodos podem se classificar como não invasivos, ou seja, sem o desmonte do motor e parada do mesmo, ou invasivos, onde as informações geralmente são coletadas de maneira urgente para a aquisição de dados (BALLAL *et al.*, 2007).

Deve-se citar que nem todas as aplicações requerem o emprego de técnicas refinadas de detecção, que geralmente envolvem grandes investimentos, visto que a adoção de

uma estratégia de manutenção visa alcançar uma alocação dos recursos das empresas de forma otimizada. Assim, para melhor entendimento, são abordados a seguir os aspectos principais das técnicas mais utilizadas no mercado atualmente e uma síntese com relação ao componente em falha que pode ser detectado pelo método.

3.3.1 Monitoramento de temperatura

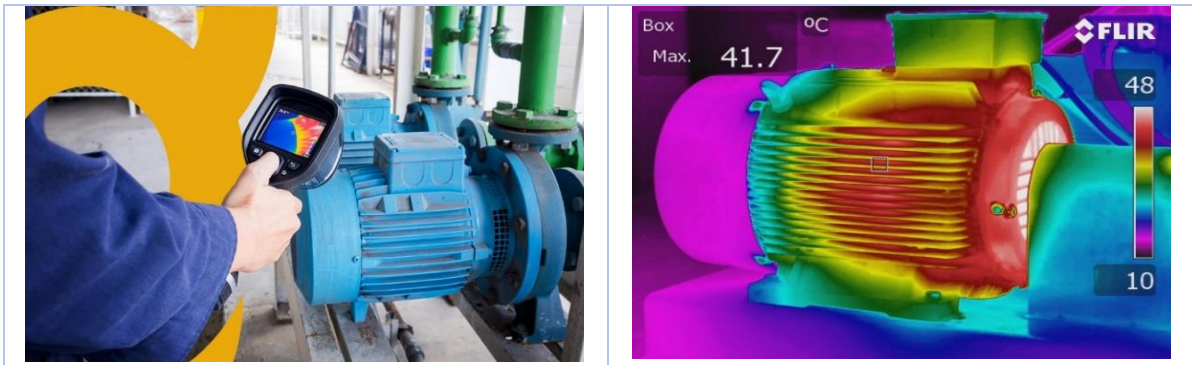
O dimensionamento de máquinas e componentes elétricos sempre deve levar em consideração a temperatura de trabalho em que o sistema será operado. Conforme visto anteriormente, um dos dados disponíveis na placa de identificação dos motores é a temperatura máxima suportada pelo sistema de isolamento das bobinas sem apresentar danos.

Importante ressaltar que os motores elétricos possuem sistemas de ventilação para dissipar a potência térmica dissipada pelas bobinas e pelo atrito das partes móveis e manter a temperatura dentro dos limites de funcionamento. Para esses sistemas atuarem de forma efetiva, no entanto, é necessário que o motor opere dentro dos seus limites pré-estabelecidos (WEG, 2023). Assim, o aumento de carga em um motor elétrico, geralmente, corresponde ao aumento da temperatura, visto que quanto maior for a potência mecânica requerida, maior deve ser a potência elétrica absorvida da rede elétrica e, conseqüentemente, maior será a potência dissipada por efeito joule. Dessa forma, quando o limite de carga é excedido, a vida útil do isolamento diminui, levando a falhas e, em pior caso, à queima do motor. Além disso, deve-se destacar que falhas nas partes móveis dos motores, especialmente nos rolamentos ou conjuntos acionados, podem elevar a temperatura em pontos específicos do equipamento devido ao aumento da energia dissipada pelo atrito das partes mecânicas. (TOLIYAT; KLIMAN, 2004).

O monitoramento da temperatura dos motores pode ser realizado com sensores de temperatura, termômetros ou termovisores, conhecidos também como câmeras termográficas. Uma demonstração de coleta em campo com uma câmera termográfica é apresentada na Figura 19. A imagem produzida por esse instrumento possui uma escala de cores, formada com base na radiação infravermelha emitida pelas partes do equipamento capturado.

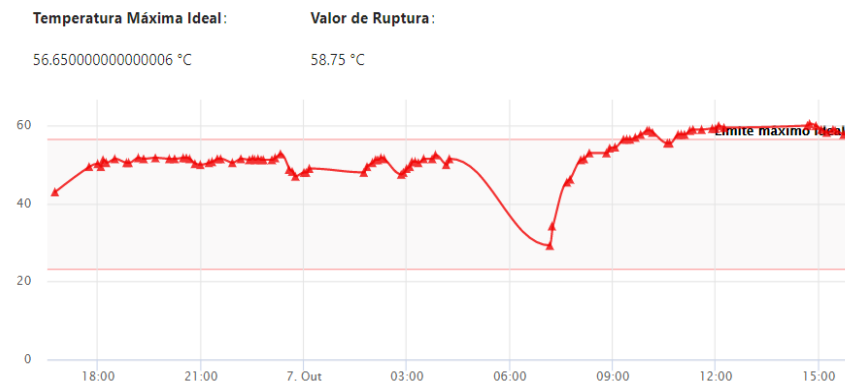
Muitas falhas podem começar de forma sutil, tendo como um dos primeiros indicativos a alteração de temperatura de uma máquina ao longo de um determinado período, sem a apresentação de outros sintomas iniciais. O exemplo apresentado no Gráfico 10 demonstra a medição de temperatura com a periodicidade de 3h por meio de sensores *in loco* (TRACTIAN, 2024).

Figura 19: a. Coleta de imagem com termovisor; b. Visão de temperatura em infravermelho



Fonte: a. ENGEFAZ (2024); b. SSMOTORES (2024)

Gráfico 10: Variação de temperatura ao longo do tempo



Fonte: TRACTIAN (2024).

Nota-se, pelo Gráfico 10, que o equipamento apresentou temperatura dentro dos limites normais entre às 18:00h e por volta de 05:30h, onde teve sua operação interrompida. Em seguida, nota-se que, após às 9:00h, o mesmo entrou em um regime de operação anormal do ponto de vista da temperatura, o que pode ser o indicativo de princípio de uma falha ou operação indevida.

Dessa forma, o monitoramento de temperatura é uma das ferramentas mais rápidas para identificar um princípio de falha. Sua importância é defendida por estudos que apontam que a cada 10 °C acima da temperatura limite de um motor, a expectativa de vida da isolação é reduzida pela metade, mesmo com os fatores de segurança pré-estabelecidos (LOISELLE; XU e VOLOH, 2015; TOLIYAT e KLIMAN, 2004).

3.3.2 Análise de vibrações mecânicas

A análise de vibração é historicamente a técnica de diagnóstico de falha mais implementada e difundida nas indústrias. Isso deve-se ao fato de que os primeiros problemas que surgiram, relacionados às máquinas e motores, foram os problemas físicos e essa técnica é a mais eficaz nesse sentido. Atualmente, esse processo é automatizado em grande parte dos casos, pois conta com a instalação de sensores em pontos estratégicos das máquinas para medição de vibração (ANTONINO-DAVIU et al., 2016).

A técnica tem como premissa que cada um dos componentes ou falhas de origem mecânica de uma máquina em operação irá produzir uma vibração de frequência específica. Essa vibração possui níveis, que dependendo de sua amplitude, podem ser considerados normais para o regime de operação ou indicar a necessidade de uma intervenção. A análise pode ser realizada comparando as grandezas em relação ao tempo, ou por meio da análise das frequências dos sinais medidos. Dessa forma, por meio da coleta e análise de dados de vibração, é possível identificar o tipo de falha, o grau de dano da mesma e o componente afetado (MARÇAL, 2000).

Existem três formas de medição, que vão depender do tipo de instrumento, são eles: medidor de vibração de nível global sem filtro, que são instrumentos capazes de medir o valor global da vibração em larga frequência; medidor de vibração com análise de frequência com filtro, que é idêntico ao anterior, exceto pelo fato de que o nível medido por ele demonstra a vibração dos componentes mais importantes para serem monitorados; e o Analisador de frequência, que é usado em casos onde a largura do filtro é muito estreita, sendo este último capaz de realizar uma Transformada de Fourier em um sinal aleatório, periódico ou transitório (TRACTIAN, 2024).

De modo geral, em planos de manutenção sistemáticos, a análise de vibração realiza a medição de dois parâmetros: Valor Global de Velocidade de Vibração do equipamento e o Envelope de Aceleração. Uma leitura de vibração de velocidade global indica a condição geral da máquina, mostrando um valor total de todos os sinais de vibração que emanam de todos os componentes da máquina dentro do intervalo de sensor do instrumento (SKF, 2009). Já uma medição de vibração de envelope de aceleração vai medir, através de filtros, os níveis de vibração do rolamento do equipamento.

Os limites de valores globais e envelope são estabelecidos pela norma ISO 10816-3 e estão dispostos na Tabela 4 e Tabela 5.

A saber, CL1 são rolamentos com um diâmetro de orifício do rolamento entre 200 mm e 500 mm e velocidade do eixo abaixo de 500 RPM, CL2 são rolamentos com um diâmetro de orifício do rolamento entre 200 mm e 300 mm e velocidade do eixo entre 500 RPM e 1800

RPM e CL3 são rolamentos com um diâmetro de orifício do rolamento entre 20 mm e 150 mm e velocidade do eixo de 1800 RPM a 3600 RPM. Dessa forma, os valores limites para envelope de aceleração são definidos conforme a Tabela 5.

Tabela 4: Valores de referência de limites de vibração global

ISO 10816-3		Machinery Groups 2 and 4		Machinery Groups 1 and 3	
Velocity		Rated power			
CMAS 100-SL		15 kW – 300 kW		Group 1: 300 kW – 50 MW Group 3: Above 15 kW	
in/sec eq. Peak	mm/sec RMS				
0.61	11.0	DAMAGE OCCURS			
0.39	7.1	RESTRICTED OPERATION			
0.25	4.5	UNRESTRICTED OPERATION			
0.19	3.5				
0.16	2.8	NEWLY COMMISSIONED MACHINERY			
0.13	2.3				
0.08	1.4	NEWLY COMMISSIONED MACHINERY			
0.04	0.7				
0.00	0.0	NEWLY COMMISSIONED MACHINERY			
Foundation		Rigid	Flexible	Rigid	Flexible

Fonte: SKF (2009).

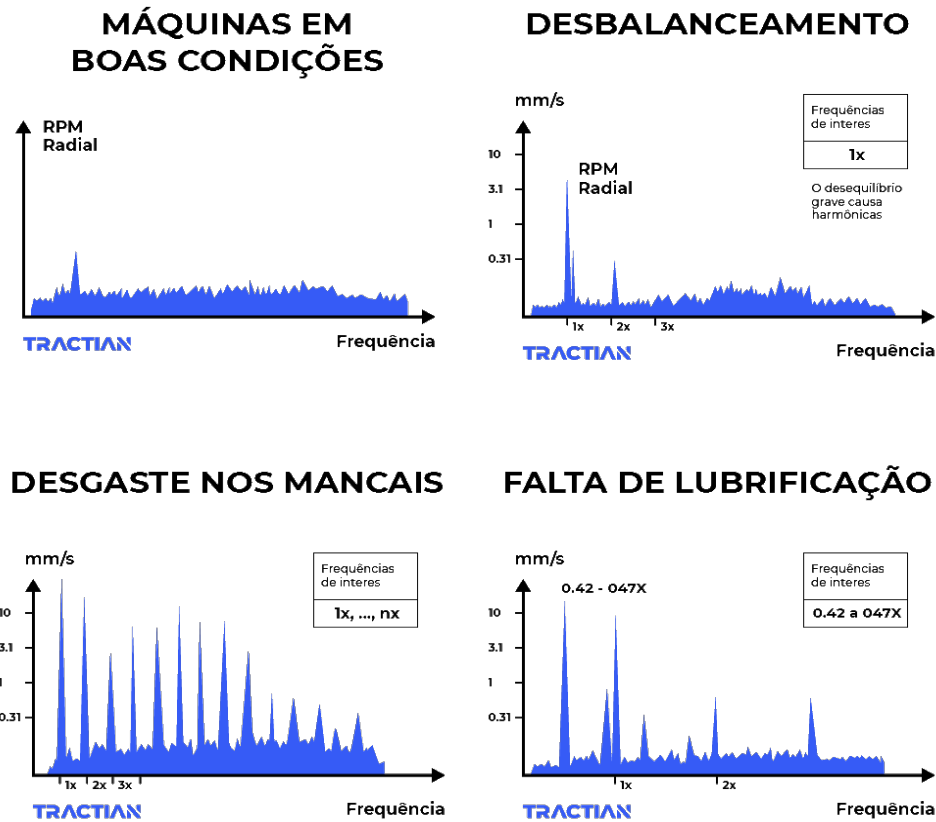
Tabela 5: Valores de referência para envelopes de aceleração por classe de rolamento

Classe	OK	Alerta	Perigo
CL1	0-1 gE	1-2 gE	acima de 2 gE
CL2	0-2 gE	2-4 gE	acima de 4 gE
CL3	0-4 gE	4-10 gE	acima de 10 gE

Fonte: SKF (2009).

Plotando os valores ao longo do tempo, é possível observar anormalidades, dessa forma, quando defeito é observado a partir da análise de tendência, é feita uma análise espectral. A técnica de análise do espectro possui padrões de vibração característicos, medidos com a máquina funcionando em perfeito estado. Dessa forma, o diagnóstico é realizado comparando as medições com esse padrão para identificar anormalidades (DUFFUAA, 2015). Por ser o método mais eficaz para identificação e diagnóstico de falhas mecânicas, seus parâmetros são mapeados e conhecidos. Alguns exemplos de comportamento das curvas características são apresentados no Gráfico 11, a seguir.

Gráfico 11: Frequências de vibração características por tipo de falha



Fonte: TRACTIAN (2024).

3.3.3 Padrão indicativo de falha por variação de parâmetros elétricos

Conforme visto anteriormente, o enrolamento é um componente crítico dos motores, no que diz respeito às ocorrências de falhas elétricas. Nesse sentido, as falhas nesse componente, vista de forma tardia na grande maioria dos casos, serão falhas funcionais, ou seja, levam à queima do motor, o que não é viável tanto para o processo quanto para os custos de manutenção.

Tendo em vista os modos de falhas mais comuns, os curtos-circuitos ocorrem entre bobinas, entre espiras ou entre bobinas/espiras e a carcaça. Assim, para obter um laudo que garanta a capacidade do motor de funcionar sem falha, é preciso avaliar como está a isolação do estator para a carcaça e entre as bobinas e espiras.

Essa avaliação é feita com base nas variáveis elétricas que representam os fenômenos físico-químicos envolvidos. Assim, é relevante lembrar que os enrolamentos são compostos por condutores isolados. Onde os condutores, geralmente, são metais com elevada

capacidade de condução de corrente elétrica (cobre, alumínio), já os isolantes são materiais com condutividade mínima e elevada resistência elétrica.

Materiais isolantes modernos são desenvolvidos para suportar os níveis de estresse previamente definidos, aos quais os equipamentos serão submetidos, normalmente, por anos. No entanto, conforme abordado em 3.2.2 *Falhas em enrolamentos*, quando os níveis de estresses são anormais ao funcionamento dos equipamentos, o processo de envelhecimento dos isolantes pode ser consideravelmente acelerado, diminuindo a vida útil dos materiais. Assim, uma forma eficiente de prolongar a vida útil de máquinas elétricas é garantir que os sistemas isolantes sejam minimamente expostos a materiais contaminantes, vibrações excessivas e altas temperaturas. Em especial, a presença de contaminantes pode se manifestar de forma sutil, mas observável com instrumentação e metodologia adequadas.

Dessa forma, é tido como uma boa prática realizar ensaios regulares nos equipamentos para identificar a degradação dos sistemas isolantes, o que causou a aceleração do processo de envelhecimento e quais as melhores ações para corrigir a condição identificada. Esses ensaios podem ser feitos por métodos de análise diferentes, dentre os mais utilizados destacam-se o Ensaio de Resistência de Isolação e a Análise de Circuito de Motores.

3.3.3.1 Ensaio de resistência de isolação

O procedimento de medir a resistência elétrica da isolação trata-se de um método de ensaio não destrutivo, consistindo na aplicação de tensão elétrica controlada nos terminais do estator do motor elétrico e medindo a corrente que flui através da isolação, de modo a obter a resistência de isolamento. Dessa forma, a avaliação da isolação é definida fisicamente pela primeira Lei de Ohm, conforme a equação (1) a seguir:

$$U = RI, \quad (1)$$

onde U é a tensão (V), R é resistência elétrica (Ω) e I a corrente (A).

A lei explica que, para uma dada resistência, quanto maior o nível de tensão estabelecido, maior será a corrente. Analogamente, para uma dada tensão, quanto maior a resistência, menor a corrente elétrica. Em um sistema real, mesmo os materiais isolantes, quando submetidos a tensões elétricas, irão permitir o fluxo de corrente elétrica, mas de intensidade insignificante para quaisquer propósitos práticos. Então, entende-se que bons

isolantes são caracterizados por terem uma resistência suficientemente elevada para não permitir o fluxo de corrente significativa quando submetido a tensões elétricas preestabelecidas (IEEE 43, 2013).

A aplicação da técnica é feita com a utilização do instrumento popularmente chamado de Megômetro, adotando os padrões estabelecidos, principalmente, pela norma IEEE 43 (2013), do Instituto de Engenheiros Elétricistas e Eletrônicos, que define os seguintes parâmetros a serem medidos: Resistência de Isolação a 1 min (RI_{1min}) e Índice de Polarização ($\frac{RI_{10min}}{RI_{1min}}$). Onde, RI_{1min} representa a Resistência de Isolação Elétrica (Ω), medida após 1 minuto da aplicação da tensão de ensaio e corrigida para a temperatura de 40 °C e IP representa o Índice de Polarização, que é o resultado da divisão da resistência de isolação a 10 minutos pelo valor obtido a 1 minuto.

Para a realização do teste, algumas orientações devem ser seguidas, para garantir a confiabilidade dos dados obtidos e principalmente a segurança do técnico. O instrumento de teste de isolação nunca deve ser conectado a condutores ou equipamentos energizados, o condutor possui uma capacitância intrínseca ao isolamento, por tanto este deve ser descarregado tanto antes quanto depois do teste, este procedimento é feito conectando as bobinas à terra para eliminar cargas estáticas. Alguns instrumentos podem ter funções de descarga automática. Outro ponto importante, que deve ser observado principalmente em regiões com climas comuns de alta umidade do ar, é a possibilidade de geração de arcos elétricos em isolamentos danificados. Por tanto, para evitar que o teste seja realizado em atmosfera perigosa, é orientado sempre medir a temperatura ambiente, umidade e ponto de orvalho, para garantir que as condições não sejam favoráveis à condensação durante o ensaio, além de não interferir na veracidade dos dados.

Tendo em vista que a resistência é fortemente afetada por variações da temperatura, é necessário normalizar as leituras para um valor de referência, a fim de criar um histórico de valores obtidos para a resistência de isolação. Por conveniência, é adotada a temperatura de 40 °C para resistência de isolação de motores elétricos. Dessa forma, para a correção de temperatura, é adotada a equação (2) expressa a seguir, aplicada a materiais isolantes termofixos:

$$RI_C = RI_M \left(e^{-4230 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{313} \right)} \right), \quad (2)$$

em que RI_C expressa o valor de resistência corrigido medido em Ω , RI_M o valor medido também em Ω e T é a temperatura do enrolamento durante o ensaio, medida em $^{\circ}C$ (IEEE 43, 2013).

Além dessa correção, sabendo que o ensaio de resistência constitui um teste de tensão contínua, o valor de tensão de teste deve ser restrito a um valor apropriado à tensão nominal do enrolamento e à condição básica de isolamento. Esse ponto é particularmente importante no caso de máquinas pequenas de baixa tensão ou enrolamentos úmidos, pois caso a tensão aplicada durante o ensaio seja muito alta, o isolamento pode sobrecarregar e será avariado. As diretrizes para tensões de teste segundo a IEEE 43-2013 são apresentadas na Tabela 6 seguir.

Tabela 6: Níveis de tensão recomendados para os ensaios de isolamento

Tensão nominal do enrolamento (V)	Tensão do teste de resistência (V)
<1000	500
1000 – 2500	500 – 1000
2501 – 5000	1000 – 2500
5001 – 12000	2500 – 5000
>12000	5000 – 10000

Fonte: Adaptado de (IEEE 43, 2013).

Os valores de referência para a Resistência de Isolamento e Índice de Polarização definidos pela norma são expostos na Tabela 7 e Tabela 8 a seguir. Na grande parte dos testes, os índices RI e IP são muito eficientes para identificar a condição geral da isolação, isto é, o grau de envelhecimento e degradação.

Tabela 7: Valores de referência para resistência de isolamento medida a $40^{\circ}C$

Isolamento mínimo resistência (megohms)	Amostra de teste
$RI_{1min} = kV + 1$	Para a maioria dos enrolamentos fabricados antes de 1970, todos os enrolamentos de campo e outros não descritos abaixo
$RI_{1min} = 100$	Para a maioria dos enrolamentos CA construídos após cerca de 1970 (formam bobinas enroladas)
$RI_{1min} = 5$	Para a maioria das máquinas com bobinas de estator enroladas aleatoriamente e bobinas formadas classificadas abaixo de 1 kV e armaduras CC

Fonte: Adaptado de (IEEE 43, 2013).

Tabela 8: Valores de referência para índice de polarização

Classificação de classe térmica (b, c, d)	I.P. mínimo
Classe 105 (A)	1,5
Classe 130 (B) e superior	2,0

- a. O I.P. do teste não é aplicável a campos não isolados dos enrolamentos;
- b. CEI 60085-01;
- c. IEEE Padrão 1;
- d. NEMA MG-1;

Fonte: Adaptado de (IEEE 43, 2013).

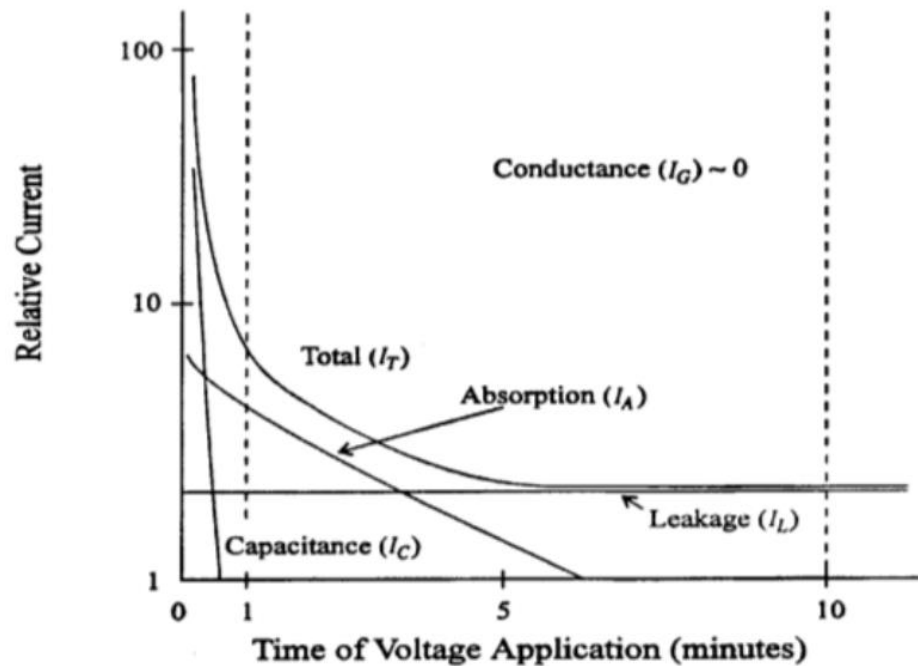
Apesar da eficiência dos parâmetros, quando a $RI_{I_{\min}}$ obtida é superior a $5000 \text{ M}\Omega$, a depender do valor da tensão aplicada, a corrente medida poderá ser muito baixa (nA ou pA), exigindo um elevado nível de precisão do equipamento utilizado no ensaio, já que pequenas variações de tensão, umidade relativa, cabos, conexões e vários outros parâmetros podem afetar a medição. Deste modo, para $RI_{I_{\min}}$ superior a $5000 \text{ M}\Omega$, o IP pode não expressar um bom indicativo do estado físico da isolação, sendo importante acompanhar a evolução desses valores, corrigidos para a mesma temperatura, ao longo do tempo.

Esse acompanhamento é realizado através da análise do Perfil de Resistência de Isolamento, ou PRI. Esse parâmetro é um bom indicativo para melhor entendimento do nível de contaminação e umidade presente nos bobinados, além do grau de envelhecimento, consistindo na análise de comportamento do gráfico da resistência de isolação plotado em função do tempo durante todo o ensaio, que geralmente tem 10 minutos de duração. Ou seja, a avaliação do PRI baseia-se em padrões de curvas, sendo necessário avaliar cada caso cuidadosamente para identificar o status do equipamento.

Adicionalmente, além da avaliação dos índices já mencionados, existe na IEEE 43 de 2013 a indicação de avaliação de um outro tipo de informação, apesar de ainda não definir valores ou padrões de referência para esta análise. Essa análise trata-se da verificação da curva da resistência de isolação em função do tempo de ensaio, presente em variadas literaturas, como no estudo *Insulation Resistance Profile (IRP) and Its Use For Assessing Insulation Systems*, elaborado por David L. McKinnon, membro da IEEE, onde são obtidos padrões de curvas de resistência de isolação característicos para diferentes estados físicos da isolação.

Para entendimento de como estes padrões foram definidos, é necessário compreender o comportamento gráfico das correntes estabelecidas na isolação no momento do ensaio, conforme demonstrado no Gráfico 12.

Gráfico 12: Comportamento das correntes do circuito equivalente do sistema de isolamento



Fonte: IEEE 43, (2013).

As quatro componentes da corrente, ilustradas no Gráfico 12, são:

- Corrente de fuga superficial (I_L): Corrente constante no tempo, que normalmente flui através das superfícies das cabeças das bobinas do estator ou entre condutores expostos e o rotor, em rotores bobinados. A amplitude da corrente de fuga de superfície depende da temperatura e da quantidade de material condutor, isto é, umidade ou contaminação na superfície da isolamento;
- Corrente de condução (I_G): Componente de corrente também constante no tempo, que flui da superfície da carcaça aterrada para os condutores submetidos à alta tensão e dependem do tipo de sistema de isolamento. Geralmente é considerada igual a 0;
- Corrente de fuga de carga capacitiva (I_C): Quando dois ou mais condutores são executados em conjunto num canal condutor, eles se comportam como um capacitor. Devido a este efeito capacitivo, uma corrente de fuga flui através da isolamento dos condutores. Esta corrente dura somente alguns poucos segundos assim que a tensão dc é aplicada e some assim que a isolamento é carregada para sua voltagem de teste completa. Em equipamentos de baixa capacitância, a corrente capacitiva é maior que a corrente de fuga de superfície, mas geralmente desaparece rapidamente. Já em

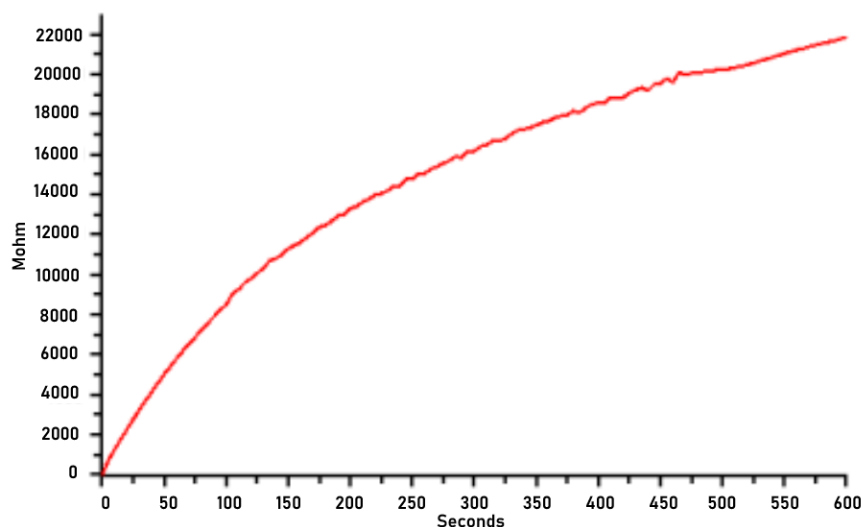
equipamentos de alta capacitância, a corrente de fuga de carga capacitiva pode durar muito tempo antes da leitura fixar-se;

- Corrente de fuga de absorção de polarização (I_A): A corrente de absorção é causada pela polarização de moléculas dentro do material dielétrico. Em equipamentos de baixa capacitância, a corrente é alta pelos primeiros poucos segundos e decresce vagarosamente até quase zero. Ao lidar com equipamentos de alta capacitância ou isolamento molhada e contaminada, não haverá decréscimo na corrente de absorção por um longo período.

Deste modo, se os enrolamentos estiverem contaminados com material parcialmente condutor ou exista a presença de umidade, a corrente resultante (I_T) será constante ou aleatória em relação ao tempo, já que I_L ou I_G serão muito maiores do que a componente I_A . Por outro lado, quando os enrolamentos estão limpos, secos e em um bom estado de preservação, a corrente I_T , normalmente, irá decrescer com o tempo, visto que a componente I_A é mais em relação às demais nos primeiros minutos de teste. Logo, comparar as mudanças nos valores da resistência de isolamento, ou na corrente total, ao longo do tempo de teste pode enriquecer o diagnóstico.

Nesse sentido, um exemplo de padrão de PRI característico de um motor saudável tem a aparência de uma exponencial invertida, como ilustrado no Gráfico 13. Essa característica de comportamento é uma resultante das componentes da corrente elétrica medida, visto que duas dessas componentes decrescem exponencialmente.

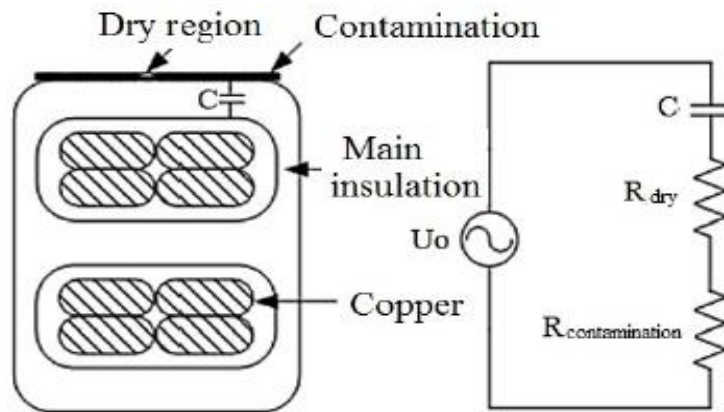
Gráfico 13: Perfil de Resistência de Isolação de uma isolamento saudável



Fonte: McKinnon, membro IEEE (2011).

Quando na presença de contaminação, alguns fenômenos diferentes irão ocorrer na isolação. Para fins de contextualização, é ilustrado na Figura 20 o que ocorre em enrolamentos contaminados do ponto de vista elétrico. A Figura 20 expõe a seção transversal de uma espira de uma bobina de um estator de alta tensão e seu respectivo circuito equivalente, que mostra o fluxo de corrente de fuga.

Figura 20: Superfície de enrolamentos com presença de contaminação



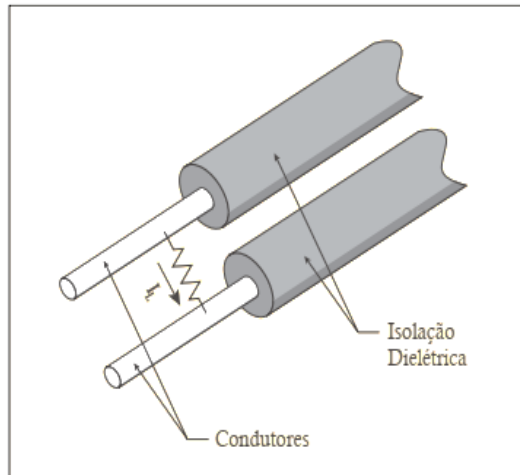
Fonte: LIN *et al.* (2016).

Conforme a Figura 20, à medida que substâncias contaminantes são depositadas nos enrolamentos, são estabelecidas regiões limpas, chamadas de R_{dry} (Ω), e regiões contaminadas, $R_{contamination}$ (Ω). Tipicamente, as regiões limpas são caracterizadas por possuir resistências muito maiores do que regiões contaminadas. Nessas situações, diferenças de potenciais são estabelecidas entre as pequenas regiões limpas e aquelas contaminadas. Quando essa diferença de potencial se torna suficientemente grande, ocorre a ruptura dielétrica do ar atmosférico que circunda os elementos, dando origem a pequenas descargas. Essas descargas degradam e carbonizam as resinas e fitas de poliéster da isolação, tornando os elementos mais condutores. O processo de carbonização e aumento da condutividade cria regiões com diferentes potenciais elétricos, estabelecendo uma reação em cadeia. Ressalta-se que esse fenômeno é mais comum em motores de alta tensão, visto que a tensão de ruptura do ar é elevada. Porém, quando elementos com características condutoras são depositadas nos enrolamentos, tais como graxa, areia e umidade, motores de baixa tensão também podem ter sua isolação danificada de forma análoga (WEG, 2020).

Como já mencionado, quando existe umidade presente na superfície do sistema isolante, a corrente superficial, I_L , domina a corrente resultante total, I_T , sendo a corrente de

absorção, I_A , insignificante. Uma ilustração dessa corrente de fuga indutiva fluindo entre os condutores é mostrada na Figura 21.

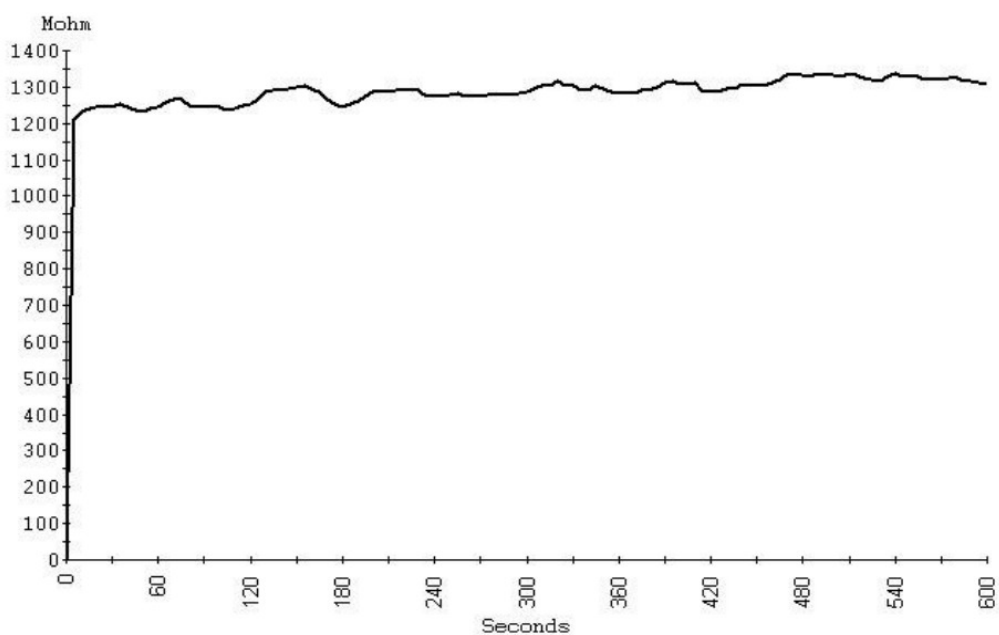
Figura 21: Representação da corrente de fuga indutiva



Fonte: Adaptado de (FLUKE, 2019)

Deste modo, observa-se um valor de resistência de isolamento reduzido, ao passo que a resistência estabiliza rapidamente. No Gráfico 14 a seguir, é mostrado um caso típico de PRI de um sistema isolante contendo umidade.

Gráfico 14: Perfil de resistência de isolamento na presença de umidade



Fonte: McKinnon, membro IEEE (2011).

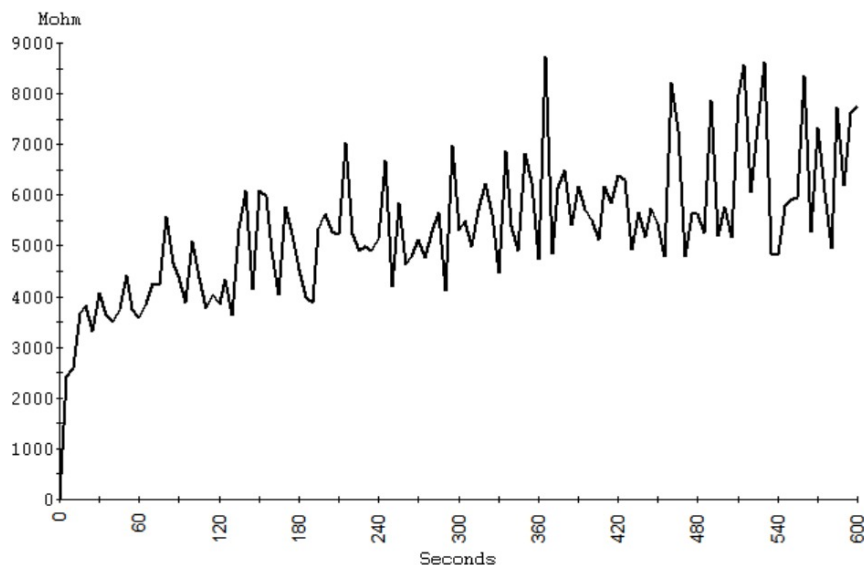
Para enrolamentos com essa característica, o laudo preditivo geralmente indica a secagem do bobinado em estufa com temperatura controlada para remoção da umidade. Além disso, são recomendadas ações preventivas para verificar se a umidade no local de instalação do motor é um fator recorrente.

Já quando a superfície do enrolamento possui contaminação, a corrente de fuga superficial, I_L , tenta aumentar significativamente, em comparação com bobinados limpos e secos. Por conta de as áreas contaminadas possuírem pontos de descontinuidade, ou seja, pode haver resíduos que permitem passagem de corrente em pontos distintos da superfície do enrolamento, a resistência não apresentará estabilidade de valores ao longo do tempo. Com testes realizados, nota-se que a contaminação geralmente é identificada nas cabeças das bobinas dos estatores.

Dessa forma, se o contaminante possuir características condutivas, então um fluxo de corrente se estabelece, desde que exista uma diferença de potencial (WEG, 2020). Contaminação, quando disposta de forma aleatória sobre as bobinas, tipicamente torna a corrente de fuga de superfície oscilatória e serrilhada. Por outro lado, quando os contaminantes estão impregnados em toda a superfície da isolação, é comum observar o mesmo padrão apresentado no Gráfico 14.

No Gráfico 15 a seguir, é mostrado um caso típico de PRI de um sistema isolante contendo contaminação.

Gráfico 15: Perfil de resistência de isolação na presença de contaminação

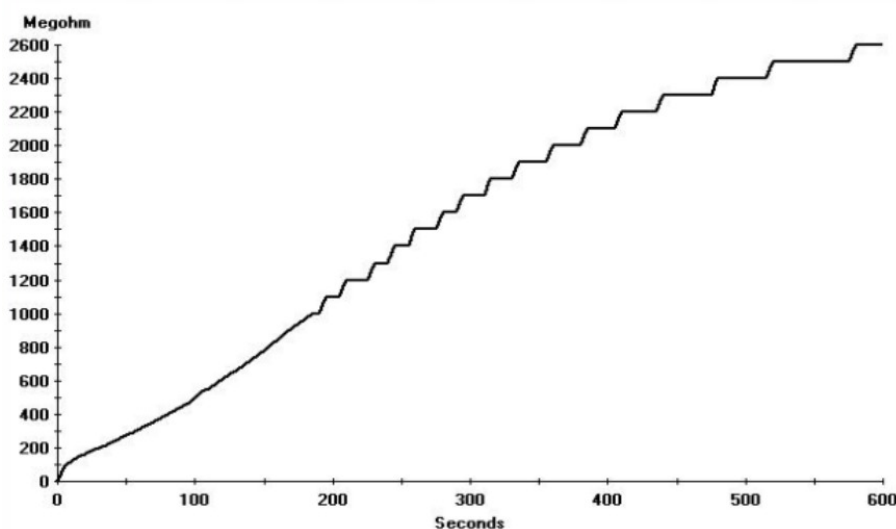


Fonte: McKinnon, membro IEEE (2011).

Para enrolamentos com indicativo de contaminação conforme o Gráfico 15, o laudo preditivo geralmente indica o rejuvenescimento do bobinado, que inclui: lavagem com detergente dielétrico; reimpregnação, que é o serviço de adição de uma camada de verniz isolante ao enrolamento e secagem em estufa. Outras recomendações serão feitas com base no tipo de contaminante identificado e com relação às operações de manutenção mecânica do motor que podem colocar os enrolamentos em exposição.

Além dos casos apresentados, os enrolamentos podem ficar fragilizados por tempo de utilização ou por operação em regimes que reduzem sua vida útil acelerando o envelhecimento, como condições de sobrecarga, condições ambientais de temperatura e umidade elevadas, entre outros. Quando um sistema de isolamento está com características de envelhecimento, a I_A , corrente de absorção, é a principal componente afetada. Dessa forma, à medida que o isolamento se torna fragilizado, sua capacidade de polarizar diminui. Esse fenômeno pode ser visto por um “achatamento” da forma exponencial da resistência, correspondendo a um PRI conforme mostrado no Gráfico 16.

Gráfico 16: Perfil de resistência de isolação envelhecido



Fonte: McKinnon, membro IEEE (2011).

Os dados do teste de resistência de isolamento são úteis na avaliação da presença da grande maioria dos problemas de isolamento, como contaminação, umidade absorvida ou rachaduras graves. No entanto, segundo a norma IEEE 43, algumas limitações desse método devem ser consideradas. A resistência de isolamento de um enrolamento não está diretamente relacionada à sua rigidez dielétrica, a menos que o defeito seja concentrado. É impossível

especificar o valor da resistência de isolamento no qual o isolamento do sistema de um enrolamento falhará, isto é, não há como estimar a ocorrência exata de falhas com base em valores. Além disso, uma única medição de resistência de isolamento em uma tensão específica não indica se a matéria é concentrada ou distribuída por todo o enrolamento.

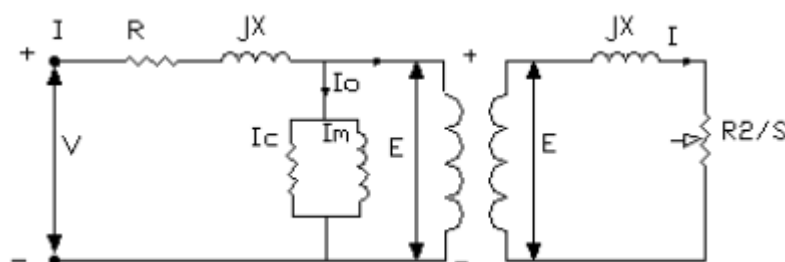
Vale ressaltar ainda que medições de tensão direta, como IR e PI testes, podem não detectar vazios de isolamento interno causado por impregnação inadequada, deterioração térmica ou ciclagem térmica formada nas bobinas no estator, e por ser um ensaio realizado com o motor parado, também não irão detectar problemas devido à rotação, como bobinas soltas ou vibração que leva ao movimento do enrolamento final. Para situações de diagnóstico como essas, é recomendado a utilização de um método de maior sensibilidade, de forma a complementar o laudo e cobrir essas limitações pontuais (IEEE 43, 2013).

3.3.3.2 Análise de Circuito de Motores

Outra técnica voltada para a avaliação de isolamento é a Análise de Circuitos de Motores, essa técnica é um pouco mais abrangente com relação ao diagnóstico, pois consegue ter uma maior sensibilidade de parâmetros. Esse método utiliza a Resistência (R), Impedância (Z), Indutância (L), Ângulo de Fase (ϕ), a relação Corrente/Frequência (I/F) e a Resistência de Isolação para detecção de defeitos em enrolamentos (curtos, desbalanceamento, degradação), defeitos em cabos e em rotores. Além disso, um dos pontos mais relevantes dessa técnica é a possibilidade de estimar o tempo de falha de forma precisa, a partir de análises de tendência (PENROSE, 2004).

Visto que a técnica analisa o circuito elétrico correspondente do motor em funcionamento, convém conhecer o circuito equivalente monofásico de um motor de indução trifásico, ilustrado na Figura 22, e os detalhes de funcionamento de um motor elétrico.

Figura 22: circuito equivalente monofásico de um motor de indução trifásico



Fonte: DEL TORO (1999, com adaptações).

No circuito equivalente da Figura 22, R representa a resistência elétrica dos enrolamentos do estator, X as reatâncias de dispersão do circuito magnético, R_2/S a resistência equivalente do circuito do rotor e as correntes I_m e I_c expressam as correntes de magnetização do núcleo magnético e as perdas no núcleo respectivamente.

Durante o funcionamento do motor, algumas mudanças físicas irão ocorrer no sistema de isolamento dos enrolamentos e no material do núcleo magnético. À medida que a corrente aumenta em cada fase, surge no interior dos condutores o efeito pelicular, que força a corrente elétrica para a superfície do condutor. Os dipolos elétricos polarizam na isolamento, entre condutores, devido às variações na tensão e na corrente, causando uma constante variação nas capacitâncias entre os condutores, e também irão polarizar entre condutores e a carcaça, devido às mesmas variações, causando uma constante variação nas capacitâncias entre os enrolamentos e a massa. Os dipolos magnéticos polarizam nas proximidades de cada polo dentro do núcleo magnético. Assim, é gerada a relutância, que tenta realinhar os dipolos magnéticos, provocando mudanças no campo magnético. Esse comportamento é conhecido como histerese (DEL TORO, 1999).

Diante das leis que regem o funcionamento em condições normais de um motor, quando um defeito surge no bobinado (curto, contaminação ou danos no núcleo magnético), as propriedades elétricas do sistema de isolamento são afetadas. Por exemplo, em um curto em desenvolvimento, as alterações na isolamento ocorrem devido às variações em como os dipolos elétricos são polarizados. De forma semelhante, enrolamentos contaminados apresentam mudanças na reatância capacitiva entre as superfícies do sistema de isolamento (PENROSE, 2008). Os valores de referência vão depender do modelo de instrumento de MCA utilizado. De modo geral, segundo Penrose (2008), autor dos estudos *Estimating Motor Life Using Motor Circuit Analysis Predictive Measurements Part 1* (2003); *Part 2* (2004), os valores de referência dos parâmetros para ensaios com o motor desacoplado são definidos conforme a Tabela 9.

Tabela 9: Valores de referência para Análise de Circuito de Motores

Isolamento mínimo resistência (megohms)	Test specimen
Resistência	< 5%
Z e L	<3% e <5% respectivamente
Fi e I/F	+/- 0 Para resultado médio (comparação de fases)
Resistência de isolamento	> 5 MOhm para < 600V > 100Mohm para > 600V

Fonte: Adaptado de (Penrose, 2008).

Assim, pela capacidade de detectar curtos-circuitos e degradação no isolamento antes de darem sinais óbvios de dano, a Análise de Circuitos de Motores é uma ferramenta valiosa de manutenção preditiva e manutenção baseada na condição (INFRASPEAK, 2021).

4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta um detalhamento do estudo de caso de implantação de uma metodologia de gestão de manutenção estratégica em uma indústria de grande porte, bem como detalha os procedimentos metodológicos que foram adotados, explica as justificativas para a escolha dos métodos utilizados e descreve o desenvolvimento de cada etapa da análise proposta, dando ênfase àquelas que foram mais impactantes, que tratam das melhorias dos métodos de ensaios elétricos aliado à manutenção baseada na condição.

4.1 Motivações e Contextualização

O presente estudo de caso foi realizado em uma indústria do ramo calçadista localizada na cidade de Sobral, no estado do Ceará. O parque fabril é constituído por oito unidades produtivas que funcionam em tempo integral, distribuídas por tipo de produto produzido. A organização em estudo possui um perfil de produção bastante amplo, pois sua cadeia produtiva compreende desde o tratamento da matéria-prima, composta basicamente pelo polímero Policloreto de Vinila (PVC), a produção de moldes, montagem das peças, costura, pintura e acabamentos, até a confecção de embalagens, encaixotamento e envio dos produtos.

Pela extensão do parque fabril e a variedade de maquinários utilizados, a estratégia de manutenção é subdividida em supervisão de manutenção de processo produtivo e supervisão de manutenção de patrimônio. No entanto, a gerência de manutenção é centralizada e possui um setor de o PCM e Confiabilidade.

No final do ano de 2021, o corpo estratégico da manutenção optou pela implantação de uma célula de confiabilidade, no sentido de incorporar preceitos da engenharia de manutenção dentro da gerência e fomentar a utilização de métodos competitivos de técnicas preditivas.

A motivação dessa otimização de visão estratégica veio da sensibilidade da gestão com relação a um dos principais indicadores do negócio, os custos de manutenção dos ativos. A organização em estudo faz parte do setor econômico de bens de consumo, onde a produção se adapta ao comportamento do consumidor, influenciado de diferentes formas ao longo do ano.

Por ser um mercado sazonal, foi observado que, conforme a demanda produtiva aumentava, os custos com manutenção de motores elétricos, principalmente de forma corretiva, seguiam o mesmo comportamento, fazendo com que esse indicador crescesse de forma

significativa além dos parâmetros previstos. Além disso, as ocorrências de paradas de máquinas refletiam em perdas de produção. Dessa forma, visto o impacto da confiabilidade desse ativo para o negócio, foram discutidos caminhos para analisar as circunstâncias que levaram a tal sentimento da gestão e quais ações seriam implementadas para constituir um plano de manutenção a ser estabelecido, com o objetivo de conduzir a uma melhor performance de operação desses equipamentos e consequentemente reduzir os custos.

Assim, no primeiro ano de implementação da célula de confiabilidade, em 2022, foi definido um plano de manutenção preditiva teste, que estabelecia ensaios anuais de resistência de isolamento com o instrumento megômetro, onde as análises eram realizadas com base nos parâmetros da norma IEEE 43(2013), detalhada no tópico de *3.3.3.1 Ensaio de resistência de isolamento*. Este método foi escolhido para detecção e diagnóstico de falhas elétricas, a fim de entender e mitigar as causas de queima recorrente de motores. Sua implementação exigia um baixo custo de investimento, gerando uma previsão de retornos positivos a curto prazo.

Com os dados obtidos por esses ensaios, foi constatado um alto índice de falha em enrolamentos. Os motores com esse diagnóstico recebiam um laudo técnico com a orientação de beneficiamento, ou seja, a troca do enrolamento antes que a falha potencial evoluísse, ocasionando a queima do motor e a parada de produção.

A técnica foi implementada conforme as indicações da norma, entretanto, conforme abordado, o método possui limitações. Apesar de as falhas funcionais terem sido evitadas nesses casos, onde os motores eram rebobinados, o índice de queima de motores ainda se apresentava como um fator preocupante. Além disso, era necessário o monitoramento das condições dos equipamentos e não existia um método que pudesse detectar e diagnosticar falhas mecânicas. Outra problemática observada foi o fato de que o processo de beneficiamento era realizado de forma externa à fábrica por um custo elevado e com prazos de entrega inviáveis para a demanda de produção, o que, somado às queimas ainda existentes, resultou em uma elevação dos custos.

Diante desse cenário, uma série de ações foram discutidas para solucionar essas problemáticas. Assim, atrelada à possibilidade de ganhos com o aprimoramento da estratégia, a gerência de manutenção ampliou os investimentos para a implementação de outras técnicas, que pudessem detectar e diagnosticar as falhas elétricas não identificadas, que estariam ocasionando essas queimas de motores, além de elaborar o projeto de implementação de uma oficina de motores, com o objetivo de realizar ações corretivas internamente, agilizando o processo e reduzindo os custos com envios externos.

De forma a complementar a estratégia de confiabilidade, apesar de não ser um indicador crítico na época, também foi estabelecida a utilização de métodos preditivos que pudessem verificar o cenário de falhas de origem mecânica.

Portanto, para o ano seguinte, foi estabelecido um novo plano de gestão de manutenção com adoção de novas práticas, conforme descrito a seguir.

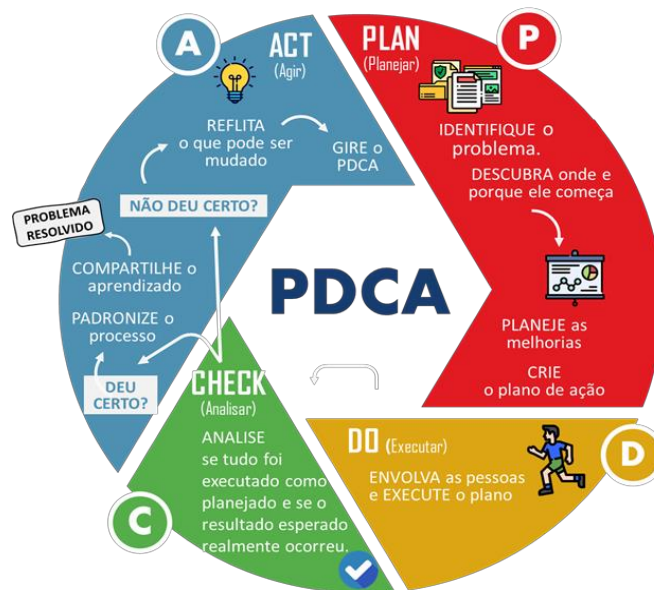
4.2 Estruturação da metodologia

Com o objetivo de melhorar os resultados obtidos com a estratégia anterior, no início de 2023, foram tomados como base os princípios da 2.3.2 *Manutenção centrada em confiabilidade*, com o pressuposto de que os pilares de mantimento do negócio devem nortear as ações de uma manutenção estratégica e que estas devem ser adequadas à realidade. De fato, com base nas referências citadas, organizações de produtos idênticas, mas diferentes no avanço tecnológico e no tamanho da produção, podem aplicar sistemas de manutenção diferentes e estes podem ser executados com sucesso. Assim, os sistemas de manutenção são projetados usando experiência e julgamento, suportados por uma série de ferramentas e técnicas de decisão formal.

Dessa forma, para fomentar os melhores resultados com o presente estudo de caso as etapas deste procedimento estão estruturadas com base na metodologia do ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), da tradução: planejar, executar, analisar e agir, sua simbologia cíclica é mostrada na Figura 23.

Na prática, esta é uma ferramenta de acompanhamento e medição de qualidade de um processo, onde cada uma dessas fases do ciclo possui atividades correspondentes, inerentes a um plano geral. Esta ferramenta foi escolhida por ter o foco na melhoria contínua do processo acompanhado, direcionando a equipe envolvida a planejar as ações de forma eficaz, executar da melhor forma e aprender com os erros, corrigindo e controlando a rota ainda durante o processo para melhores resultados no futuro.

Figura 23: Representação da ferramenta PDCA



Fonte: Cavalcante (2023).

Subdivisão das etapas com base no ciclo PDCA:

- Etapa 1 – Planejamento:
 1. Entendimento da problemática;
 2. Conhecimento dos processos envolvidos;
 3. Mapeamento dos pontos críticos;
 4. Criação de banco de cadastro dos equipamentos;
 5. Estabelecimento das melhores técnicas de avaliação;
 6. Definição de método para coleta de dados.
- Etapa 2 – Execução e Checagem dos dados:
 1. Coleta de dados;
 2. Criação de banco de dados e acompanhamento;
 3. Levantamento de características do cenário, que possivelmente não foram vistas na etapa de planejamento;
 4. Emissão de laudo técnico com o diagnóstico e ações de manutenção;
 5. Execução de manutenções corretivas.
- Etapa 3 – Análise de resultados:
 1. Análise de padrões obtidos;
 2. Validação das ações estabelecidas por meio de nova coleta;
 3. Demonstrativo de dados geral para validação de resultados do plano.

- Etapa 4 – Padronização:
 1. Correções e ajustes necessários;
 2. Padronização da estratégia.

4.2.1 Planejamento e mapeamento da criticidade de processos e equipamentos

Após o conhecimento da problemática a partir da percepção dos gestores, o passo seguinte consistiu em criticar o processo e as máquinas envolvidas, ou seja, estabelecer níveis de criticidade dos ativos com base em sua entrega, a fim de entender os pontos prioritários a serem visualizados pela gestão. Assim, para a plena compreensão dos fatores considerados nesta etapa, um resumo da cadeia de produção e sua relação com sistemas secundários é detalhada a seguir.

A cadeia de produção inicia no processo de injeção, este processo é realizado por uma máquina injetora conforme a Figura 24.

Figura 24: Máquina injetora rotativa de termoplástico



Fonte: Mais Polímeros (2019).

A máquina injetora de termoplásticos conforme a Figura 24, é usada no processo de fundir e moldar polímeros de acordo com a peça que será criada no processo de transformação. Nessa operação, o plástico é aquecido por meio resistências e injetado em um molde, que em seguida é resfriado e então poderá ser aberto para extração da peça (MAIS POLÍMEROS, 2019).

Para injetar o polímero em alta temperatura, a máquina utiliza o ar em alta pressão, em uma série de comandos pneumáticos, que por sua vez, é produzido pelo sistema de ar

comprimido, formado por um conjunto de compressores de ar, como o modelo ilustrado na Figura 25.

Figura 25: Modelo de compressor de ar



Fonte: Ingersoll Rand (2012).

Esses equipamentos, conforme o modelo da Figura 25, suprem uma rede de ar pressurizada distribuída em toda a fábrica por meio de tubulações. O processo de compressão do ar é feito por uma unidade compressora acoplada a um motor. Onde, por meio de um mecanismo de aspiração, o ar é retirado do meio externo e injetado em uma câmara compressora, onde seu volume é reduzido, conseqüentemente aumentando a pressão.

Em seguida, após a injeção do plástico PVC em alta temperatura, a peça é submetida a um choque térmico, isto é, a mudança de estado físico do plástico é ocasionada pela redução da temperatura em um curtíssimo intervalo de tempo. Para tanto, a matriz contendo o molde é resfriada com água em baixa temperatura, fornecida através de um sistema de bombeamento, denominado sistema de Água Gelada Industrial. Deste modo, após o resfriamento, a peça é retirada.

Ademais, destaca-se que os movimentos realizados pela injetora são conduzidos por um sistema hidráulico. Dessa forma, o óleo utilizado nesse sistema também adquire calor durante o processo de injeção devido ao elevado atrito gerado nas bombas hidráulicas a pistão, responsáveis por pressurizar e dar vazão ao sistema, movimentando os canhões de injeção. Assim, para que as propriedades do óleo sejam mantidas durante um período prolongado, a máquina injetora possui um compartimento denominado trocador de calor, para que a temperatura do óleo possa ser normalizada. Assim, o óleo da unidade hidráulica é direcionado ao trocador de calor da máquina, onde perde calor por meio da troca térmica com água em temperatura mais baixa, podendo retornar novamente ao sistema, reiniciando o processo. A água

utilizada nos trocadores de calor das injetoras é entregue por um sistema de suporte, denominado como Sistema de Água Condensada Industrial.

A água gelada industrial e a água condensada industrial são enviadas às injetoras de maneira semelhante ao ar comprimido, em tubulações distintas que se distribuem na planta, onde são acopladas as mangueiras de alimentação das injetoras. No entanto, a pressão para que essas águas sejam enviadas é gerada por bombas centrífugas, semelhantes à da Figura 26, para cada sistema.

Figura 26: Modelo de bomba centrífuga



Fonte: Mérito Comercial (2024).

A água gelada utilizada para o resfriamento das matrizes chega na injetora para a troca térmica com 12 °C em média. Para isso, antes de ser bombeada, esta é resfriada por um equipamento de refrigeração industrial, denominado *chiller*, conforme modelo na Figura 27.

Após passar pela injetora, essa água adquire calor e retorna para ser resfriada novamente, reiniciando o ciclo. Por tanto, o sistema de água gelada é composto basicamente por *chillers* e bombas.

Figura 27: Modelo de *chiller*



Fonte: Carrier (2024).

Além disso, a água condensada utilizada nos trocadores de calor chega à injetora com 26 °C em média. Essa água não chega a ser gelada, mas é utilizado um mecanismo de retirada de calor para que ela atinja essa temperatura. O mecanismo é um sistema de torres de arrefecimento, que possuem ventiladores acionados por motores, semelhante ao exemplo mostrado na Figura 28.

Figura 28: Modelo de torre de arrefecimento



Fonte: ABC Torres (2024).

Dessa forma, após passar pela injetora, a água condensada industrial adquire calor e retorna para as torres conforme o modelo da Figura 28, onde perde temperatura por meio da ventilação forçada e é bombeada novamente, reiniciando o processo. Assim, o sistema de água condensada é composto basicamente por torres de arrefecimento e bombas.

As peças moldadas na injetora, passarão pelos processos de pintura, montagem e embalagem, e só então serão encaminhadas para a embalagem e centro de distribuição. Ressalta-se que a pintura das peças é realizada em cabines com o uso de pistolas de pinturas pressurizadas. Esse mecanismo de pintura naturalmente gera resíduo de tinta particulado no ar, que por legislação ambiental não pode ser diretamente descartado na atmosfera. dessa forma, para a remoção desse particulado, é utilizado um sistema de exaustão composto por cabines, dutos, torres e exaustores.

Os exaustores são ventiladores axiais acoplados a motores para retirar grandes massas de ar de um ambiente. Assim, o ar com resíduos que acumula na parte interna das cabines é direcionado aos dutos de forma contínua por meio dos exaustores. Os dutos interligam as cabines ao compartimento de filtragem do ar, chamado de torre de exaustão, onde o

particulado é retido e o ar filtrado é direcionado ao ambiente por meio de uma chaminé. Um modelo de sistema de exaustão é apresentado na Figura 29.

Figura 29: Exemplo de sistema de exaustão, com motor e torre



Fonte: Aeroville (2020).

Assim, foi elaborado um quantitativo de motores do processo que seriam avaliados pelo plano. A Tabela 10 a seguir demonstra a distribuição de motores por sistema e suas respectivas potências.

Tabela 10: Mapeamento de motores por sistema e potência

POTÊNCIA (CV)	BOMBAS	COMPRESSORES	EXAUSTORES	INJETORAS	TOTAL
40	8			14	22
50		18		15	33
60			2	7	9
66				1	1
70				5	5
75			1	148	149
100	1	10	8	1	20
200		1			1
TOTAL	9	29	11	191	240

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o conhecimento do processo e seus sistemas de suporte, é possível entender e definir a criticidade. Para tal etapa, foi utilizada uma adaptação da matriz GUT, sigla para Gravidade, Urgência e Tendência, que é uma ferramenta a nível gerencial que estabelece uma maneira de calcular critérios, que organizam a ordem do trabalho e assim definir a prioridade

dos problemas e atividades. Dessa forma, foram estabelecidos os três parâmetros e seus ganhos, para o cálculo de criticidade por equipamento.

O primeiro parâmetro, gravidade, foi definido com base no impacto ocasionado pela indisponibilidade do equipamento. Assim, conforme a Tabela 11, os equipamentos de maior impacto se classificam como nível A, os de médio impacto como nível B e os de impacto local como nível C.

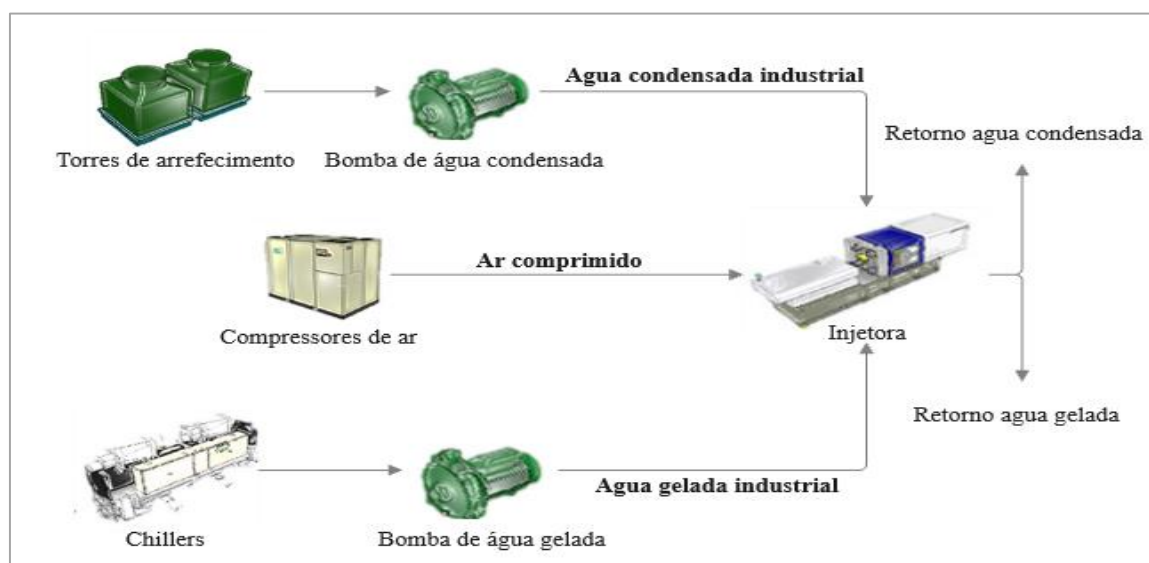
Tabela 11: Definição de níveis de gravidade da matriz de priorização

Criticidade	Ganho	Equipamentos	Impacto
A	3	Exaustores, Compressores, Bombas Industriais	Múltiplos outros equipamentos
B	2	Injetoras de botas	No equipamento, porém com poucos sobressalentes
C	1	Injetoras expandido	No equipamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a Tabela 11, os equipamentos que representam um ganho de 3 pontos, ou seja, os de maior impacto, são equipamentos responsáveis por processos globais de fábrica. Conforme citado, os sistemas de utilidades: ar comprimido, água industrial, água gelada e exaustão resumidos no esquema da Figura 30. As bombas, por exemplo, fornecem água a todo o processo, de modo que a parada não programada de uma bomba de água gelada industrial suspende o resfriamento de moldes de múltiplas injetoras ligadas na fábrica.

Figura 30: Esquema de sistemas que alimentam o processo de injeção



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, o parâmetro de urgência foi definido com base no tempo de abertura de ordens corretivas, de modo a garantir que as ordens não permanecem em carteira por um tempo elevado. Os diferentes ganhos são dispostos na Tabela 12.

Tabela 12: Definição de níveis de urgência da matriz GUT

Ganho - Tempo de Abertura	Intervalo (mês)
1	$T \leq 3$
1,5	$3 \leq T \leq 6$
2	$T \geq 6$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por último, foram definidos os valores de ganho para o parâmetro de severidade da avaria diagnosticada. A severidade é definida pela iminência de ocorrência de uma falha, de modo que os níveis desses parâmetros foram estabelecidos com base nos dados disponíveis de histórico dos equipamentos. Deve-se destacar que, eram feitas recomendações de manutenção para os laudos CRÍTICO e PERIGO, porém devido ao elevado número de motores nesses dois *status*, fez-se necessário dividir os ganhos de severidade em quatro níveis: perigo iminente, perigo, crítico iminente e crítico, conforme a Tabela 13 que é apresentada a seguir.

Tabela 13: Definição de níveis de tendência da matriz GUT

Ganho Severidade	SATUS
10	Perigo Iminente
7	Perigo
4	Crítico Iminente
1	Crítico

Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que esses níveis foram adotados apenas para classificação de criticidade em relação ao processo. A severidade dos diagnósticos emitidos em laudos baseia-se nos limites estabelecidos pelo método preditivo.

4.3 Desenvolvimento do Plano de Manutenção Preditiva

Com base em *benchmark*, método de pesquisa de mercado que busca as melhores práticas de empresas referência em um determinado assunto, e nas referências disponíveis na literatura introduzidas nos capítulos 2 e 3 deste trabalho, foram estabelecidos os métodos que

fariam parte da estratégia de gestão da manutenção. Assim, o novo plano de manutenção previsto para o ano de 2023, exposto na Tabela 14 a seguir, definia a implementação dos seguintes métodos preditivos:

Tabela 14: Plano de manutenção preditiva de motores

Método Preditivo	Periodicidade	Criticidade	Tipo de falha investigada
Ensaios de resistência de isolamento	Semestral	A	Elétrica
	Anual	B e C	
Análise de circuitos de motores	Semestral	A	Elétrica e Mecânica
	Anual	B e C	
Análise de vibração	Mensal	A	Mecânica
	Bimestral	B e C	
Coleta de temperatura	Mensal	A	Elétrica e Mecânica
	Bimestral	B e C	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para implementação de cada uma das técnicas de predição definidas apresentadas no plano da Tabela 14, e aprimoramento das práticas anteriores, a equipe que constituía a célula de confiabilidade foi ampliada e treinada para as funções de coleta e análise de dados. O corpo técnico passou a ser constituído por um engenheiro de confiabilidade, uma planejadora e três técnicos de manutenção preditiva.

Para cada plano sistemático de manutenção, foi cadastrado em sistema um plano de 52 semanas, que é o formato de planejamento de manutenção durante um ano, gerado e acompanhado via sistema de gestão pelo setor de planejamento e controle da manutenção.

Cada plano possuía uma ficha método a ser seguida, com o roteiro sistemático por identificação de equipamento, onde o técnico apontava as horas dedicadas à coleta e alimentação de banco de dados dos ensaios.

A execução dos métodos foi padronizada, com base nos estudos e normas de referência vistos em *3.3 Métodos de predição de falha em motores elétricos*, e documentada em um Procedimento Operacional Padrão – POP, documento popularmente utilizado na indústria, que define todas as diretrizes a serem seguidas para a correta e segura execução de um processo.

Os dados obtidos a cada plano executado eram analisados, compilados e divulgados em um boletim de confiabilidade às respectivas supervisões e lideranças das áreas contempladas, a fim de nortear tomadas de decisão com base em análise de dados.

No caso de situações de falhas potenciais, as áreas recebiam um laudo logo após a rota de inspeção preditiva, constando o tipo de ensaio realizado, com os valores de referência, os riscos de falhas e as orientações de ações de manutenção corretiva com um prazo limite de execução, estipulado pelo parâmetro de severidade visto anteriormente. A saber, um modelo de laudo técnico pode ser consultado no anexo A deste trabalho.

A partir do índice de priorização obtido a cada semana, o PCM programava a execução das manutenções na oficina de motores e alinhava com as áreas a data programada para envio dos motores. Conforme visto, os impactos de cada equipamento no processo, a programação semanal só era divulgada após o alinhamento com as áreas, de forma que estas pudessem também se programar para substituir o motor e enviá-lo sem prejuízos à produção.

Os motores recebidos pela oficina passavam por manutenção conforme a orientação do laudo diagnóstico e, após a manutenção corretiva, um novo ensaio era realizado para verificar se o motor estava apto para retornar ao processo.

Os serviços realizados incluíam as seguintes etapas: desmonte do motor, limpeza interna e externa com desengraxante, limpeza do bobinado com detergente dielétrico, secagem em estufa em temperatura controlada para garantia de total desumidificação, banho de verniz em máquina impregnadora a vácuo, secagem em temperatura controlada para garantia de impregnação da camada isolante, lubrificação de rolamentos, montagem do motor e ensaio de validação para nova classificação do motor e liberação para operação.

A validação da manutenção corretiva levava em consideração o parâmetro de análise do Perfil de Resistência de Isolamento. Dessa forma, era possível garantir a mudança de classificação do motor, saindo do estado de falha potencial definida em laudo como contaminação, umidade ou a combinação dos dois sintomas para o estado sem sintomas de falha, ou seja, classificado como normal. Um exemplo do formulário de validação das manutenções realizadas pode ser consultado no anexo B deste trabalho.

Além dos ensaios periódicos, a estratégia em execução, fundamentada nos princípios de confiabilidade, passou a ensaiar os motores que apresentassem anormalidades pontuais por meio da abertura de chamados, o que aumentou a eficácia das ações de manutenções corretivas com base em orientações especializadas e permitiu um maior controle do processo. Outra ação adotada nesse sentido foi a criação de um controle de validação do serviço externo de beneficiamento de motores, onde os motores recebidos de parceiros externos passaram a retornar ao processo apenas após o ensaio para garantir a confiabilidade da manutenção executada.

Em suma, com a execução e acompanhamento dessas ações, a célula de confiabilidade almejava prever e diagnosticar as principais falhas de motores dos processos mais críticos do negócio, garantir a confiabilidade de execução tanto das manutenções sistemáticas de motores quanto das ações de manutenção corretiva, para que fosse possível obter a redução de custos através de métodos de controle, sendo o principal destes a implementação da oficina de motores para a realização de manutenções de forma interna.

Os detalhes adotados por cada método preditivo e os aspectos relevantes de execução serão abordados a seguir.

- ***Técnica de Análise de Vibração e Monitoramento de Temperatura***

As falhas de origem mecânica são as falhas com maior índice de ocorrências em máquinas girantes, conforme discutido no tópico de *3.2 Falhas em motores* elétricos. Assim, um fator determinante para consolidar uma estratégia de confiabilidade dos motores foi a implementação de uma técnica preditiva que conseguisse prever e diagnosticar falhas mecânicas.

Conforme o histórico, as causas de paradas de motores estavam em sua maioria relacionadas à queima sem aparentes avarias nos sistemas mecânicos. Assim, o índice de falhas mecânicas não apresentava valores preocupantes. Nesse sentido, a implementação da técnica de Análise de Vibração foi definida por ser o modelo de detecção e diagnóstico de falhas mecânicas mais abrangente e mais utilizado no mercado. Na grande maioria das indústrias modelo, que aplicam essa técnica, a aferição da temperatura dos mancais é realizada em conjunto com a análise de vibração, pois grande parte das falhas em rolamentos, principal componente afetado por falhas mecânicas, refletem em aumento da temperatura dos mancais.

Assim, com base nas melhores práticas, as técnicas de análise de vibração e de monitoramento de temperatura foram realizadas de forma mensal para motores de criticidade A e bimestral para motores de criticidade B e C. Os instrumentos de coleta de dados utilizados nesse plano foram: o sensor de vibração e um analisador de vibração, mostrados na Figura 31.

Com base na literatura, os parâmetros definidos para coleta e análise de dados foram: Valor Global de Vibração e Envelope de Aceleração. A análise espectral era realizada ao passo que se observavam variações bruscas nos valores globais, envelope ou temperatura ao longo do tempo.

Figura 31: Instrumentos de coleta de dados de Análise de Vibração



Fonte: a. SKF (2024); b. FLUKE (2024).

- **Técnica de Ensaio de Resistência de Isolamento**

O ensaio de resistência de isolamento, que antes se baseava nos parâmetros RI e IP, implementou a análise do Perfil de Resistência de Isolação. Dessa forma, as análises de diagnóstico passaram a identificar padrões de causas de falhas. Com base no contexto apresentado, para verificação do estado da isolação do estator dos motores elétricos para a carcaça, bem como o nível de contaminação do bobinado, foram adotados os seguintes valores limites para os parâmetros RI e IP expostos na Tabela 15, e a análise de PRI.

Tabela 15: Valores de referência para resistência de isolamento

PARÂMETRO	STATUS			
	NORMAL	ALERTA	CRÍTICO	PERIGO
RI _{1min}	≥ 100 MΩ	< 100 MΩ	< 20 MΩ	< 5 MΩ
IP	≥ 2,0	< 2,0	< 1,5	< 1,0
PRI	Interpretativo			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda, no sentido de cobrir a predição de falhas elétricas, observa-se que essa técnica, apesar de mapear a grande maioria das falhas, possui limitações que podem gerar paradas de equipamentos que exigem um alto nível de confiabilidade e disponibilidade para o processo. Assim, a técnica de Análise de Circuitos de Motores passou a ser executada em conjunto com os Ensaio de Resistência de Isolação.

Importante destacar que, com base na análise dos dados, os motores eram classificados pelo ensaio com as recomendações: manutenível, rejuvenescimento ou rebobinamento. Manutenível refere-se aos motores sem indicativo de falhas em enrolamentos ou aqueles onde as atipicidades observadas não carecem de ação imediata. Rebobinamento refere-se aos motores com indicativo de envelhecimento severo ou curto-circuito nos enrolamentos. Já o rejuvenescimento refere-se a motores com indicativo de umidade, contaminação ou envelhecimento moderado. É importante ressaltar que, na estratégia antiga, todos os motores reprovados nos ensaios receberiam a orientação de rebobinamento. Entretanto, a nova estratégia possibilitava o rejuvenescimento destes enrolamentos na oficina de motores interna.

- ***Técnica de Análise de Circuitos de Motores***

Implementada por sua capacidade de prever tendências de falhas em enrolamentos, a técnica de Análise de Circuito de Motores foi realizada de forma semestral para motores de criticidade A e bimestral para motores de criticidade B e C. A coleta de dados do método preditivo de Análise de Circuitos de motores foi realizada com o instrumento Motor Genie™, conforme a Figura 32.

Figura 32: Instrumento de coleta de dados de Análise de Circuitos de Motores



Fonte: ALLTESTPRO, (2024).

Os valores limites para cada tipo de parâmetro do método são definidos conforme o manual do fabricante do equipamento. Assim, na Tabela 16 a seguir, estão dispostos os valores críticos e esperados ao realizar o procedimento.

Tabela 16: Valores de referência dos parâmetros obtidos com o Motor Genie (MCA)

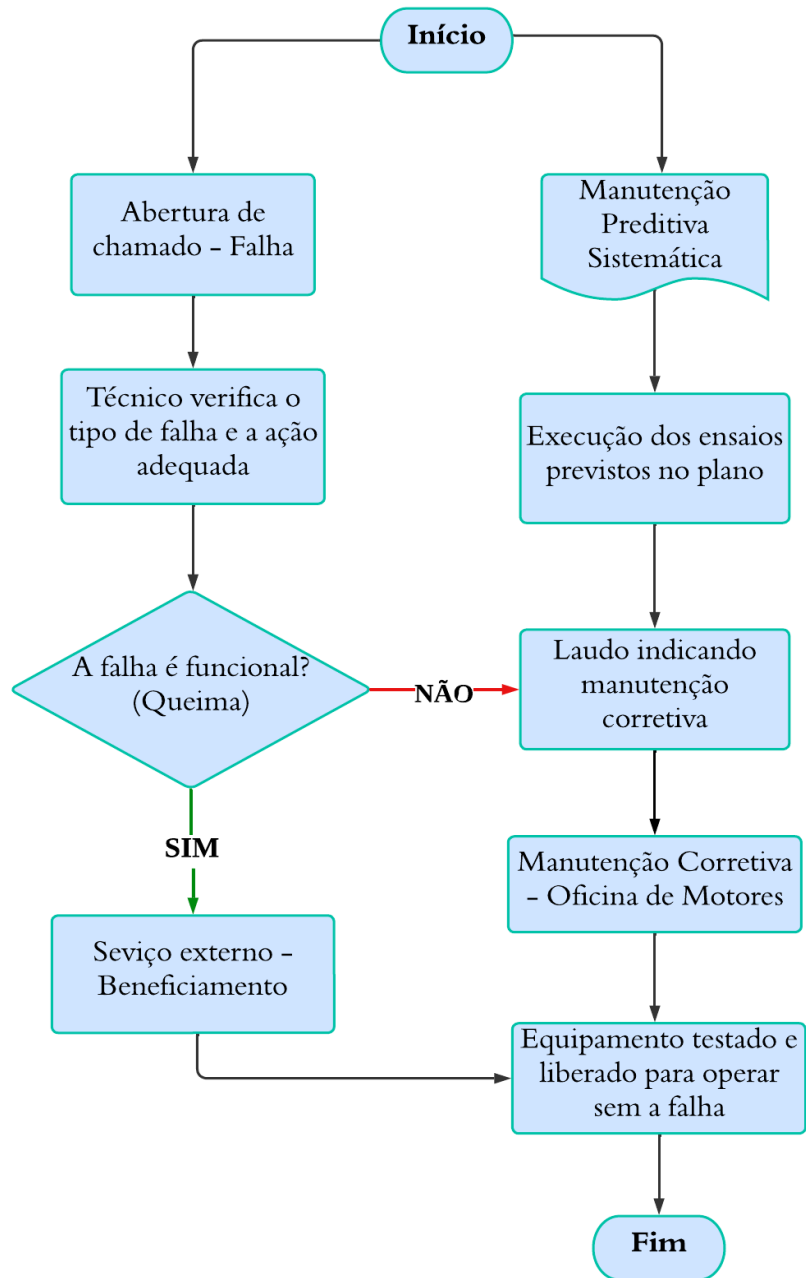
PARÂMETRO	VARIAÇÃO	INDICADOR	FAIXA DE VALORES
Resistência	< 3 %	Maus contatos	$0,1 < R < 250 \Omega$
Impedância	-	Degradação	$1 < Z < 999 \Omega$
Ângulo de Fase	+/- 1 unidade	Curto-circuito	$15^\circ < \varphi < 90^\circ$
Corrente/Frequência	+/- 2 unidades	Curto-circuito	$-50 < I/f < -15$
Balanceamento de fase	< 3 %	Desbalanceamento	0 – 5 %
Resistência de Isolação	5 (M Ω)	Degradação	$0 < RI < 500 M\Omega$

Fonte: Manual do usuário e suporte diagnóstico, Motor Genie™ (2019, com adaptações).

Em casos de ensaios com diagnóstico de curto-circuito, baseados em um desbalanceamento do ângulo de fase (φ) e/ou da relação entre frequência e corrente (i/f), recomendava, quando cabível, a substituição do motor por sobressalente, de modo que a falha não viesse a interromper o processo produtivo.

Diante da metodologia apresentada, o esquema da Figura 33 demonstra o fluxo das ações que foram desenvolvidas. Adiante, os resultados obtidos com etapas detalhadas neste capítulo serão apresentados.

Figura 33: Fluxo de ações da rotina de manutenção preditiva



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como explanado no capítulo anterior, o plano de gestão da manutenção dos motores elétricos desenvolvido contou com a implementação de planos de inspeções de vibrações mecânicas, acompanhamento de temperaturas, melhoria dos procedimentos de ensaios elétricos e a revisão das condições básicas de operação dos motores. No entanto, a motivação do estudo partiu da necessidade de reduzir os custos atrelados à queima de motores elétricos, sendo essas causadas, em grande parte, por falhas de origem elétrica. Assim, neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos com a adoção da estratégia como um todo, mas dando enfoque no aspecto que resultou no maior ganho: a nova metodologia de ensaios elétricos e a manutenção baseada na condição.

Os dados obtidos para os testes de análise de vibração e temperatura demonstraram um cenário estável, no entanto, com a rota de ensaios elétricos, foram observadas irregularidades quanto às práticas de lubrificação dos motores e acondicionamento dos motores. Ao longo do ano de 2023, foram realizados 315 ensaios de motores elétricos, sendo 240 ensaios compondo o plano de manutenção preditiva e 65 ensaios para validar ações corretivas.

A aplicação da primeira leva de ensaios em todos os motores da planta resultou nos dados dispostos na Tabela 17.

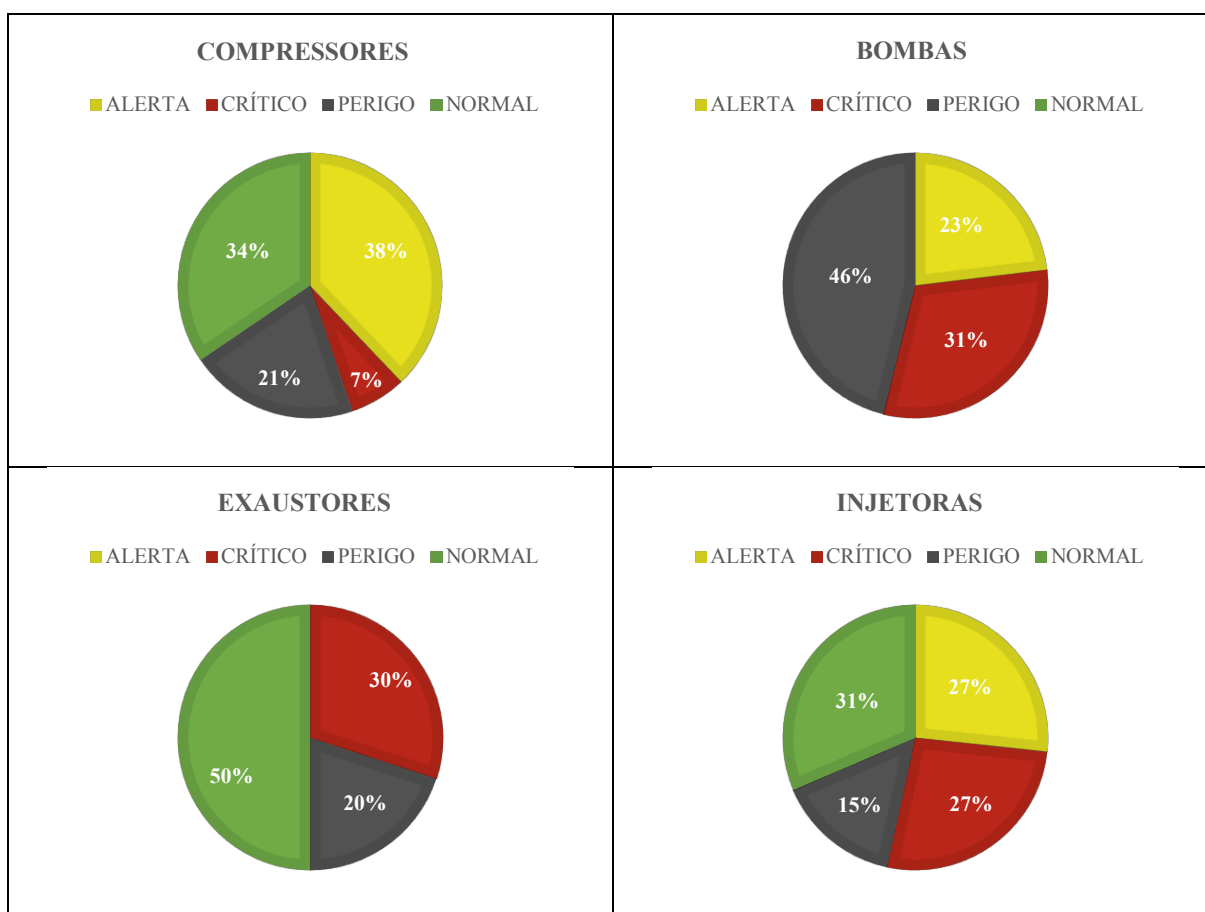
Tabela 17: Classificação do equipamento com base nos critérios de severidade

EQUIPAMENTO	STATUS DOS ENSAIOS				TOTAL GERAL
	ALERTA	CRÍTICO	NORMAL	PERIGO	
BOMBAS	3	4	0	2	9
COMPRESSORES	11	2	10	6	29
EXAUSTORES	0	6	4	1	11
INJETORAS	51	51	60	29	191
Total Geral	65	63	74	38	240

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os motores dos diferentes equipamentos apresentam características inerentes aos seus locais de instalação ou à sua condição operacional. Assim, para fins de visualização por área, o Gráfico 17 a seguir, dispõe da classificação individual nos gráficos da cada sistema com os percentuais por categoria de equipamento, onde pode-se verificar que todas as quatro classes apresentam ao menos metade dos motores ensaiados foram reprovados, com destaque negativo para os motores de bombas, que não obtiveram nenhuma aprovação, e positivo para os exaustores, que apresentaram o maior índice de motores aprovados, com 50 %.

Gráfico 17: Visualização gráfica dos percentuais de classificação por sistema

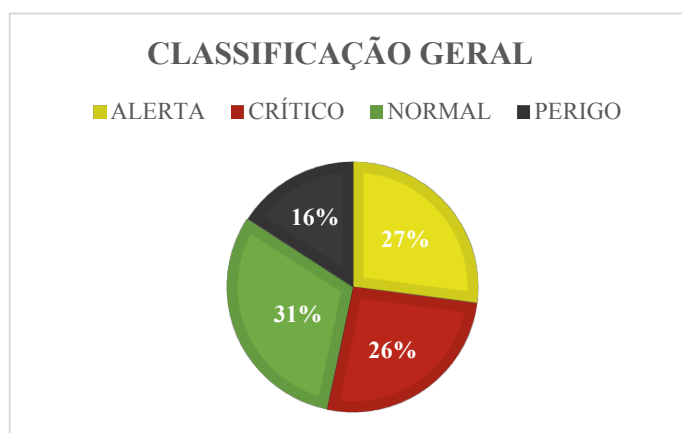


a. Sistema de ar comprimido; b. Sistema de bombeamento; c. Sistema de exaustão; d. Sistema de injeção.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O cenário geral é exibido no Gráfico 18, destacando a condição instável em que os motores se encontravam, onde cerca de 42% dos equipamentos apresentavam falha potencial.

Gráfico 18: Classificação geral dos motores do parque fabril



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, para tratar as falhas apontadas, diferentes recomendações de manutenção corretiva foram feitas, sempre baseadas na condição dos ativos. Para fins de análise, na Tabela 18 estão dispostos os quantitativos de ensaios realizados no plano sistemático, bem como as recomendações de corretiva.

Tabela 18: Resultados da aplicação do plano de ensaios, primeira medição

EQUIPAMENTO	RECOMENDAÇÃO			TOTAL
	MANUTENÍVEL	REBOBINAMENTO	REJUVENESCIMENTO	
BOMBAS	3	1	5	9
COMPRESSORES	21	1	7	29
EXAUSTORES	4	0	7	11
INJETORAS	111	2	78	191
TOTAL	139	4	97	240

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme os dados apresentados na Tabela 18 e os conceitos difundidos previamente, nota-se que, de 240 motores ensaiados, 139 estavam em condições de operar e sem apresentar indicativos relevantes de falhas. Por outro lado, foram diagnosticados 4 motores com falha funcional, onde o enrolamento não possuía mais condições de uso. Além disso, para os 97 restantes previa-se a manutenção corretiva interna para recuperação dos enrolamentos. Outro dado importante observado foi a perspectiva quanto ao nível de confiabilidade dos sistemas críticos. Dos 49 motores das áreas críticas mapeadas, 20 apresentaram necessidade de intervenção, evidenciando a necessidade de urgência de ações para reestabelecer a operação desses equipamentos, evitando riscos de parada.

Os motores identificados com necessidade de intervenção externa foram encaminhados para manutenção de forma emergencial. Já para os motores mapeados para correção interna, foi seguida a matriz de priorização, buscando atuar com base na condição, mas garantindo que os processos críticos tivessem prioridade. Desta forma, um exemplo da matriz de priorização de uma semana selecionada aleatoriamente é mostrado na Tabela 19 para fins demonstração.

Tabela 19: Tabela de cálculo do índice de priorização – Modelo de uma semana aleatória

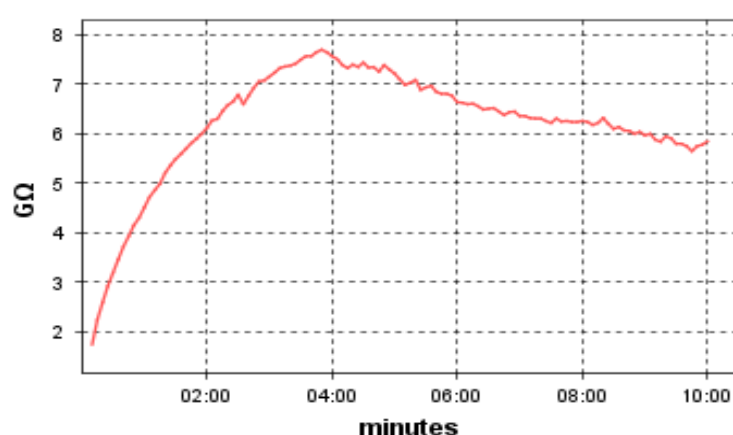
ÍNDICE DE PRIORIZAÇÃO	EQUIPAMENTO	STATUS	GANHO TEMPO	ME
45	COMPRESSORES	PERIGO	1,5	ME-0392
31,5	EXAUSTORES	PERIGO	1,5	ME-1654
28	INJETORAS	PERIGO	2	ME-1431
21	BOMBAS	CRÍTICO	1	ME-0466

Fonte: Elaborado pelo autor.

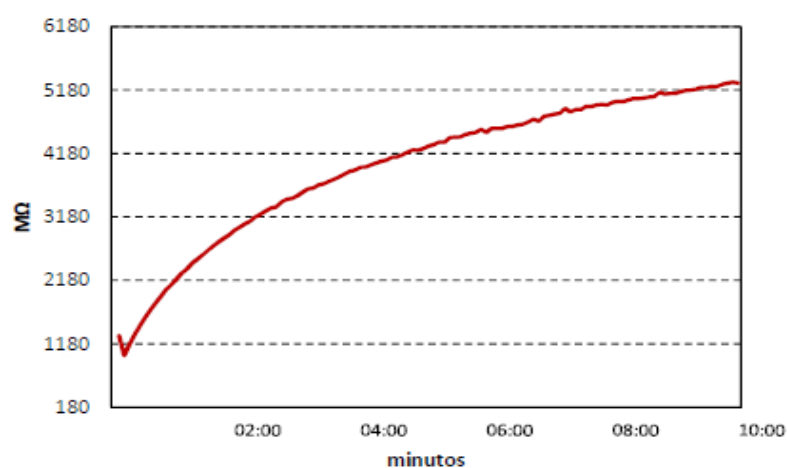
*OBS 1: A coluna ME, representa o código de identificação do motor no sistema.

Ressalta-se aqui que, durante o período de ensaios, aliados às ações corretivas realizadas na oficina de motores, muitos dos padrões utilizados como base para emitir os laudos foram comprovados de forma prática. Alguns exemplos são evidenciados a seguir, iniciando pelo Gráfico 19, onde é apresentado um comparativo dos resultados dos perfis de resistência de isolamento de um motor com características de umidade, antes e depois da manutenção realizada.

Gráfico 19: PRI de um motor com umidade antes e depois da manutenção corretiva



a. Motor após lavagem, impregnação e secagem de 2h



b. Motor após lavagem, impregnação e secagem de 4h

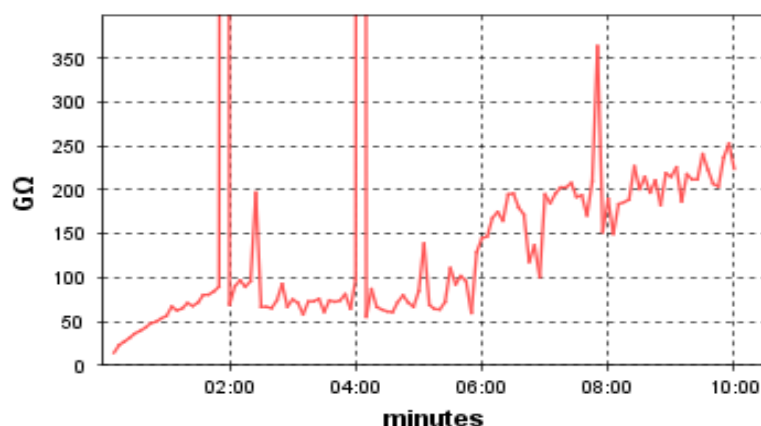
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na primeira análise do Gráfico 19-a, o motor havia passado por lavagem, secagem, impregnação com verniz dielétrico e secagem de cura do verniz na estufa por 2h, onde se obteve um valor de RI acima de 5000 MΩ, mas com um IP de 1,29 e um PRI indicando a existência de umidade no seu interior. Já no segundo momento, para o Gráfico 19-b, o motor passou por um novo ciclo de secagem em estufa, além de mais 8h de secagem natural, cenário no qual

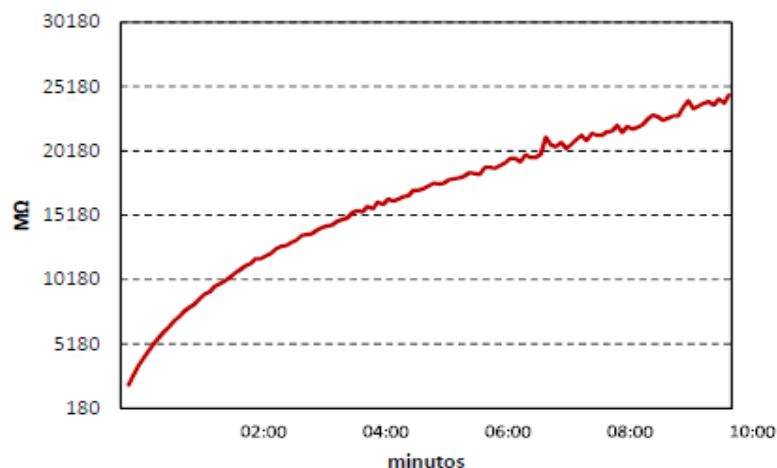
observou-se que o novo PRI aproximava-se aceitavelmente daquele estipulado na literatura, com RI ultrapassando 5000 M Ω e IP de 2,51, validando a ação corretiva.

Outro exemplo é apresentado a seguir no Gráfico 20. Neste caso, com base na literatura, o motor foi diagnosticado com falha potencial relacionada a características de contaminação no enrolamento.

Gráfico 20: PRI de um motor com contaminação antes e depois da manutenção corretiva



a. Motor após o ensaio realizado pelo plano sistemático

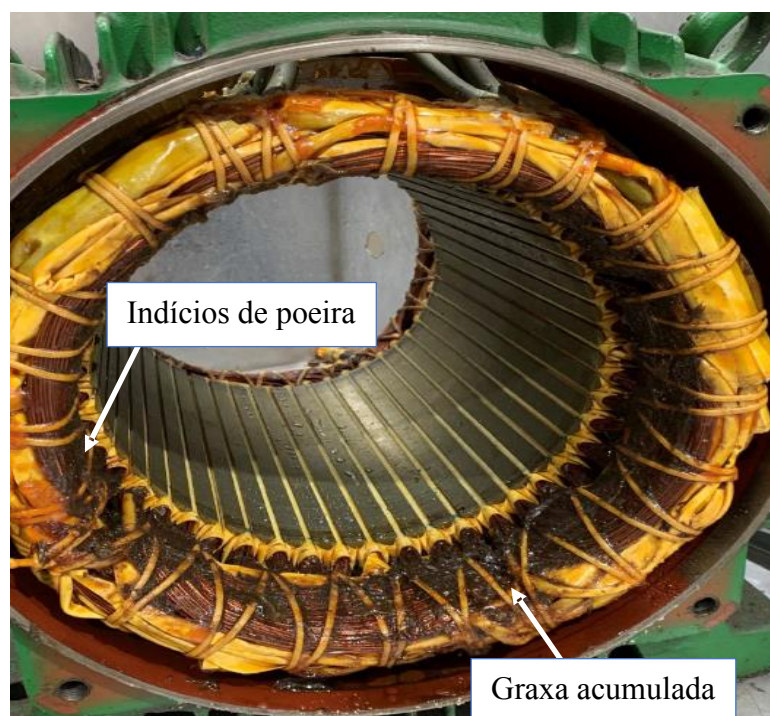


b. Motor após lavagem, impregnação e secagem

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 20-a, o motor foi ensaiado em campo, onde se obteve um valor de RI acima de 5000 M Ω após 1 minuto de ensaio e um IP de 3,96, ambos dentro dos valores de referência estipulados pela norma de referência. No entanto, com a análise do PRI, observaram-se indícios de contaminação, sendo necessária uma manutenção corretiva. De fato, durante a correção, verificou-se considerável acúmulo de graxa e poeira nos enrolamentos, conforme evidenciado pela Figura 34.

Figura 34: ME-0187 diagnosticado com características de contaminação, após aberto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na imagem, é possível observar um grande acúmulo de graxa e poeira em boa parte do bobinado. Essas substâncias encontradas comprovam o diagnóstico de contaminação. Além disso, o resultado exposto no Gráfico 20-b, atesta a eficácia da ação corretiva em reestabelecer a condição normal do ativo.

Nesse sentido, a oficina conseguiu atender durante o ano de 2023 uma média de 6 motores por mês, levando em consideração o calendário de planejamento. Na Tabela 20 é apresentado o cenário previsto e o realizado.

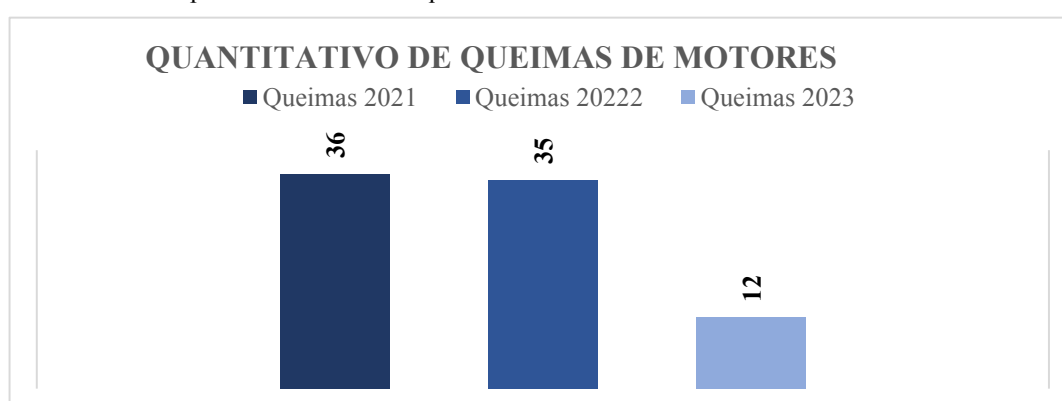
Tabela 20: Quantidade de equipamentos rejuvenescidos na oficina de motores

EQUIPAMENTO	RECOMENDAÇÃO: REJUVENESCIMENTO	MANUTENÇÃO REALIZADA
BOMBAS	5	3
COMPRESSORES	7	5
EXAUSTORES	7	4
INJETORAS	78	53
Total Geral	97	65

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, ao final do ano de 2023, foram realizadas todas as ações sistemáticas estabelecidas pelo plano de manutenção, além das ações corretivas internas em 65 motores e de ações corretivas emergenciais externas. Essas ações corretivas emergenciais consistiram em rebobinamentos de motores que foram queimados ou diagnosticados com falha irreversível. Dito isso, ressalta-se que mesmo com a adoção de todas as ações listadas nesse trabalho, ainda foram observadas queimas de motores em 2023, mas em quantidade muito inferior à observada nos anos anteriores, como é evidenciado no comparativo apresentado no Gráfico 21.

Gráfico 21: Comparativo do índice de queima de motores entre 2021 e 2023



Fonte: Elaborado pelo autor.

De fato, percebeu-se uma redução de aproximadamente 66% do índice de queimas de motores em comparação aos anos de 2022 e 2021. Além disso, conforme o Gráfico 21, no ano de 2023 ocorreram 12 queimas de motores, todas de motores de máquinas injetoras, sendo que 4 destes eram motores em fim de vida útil, que não possuíam histórico de ensaios, visto que não possuíam sobressalentes e, em anos anteriores, não era financeiramente viável a parada do processo para ensaio. Já as 8 queimas restantes estão associadas à não priorização das ações corretivas pelos critérios adotados. Com isso, a classificação de motores de acordo com os laudos dos ensaios elétricos ao fim do ano de 2023 é mostrada na Tabela 21.

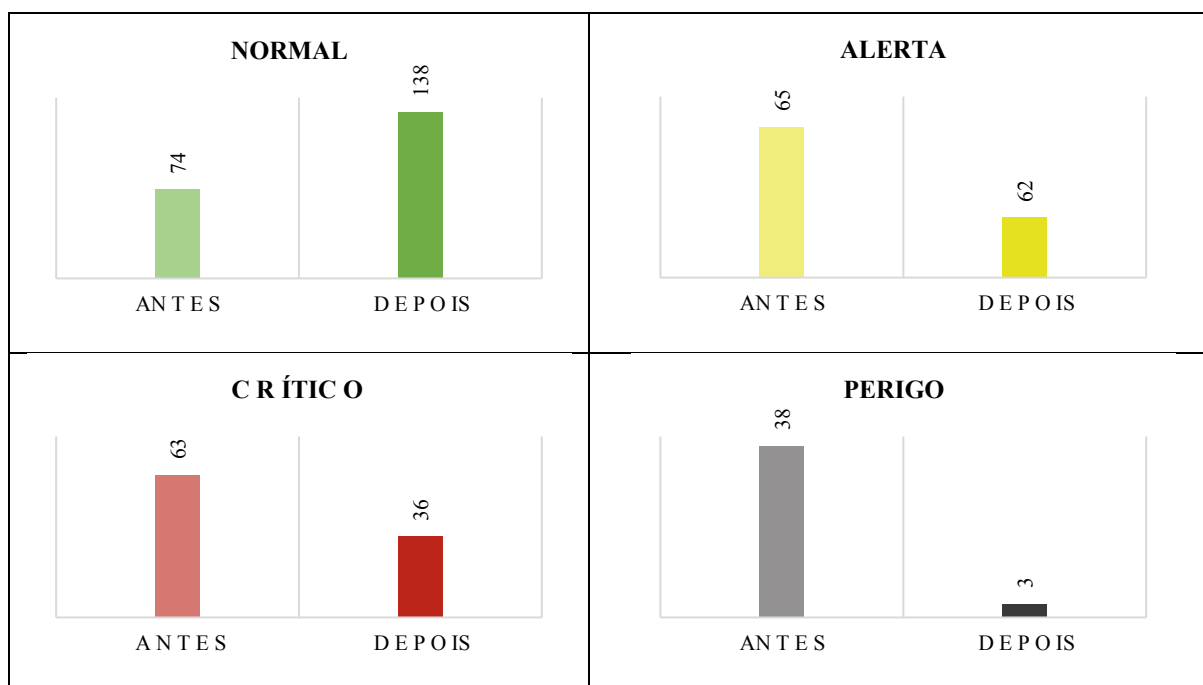
Tabela 21: Classificação dos motores, pós ações recomendadas

EQUIPAMENTO	CLASSIFICAÇÃO				TOTAL GERAL
	ALERTA	CRÍTICO	NORMAL	PERIGO	
BOMBAS	3	2	4	0	9
COMPRESSORES	11	2	15	1	29
EXAUSTORES	0	3	7	1	11
INJETORAS	48	29	112	1	190
Total Geral	62	36	138	3	239

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ademais, destaca-se a redução do número de motores com falhas potenciais, fato evidenciado pelo comparativo exposto no Gráfico 22 a seguir.

Gráfico 22: Classificação geral dos motores ao final de 2023



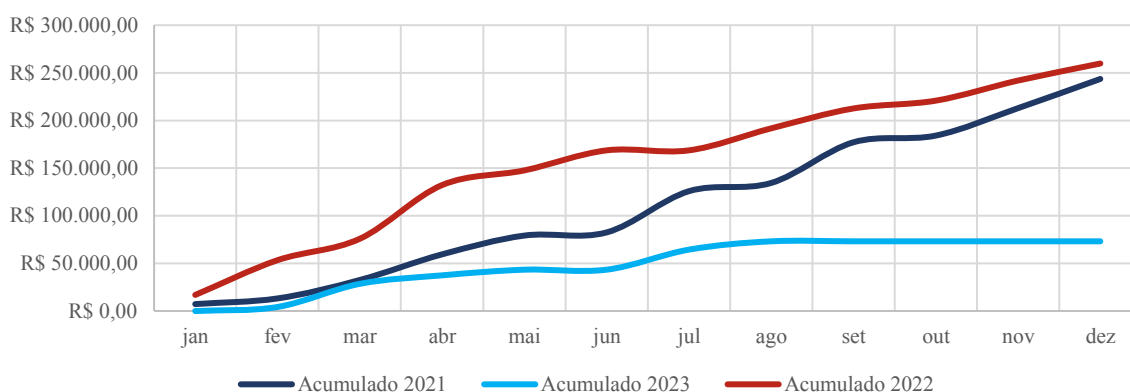
Fonte: Elaborado pelo autor.

Deste modo, verificou-se que 138 motores não apresentavam falhas funcionais ao fim de 2023, valor correspondente a 57% do total de motores, representando um aumento de 26% na quantidade de motores diagnosticados como normais no início do ano. Além disso, ao considerar todos os motores manuteníveis, ou seja, aqueles com diagnóstico Normal e Alerta no Gráfico 22, o valor chega a 200, ou 84 % do total. Finalmente, destaca-se a grande redução no número de motores diagnosticados como Perigo, que, aliados à análise de redução de queimas do Gráfico 21, reforçam a eficácia das ações realizadas.

Então, como esperado, a redução no número de queimas de motores resultou em uma forte redução de custos com corretivas externas emergenciais. Isso fica evidente no Gráfico 23, onde são comparados os valores associados às despesas com manutenção de rebobinamento nos anos anteriores com o ano de execução das ações do plano.

Desta forma, constatou-se que a redução com corretivas emergências entre 2022 e 2023 foi de aproximadamente 187 mil reais conforme o Gráfico 23, o que equivale a uma redução em 74%, resultado das ações de manutenção realizadas na oficina de motores.

Gráfico 23: Acumulado de custos com rebobinamento de motores ao longo dos anos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ademais, tendo em vista que as manutenções realizadas na oficina de motores também tiveram custos e que a implementação da nova metodologia demandou custos operacionais, o estratificado desses valores é apresentado na Tabela 22.

Tabela 22: Estratificação dos custos de manutenções realizadas na oficina de motores

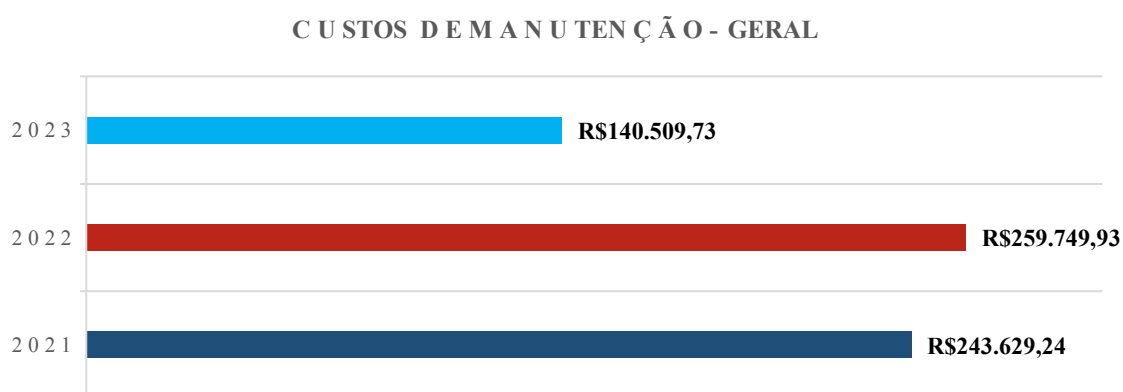
MATERIAL	HH CORRETIVAS	HH SISTEMÁTICAS	TOTAL GERAL
R\$ 26.224,14	R\$ 12.417,15	R\$ 2.979,82	R\$ 41.621,11

Fonte: Elaborado pelo autor.

OBS: HH – homem hora

Dito isso, o Gráfico 24 apresenta o comparativo dos custos ano a ano, agora considerando os valores praticados com as corretivas emergenciais externas, as corretivas planejadas internas e a aplicação da metodologia em 2023.

Gráfico 24: Comparativo de custos de manutenção – geral



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por tanto, os gastos gerais de manutenção do ano de 2023 totalizaram aproximadamente R\$ 140.500, obtendo ainda um resultado notoriamente positivo com relação aos anos anteriores. A economia geral obtida foi de aproximadamente R\$ 119.000 entre 2022 e 2023.

Adicionalmente, objetificando a melhoria contínua do processo, para casos de queima de motores, foi estabelecido um *checklist* pós-queima, para que as características após a falha fossem coletadas para investigação. Com esse controle estabelecido, todas as queimas foram mapeadas. Assim, a Tabela 23 mostra a incidência das causas das falhas diagnosticados em 2023.

Tabela 23: Mapeamento dos modos de falhas de queimas de motores

RÓTULOS DE LINHA	CONTAGEM DE ID MOTOR
Falta de Fase	2
Inconclusivo	2
Sobrecarga	3
Falha Rolamento	1
Falha Acionamento	1
Falha Isolação	3
Total Geral	12

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dessas falhas desencadeou algumas ações ainda em 2023. A saber, devido à ocorrência de queimas relacionadas à operação do motor sem uma das fases, ocasionada pela atuação de fusível de proteção, passou-se a incluir no arranjo de proteção dos motores o relé conhecido como falta de fase. Observa-se que sobrecarga e falha no isolamento são os modos de falhas que compõem metade das queimas ocasionadas. Também, devido à incidência de falha de rolamento e à elevada incidência de motores com alto nível de contaminação por graxa relacionadas à lubrificação exagerada dos rolamentos dos motores, foi realizada a revisão do plano de lubrificação dos motores, passando a utilizar a graxa recomendada pelo fabricante na periodicidade correta, reduzindo os custos com lubrificante e otimizando a alocação dos profissionais responsáveis pela tarefa de lubrificação.

Deste modo, diante dos resultados apresentados, concluiu-se que a estratégia de implementação de todas as ações descritas anteriormente conseguiu obter resultados bastante satisfatórios, tanto do ponto de vista de confiabilidade e disponibilidade dos motores para o processo, quanto da perspectiva de custos de manutenção com um todo, que apresentou uma

redução significativamente elevada. Ademais, o ganho em identidade do setor de manutenção também se mostrou como resultado desse plano. Conforme apresentado em todo o referencial, o projeto ganhou notoriedade sendo apresentado à direção industrial, posicionando o setor de manutenção da indústria em estudo como setor estratégico para o negócio.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve suas motivações iniciais ligadas à necessidade de redução de custos com a manutenção de motores elétricos em uma indústria de grande porte do ramo calçadista. Este objetivo já era almejado pela gerência de manutenção da organização há alguns anos, sendo adotadas uma série de práticas ao longo dos anos, mas sem caracterizar um plano abrangente de gestão, seja por deficiência técnica ou impossibilidade do setor de demonstrar para a organização que ações estruturadas precisavam ser adotadas. Deste modo, o estudo de caso deste trabalho se propôs a mostrar como a manutenção industrial, a partir de uma construção histórica, pode ser vista de forma estratégica pelos demais seguimentos da indústria.

Nesse sentido, buscou-se referências na literatura que mostravam diversos modelos de gestão aplicadas à rotina de manutenção e que apresentavam impacto direto na capacidade de produção da organização, bem como na qualidade do que é produzido. Além disso, tecnicamente também foram realizadas muitas melhorias ao modelo de processo existente, ampliando a capacidade de detecção de falhas elétricas a partir dos ensaios de MCA e Resistência de Isolação com análise dos perfis de resistência, a implantação de análises de vibrações mecânicas e o monitoramento de temperatura. Destaca-se também a criação de boletins para divulgação dos resultados alcançados à medida que a estratégia era implantada, buscando sempre traduzir os resultados técnicos obtidos em termos financeiros, a fim de transmitir a ideia da manutenção como função estratégica para o negócio.

Ademais, destaca-se que a implantação da oficina de motores elétricos na indústria em estudo foi um importante marco para o sucesso da estratégia proposta, visto que, a partir das observações realizadas durante as ações de rejuvenescimento, foi possível comprovar muitos conceitos propostos na literatura, sendo possível definir limiares, criando matrizes de priorização e identificando causas raízes de falhas. Com isso, a partir do controle, acompanhamento e tomada de ações baseadas em dados e nos interesses gerais da organização, obteve-se a redução de 46% dos custos de manutenção de 2023 com relação a 2022. Além do impacto financeiro, deve-se destacar também a redução de 66% no total de queimas de motores, o que representa um impacto direto na disponibilidade dos ativos.

Destaca-se ainda, a ênfase dada à melhoria contínua do processo, sendo realizadas análises das falhas ocorridas durante 2023, que resultaram na utilização de novos dispositivos de proteção dos motores, como os relés falta de fase, e na revisão do plano de lubrificação dos rolamentos de motores elétricos, eliminando o principal gerador de contaminação dos motores analisados.

Por fim, vale ressaltar que os retornos financeiros obtidos são um demonstrativo da eficácia das ações implementadas e demonstram que a adequação do modelo de gestão de manutenção ao cenário implica nesse resultado, conforme o comparativo entre 2022, onde os métodos preditivos já estavam implementados, e 2023 após novo plano de gestão. Dessa forma, um projeto de redução de custos detalhado deve levar em consideração fatores como custos indiretos, custos relacionados à linha de produção, custos para mantimento dos planos, bem como custos relacionados à energia elétrica tendo em vista que motores beneficiados possuem seu rendimento afetado influenciando no consumo. Como sugestão, para um trabalho mais robusto, seria a utilização de ferramentas de engenharia econômica e indicadores de controle financeiro como *pay back*, valor presente líquido e taxa interna de retorno.

REFERÊNCIAS

- ABC DAS TORRES. **Torre de resfriamento industrial, Alpina** usada, funcionamento Alfaterm. Disponível em: <abctorres.com.br>. Acesso em: 15. jun. 24.
- ABNT. **NBR 17094 Máquinas Elétricas Girantes - Parte 1: Motores de Indução Trifásicos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.
- ABNT. **NBR 5462 Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994.
- ABNT. **NBR IEC60034-5 DE 10/2022. Máquinas elétricas girantes - Parte 5: Graus de proteção proporcionados pelo projeto completo de máquinas elétricas girantes (Código IP) – Classificação**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.
- ABRAMAN. **Planejamento e Controle da Manutenção (PCM)**. 2023. Disponível em: <<https://abramanoficial.org.br/publicacoes/noticias/planejamento-e-controle-da-manutencao-pcm>>. Acesso em: 18. jun. 2024.
- ABRAMAN. **Quem somos. Sobre a ABRAMAN**. 2024. Disponível em: <<https://abramanoficial.org.br/quem-somos/sobre-abraman>> Acesso em: 25. mar. 2024.
- AEROVILLE. **Aeroville Fôlder Comercial**. 2020. Disponível em: <<https://www.aeroville.com.br/wp-content/uploads/sites/268/2020/02/Folder-Sistema-de-Exaust%C3%A3o.pdfSistemas2>>. Acesso em: 15. jun. 24.
- ALLTESTPRO. **Beginner's Guide to Motor Testin**. 2024 Disponível em: <<https://alltestpro.com/beginners-guide-to-motor-testing/g> | ALL-TEST Pro (alltestpro.com) >. Acesso em: 16. jun. 24.
- ANTONINO-DAVIU, J.A.; QUIJANO-LOPEZ, A.; FUSTER-ROIG, V.; NEVOT, C. Case stories of induction motors fault diagnosis based on current analysis. **IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Europe**, 2016.
- AZEREDO, Geovana Carmadelli Milhomens. **Metodologia Baseada na Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) e sua aplicação em aerogeradores: um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2023.
- BALLAL, M. S.; KHAN, Z. J.; SURYAWANSHI, H. M.; SONOLIKAR, R. L. **Adaptive Neural Fuzzy Interference System for the detection of inter-turn insulation and bearing wear faults in induction motor**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 54, n. 1, 2007.
- BARAN, Leandro Roberto; FILHO, Jaime Ramos; PIECHNICKI, Ademir Stefano; PIECHNICKI, Flávio. **Transferência de Tecnologia no processo de implantação do pilar de manutenção planejada**. Revista SODEBRAS - Volume 9 nº 102 – Junho de 2014.

BARROS, B.F.; BORELLI, R.; GEDRA, R.L. **Gerenciamento de Energia**. 1ª ed., São Paulo: Érica, 2010.

BELL, R.N.; O'DONNELL, P.; SINGH, C.; WELLS, S.J. Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-21, n. 4, 853-864, 1985.

BENBOUZID, M.E.H. A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 47, n. 5, p. 984-992, 2000.

BONANOMI, A. **Electric motors: Market trends and service business**. **Power Transmission World, Milan – Italy**, 2016. Disponível em: <<http://www.powertransmissionworld.com/electric-motors/>>. Acesso em 02 mai. 2024.

BONNETT, Austin H.; SOUKUP, George C. **Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors**. Vol. 28. IEEE, 1992.

BRANCO FILHO, Gil, **A organização e o Controle da Manutenção**, Rio de Janeiro Editora Ciência Moderna Ltda, 2007.

BULGARELLI, Roberval. **Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

CARRIER. **AquaForce 30XW Chiller Carrier**. Chiller Cooling - Dubai Industrial Air conditioning. Disponível em: <factory-cooling.com>. Acesso em: 15. jun. 24.

CARVALHO, TATIANA. **Aplicações para câmeras termográficas: Inspeção de motores elétricos. Controle e Instrumentação, 2015**. Disponível em:<https://issuu.com/editora_valete/docs/ci211>. Acesso em: 27/04/2023.

CAVALCANTE, Lorena. **Ciclo PDCA**. 2023. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/conhe%C3%A7a-o-pdca-e-como-ter-resultado-com-ele-lorena-cavalcante/>> Acesso em: 06. jun. 2024.

CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. AMGH editora, 2013. SJ Chapman – 2013.

CHOW, M. **Guest editorial special section on motor fault detection and diagnosis**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. V. 47, n. 5, p. 982-983, 2000.

COETZEE, J.L. **A holistic approach to the maintenance “problem”**. Journal of Quality in Maintenance Engineering, v. 5, n. 3, p. 276-281, 1999.

DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1999.

ELETROBRÁS. **Motor elétrico**. Guia básico. Brasília: IEL/NC, 2009.

ENGEFAZ. **Inspeção termográfica em motores elétricos**. 2021. Disponível em: <<https://www.engefaz.com/inspecao-termografica-em-motores-industriais/>>. Acesso em: 01. jul. 24.

FILHO, G. B. **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

FLUKE. **Analizador de vibraciones Fluke 810**. 2024. Disponível em: <https://servipartes.com.mx/fluke-810-analizador-de-vibraciones/ke_810_-_Servipartes>. Acesso em: 16. jun. 24.

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

GREGÓRIO, G. F. P.; SILVEIRA, A. M. **Manutenção Industrial**. [S.l.]: Grupo A, 2018.

GULATI, R. **Maintenance and Reliability. Best Practices**. 2ª ed., New York: Industrial Press, 2013.

HAROUN, A.E.; DUFFUAA, S.O. Maintenance Organization. In: MOHAMED BENDAYA, M.; DUFFUAA, S. O.; RAOUF, A., KNEZEVIC, J.; AIT-KADI, D. **Handbook of Maintenance Management and Engineering**. 1ª ed. London: Springer, 2009. Cap.1, p. 3-16.

HENRIQUE, Debora Ramiro. **Manutenção centrada em confiabilidade: um estudo de caso aplicado em equipamentos de fábrica de fitas autoadesivas** Trabalho de Conclusão de Curso Graduação em Engenharia de Produção - Centro Universitário UniRitter. 2023.

IBM. **What is Fault Tree Analysis (FTA)?**. 2024. Disponível em: <<https://www.ibm.com/topics/fault-tree-analysis>> Acesso em: 20. jun. 2024.

IEEE. **Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I**. 1985. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4158071>>. Acesso em: 06. jun. 24.

INFRASPEAK. **Como funciona a Análise de Circuito de Motores (MCA)?**. 2021. Disponível em: <<https://blog.infraspeak.com/pt-br/analise-de-circuito-de-motores/>>. Acesso em: 01. jul. 2024.

INGERSOLL RAND. **Ingersoll Rand 125-220 HP/90-160kW users manual**. 2012.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 43: **Recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery**, New York, 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6754111>>. Acesso em: 15. Jun. 2024. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION 60505: **Evaluation and qualification of electrical insulation system**, Switzerland, 2011. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/2276>>. Acesso em: 20. jun. 2024. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. **Assigning machines to incomparable maintenance strategies with ELECTRE-SORT**. Omega, v. 47, p. 45-59, 2014.

KARDEC, A.; NASFIC, J. **Manutenção: função estratégica**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2019.

KEEPFY. **Rotores: o que são e como funcionam?**. 14/09/2023. Disponível em: <<https://keepfy.com/blog/o-que-sao-rotores/>>. Acesso em: 10. jun. 2024.

KOTHAMASU, R.; HUANG, S.H.; VERDUIN, W.H. System Health Monitoring and Prognostics – A Review of Current Paradigms and Practices. In: MOHAMED BENDAYA, M.; DUFFUAA, S. O.; RAOUF, A., KNEZEVIC, J.; AIT-KADI, D. **Handbook of Maintenance Management and Engineering**. 1ª ed. London: Springer, 2009. Cap. 14, p. 337-362.

LAMIM FILHO, P.C.M.; PEDERIVA, R.; BRITO, J.N. **Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis**. Mechanical System and Signal Processing, v. 42, p. 377-387, 2014.

LEME, Murilo Oliveira. **Metodologia de manutenção preditiva para motores elétricos baseada em monitoramento e variáveis físicas e análise multicritério**. 2017. Tese (Doutorado) - Engenharia de Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.

LIZMAYER, Eduardo. **O panorama e a evolução do processo de manutenção industrial na década 2000-2011**. ProfissionalTech. 2015.

LOISELLE, R.; XU, Z.; VOLOH, I. Essential motor health monitoring. **IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference**, p. 1-5, 2015.

LUMOBRAS. **Graxa para motor elétrico**. 2024. Disponível em: <<https://www.lumobras.com.br/rolamento/graxa-para-motor-eletrico/>>. Acesso em: 29. jun. 24.

MAISPOLIMEROS. **Modelo de injetoras de calçados**. 2019. Disponível em: <<https://maispolimeros.com.br/2019/07/08/injetora-de-plastico/>>. Acesso em: 15. jun. 24.

MARÇAL, Rui F. M. **Um método para detectar falhas incipientes em Máquinas Rotativas baseado em Análise de Vibrações e Lógica Fuzzy**. 2000. 124 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, de Minas e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

MARINELLI, Igor. **Entenda o que é a curva PF**. Revista Manutenção. 2022.

MATTEDE, Henrique. **Tipos de motores elétricos, quais são?** 2014. 3 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Senai, Belo Horizonte, 2014. Cap. 1. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/quem-e-henrique-mattede/>. Acesso em: 02. mai. 2024.

MERITO COMERCIAL. **Bomba Centrifuga Ksb Megabloc 100-065-125 3cv Trifásico 220/380/440v**. Disponível em: <meritocomercial.com.br>. Acesso em: 15. jun. 24.

MORTELARI, D.; SIQUEIRA, K.; PIZZATI, N. **O RCM na quarta geração da manutenção – A moderna gestão de ativos**. 3. ed. – São Paulo: RG Editores, 2019.

MOUBRAY, Johan. **Manutenção Centrada em Confiabilidade in Reliability Centred Maintenance**. United Kingdom: AladonLtd, 2000.

MURÇA, Vitor Armando de Almeida. **Aplicação da Filosofia Lean na área da Manutenção** – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – Área Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

NARAYAN, V. **Effective Maintenance Management**. Risk and Reliability Strategies for Optimizing Performance. 2ª ed., New York: Industrial Press, 2012.

NASA. **Nasa Reliability-Centered Maintenance Guide**. National Aeronautics and Space Administration. USA, 2008.

NEPOMUCENO, L.X. **Técnicas de manutenção preditiva**. 1ª ed., São Paulo: Blucher, 2014.

OLIVEIRA, Djalma. P. R. **Planejamento estratégico: conceitos, metodologia, práticas**. 31 ed. São Paulo: Atlas, 2012.

OLIVEIRA, J. Otavio **Curso Básico de Gestão da Qualidade**, São Paulo Cengage Learning, 2014.

OLIVEIRA, Wallace. **A indústria 4.0 chegou! Você está preparado para a quarta revolução industrial?**. HEFLO. 2018.

PEREZ-GONZALEZ, PAZ & FRAMINAN, Jose M., 2014. **A common framework and taxonomy for multicriteria scheduling problems with interfering and competing jobs: Multi-agent scheduling problems**. European Journal of Operational Research. Elsevier, vol. 235(1).

PICAZO-RÓDENAS, M.J.; ROYO, R.; ANTONINO-DAVIU, J.; ROGER-FOLCH, J. Use of the infrared data for heating curve computation in induction motors: **Application to fault diagnosis**. **Engineering Failure Analysis**, v. 35, p. 178-192, 2013.

PROCEL. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**. Ano Base 2005. Classe industrial - Alta tensão. Relatório Brasil Completo. 2008.

QUEIROZ, H. E. et al. **Gestão classe mundial (GCM): um programa corporativo para garantir a melhoria contínua na gestão das operações em uma indústria de gorduras e margarinas**. Estudo de caso. Enegep. 2018.

RAMOS, Manoel João; SCHRATTNER, Ricardo. **Implantação de sistema de planejamento e controle da manutenção em uma indústria de ingredientes alimentícios**. Revista TécnicoCientífica do Crea-Pr, Marechal Cândido Rondon, v. 23, p. 1-18, mar. 2020.

ROLIM, Joel Cavalcante. **Implantação da gestão estratégica visando a melhoria de desempenho de ativos: um estudo de caso.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Belém, 2015.

SAE. JA1012 – **A Guide to Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard.** Warrendale. 2002.

SILVEIRA, C. B. **O que é indústria 4.0 e como ela vai impactar o mundo.** 2018. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/>>. Acesso em: 26. mar. 2024.

SKF. **QuickCollect sensor. Machine monitoring made easyQuick.** 2024. Disponível em: <<https://www.skf.com/in/products/condition-monitoring-systems/basic-condition-monitoring-products/vibration-measurement/quickcollect-sensorCollect sensor | SKF>>. Acesso em: 15. jun. 24.

SLACK, Nigel; et al. **Administração da produção.** 1 ed. 14 reimpr. São Paulo: Atlas, 2011.

SOUZA, Valdir Cardoso. **Organização e Gerência da Manutenção – Planejamento, Programação e Controle da Manutenção.** 3ª Ed, revisada. São Paulo: All Print, 2013.

SSMOTORES. **Imagens de serviços.** Disponível em: <<https://www.ssmotores.com.br/>>. Acesso em: 01. jul. 24.

TECH BRIEFS. **The Heat Is On: A Guide to Specifying Insulation Materials.** 2019. Disponível em: <<https://www.techbriefs.com/component/content/article/33919-the-heat-is-on-a-guide-to-specifying-insulation-materials>> Acesso em: 03. jun. 2024.

TELES, Francismilton et al. **Obstáculos e benefícios da implantação da Manutenção Produtiva Total (MPT): uma revisão de literatura** Obstacles and benefits of the implementation of Total Productive Maintenance (TPM): a literature review, 2019.

TOLIYAT, H.A.; KLIMAN, G.B. **Handbook of electric motors.** 2ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

TOTVS. **Manutenção corretiva: tipos, exemplos e quando fazer.** 2023. Disponível em: <<https://www.totvs.com/blog/gestao-para-rotas/manutencao-corretiva/>>. Acesso em: 12. ago. 2024.

TRACTIAN. **Manutenção Corretiva: O que é, custo e quando fazer.** 2024. Disponível em: <<https://tractian.com/blog/manutencao-corretiva>>. Acesso em: 09. ago. 2024.

TRACTIAN. **Monitoramento de temperatura inteligente com controle automático de sazonalidade.** 2023. Disponível em: <<https://tractian.com/blog/monitoramento-de-temperatura-inteligente-com-controle-automatico-de-sazonalidade>>. Acesso em: 05. jun. 2024.

TROJAN, F.; MORAIS, D. C. **Using ELECTRE TRI to support maintenance of water distribution networks.** *Pesquisa Operacional*. v. 32, n2, p. 423-442, 2012.

UFRN. **Motores elétricos assíncronos ligados à rede trifásica**. Disponível em: <<https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/1/58/4/3>>. Acesso em: 10. jun. 2024.

VERGARA S. C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. São Paulo: Atlas, 14ª Edição, 2013.

VIANA, Herbert. **Manual de Gestão da Manutenção**. Brasília: Engeteles, 2020.

WEG. **Catálogo de motores**. Guia de Especificação. 2017.

WEG. **Catálogo de motores**. Guia de Especificação. 2020.



WEG. **Catálogo de motores**. Guia de Especificação. 2023.

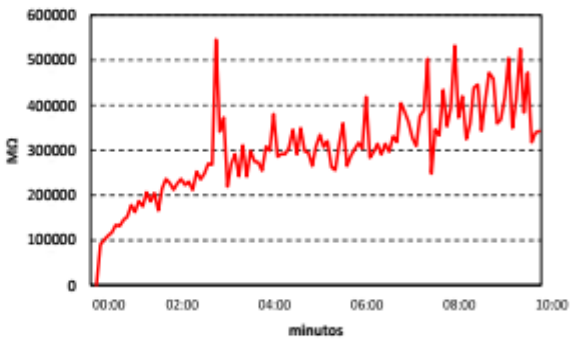
WEG. **Danos em enrolamentos de motores trifásicos**. 2019.

XAVIER, J. A. N. E DORIGO, L. C., **A importância da gestão da manutenção**, Apostila do Curso de Metodologia Moderna de Manutenção. TECEM, 2013.

ZHONGMING, Y.; BIN, W. **Review on Induction Motor Online Fault Diagnosis**. IEEE Power Electronics and Motion Control Conference, p. 1353-1358, 2000.

ANEXO A – RELATÓRIO DIAGNÓSTICO – ENSAIO DE MOTORES

Engenharia de Manutenção					
Ensaio Preditivo de Motores Elétricos					
EQUIPAMENTO:	STATUS	LOCALIZAÇÃO	ID MOTOR	RELATÓRIO	RESULTADO
S4-BACI-002	CRÍTICO	UTILIDADES	ME-0493	REL-EME-00233 	MANUTENÍVEL
RASTREABILIDADE ORDEM DE INSPEÇÃO			DADOS DE PLACA DO MOTOR		
O.S. nº:	DATA	RELATÓRIO MEGA	POTÊNCIA (cv)	FABRICANTE	APLICAÇÃO
703.897.824 	04/12/2023	1581-73	100	WEG	PRINCIPAL
T_{amb} (°C): 35,0 °C		T_{motor} (°C): 35,0 °C		UR (%): 51,0 %	

RESULTADOS ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAÇÃO					
ÍNDICES DE REFERÊNCIA					
Resistência à 1 minuto	Índice de Polarização	Índice de Contaminação			
$50M\Omega < RI \leq 100M\Omega$	$1,5 < IP < 2,0$	$0,060 < IC \leq 0,100$			
$10M\Omega < RI \leq 50M\Omega$	$1,0 < IP \leq 1,5$	$0,100 < IC \leq 0,350$			
$RI \leq 10M\Omega$	$IP \leq 1,0$	$IC \geq 0,350$			
STATUS / CORES / RECOMENDAÇÕES					
ALERTA	Equipamento deve ser monitorado				
CRÍTICO	Deve ser realizada intervenção				
PERIGO	Deve ser priorizada a intervenção				
RI_{1min} (MΩ)	145245	IP	2,36	IC	0,202

RESULTADOS MCA						
ID MOTOR	GRANDEZA	T1-T2	T1-T3	T2-T3	STATUS	
ME-0493	RESISTÊNCIA (Ω)					
	RESISTÊNCIA DE ISOLAÇÃO (MΩ)					
	IMPEDÂNCIA (Ω)	4,68	4,6	5,38	ALERTA	10,10%
	CORRENTE/FREQUÊNCIA	-35	-35	-36	BOM	1
	ÂNGULO DE FASE (°)	47°	46°	49°	RUIM	3
	BALANCEAMENTO (%)					

OBSERVAÇÕES:	MOTOR EM STATUS CONSIDERADO CRÍTICO QUANDO OBSERVADO O ÍNDICE DE CONTAMINAÇÃO, INDICADO REALIZAR A LIMPEZA DO BOBINADO COM WCLEAN.
--------------	--

Inspetor responsável:	
-----------------------	--



Fonte: Planejamento e Controle da Manutenção – Empresa, 2024.

ANEXO B – FORMULÁRIO DE MANUTENÇÃO – OFICINA DE MOTORES

Oficina de Motores Elétricos						
Ensaio Preditivo de Motores Elétricos						
Equipamento Origem	Localização	ID Motor	Relatório Entrada	Relatório Saída	Resultado	
S6-INJR-023	FÁBRICA 06	ME-0202	REL-EME-00034	REL-EMEPM-066	MANUTENÍVEL	
Rastreabilidade Ordem de Serviço			Dados de Placa do Motor			
Ordem de Serviço	Data	Relatório MEGA	Potência (cv)	Fabricante	Aplicação	
703.797.386	29/11/2023	1580-73	75	WEG	PRINCIPAL	
T _{amb} (°C):	34,0 °C	T _{motor} (°C):	34,0 °C	UR (%):	40,0 %	
RESULTADOS ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAÇÃO						
<p>PRI ANTES</p>			<p>PRI DEPOIS</p>			
ID MOTOR	ANTES DA MANUTENÇÃO			DEPOIS DA MANUTENÇÃO		
	R _{lmin} Antes (MΩ)	IP Antes	PRI Antes	R _{lmin} Depois (MΩ)	IP Depois	PRI Depois
ME-0202	145245	2,36	0,204	8476	7,09	0,043
RESULTADOS MCA						
ID MOTOR	GRANDEZA	T1-T2	T1-T3	T2-T3	STATUS	
ME-0202	RESISTÊNCIA (Ω)	0,20	0,20	0,20	BOM	0,00%
	RESISTÊNCIA DE ISOLAÇÃO (MΩ)					
	IMPEDÂNCIA (Ω)	19,6	16,8	17,5	ALERTA	9,09%
	CORRENTE/FREQUÊNCIA	-42	-42	-42	BOM	0
	ÂNGULO DE FASE (°)	69	68	68	BOM	1
	BALANCEAMENTO (%)	0	0	0	BOM	0
ENSAIO COM MOTOR A VAZIO						
CORRENTES ELÉTRICAS						
I _(N) 101	I ₍₁₋₆₎ 39		I ₍₂₋₄₎ 38		I ₍₃₋₅₎ 39	
Resultado:	BOM		BOM		BOM	
ENVELOPE DE ACELERAÇÃO						
PRÉ MANUTENÇÃO	Rolamento lado acoplado		Rolamento oposto ao lado acoplado		Resultado	
PÓS MANUTENÇÃO	Rolamento lado acoplado	0,40	Rolamento oposto ao lado acoplado	0,50	Resultado	BOM

Fonte: Planejamento e Controle da Manutenção – Empresa, 2024.

Oficina de Motores Elétricos					
Ensaio Preditivo de Motores Elétricos					
Equipamento Origem	Localização	ID Motor	Relatório Entrada	Relatório Saída	Resultado
S6-INJR-023	FÁBRICA 06	ME-0202	REL-EME-00034	REL-EMEPM-066 	MANUTENÍVEL
Rastreabilidade Ordem de Serviço			Dados de Placa do Motor		
Ordem de Serviço	Data	Relatório MEGA	Potência (cv)	Fabricante	Aplicação
703.797.386 	29/11/2023	1580-73	75	WEG	PRINCIPAL
T _{amb} (°C):	34,0 °C	T _{motor} (°C):	34,0 °C	UR (%):	40,0 %

RELATÓRIO FOTOGRÁFICO	
ANTES	DEPOIS
	

CHECKLIST DE ATIVIDADES REALIZADAS			
Atividades de Manutenção	Realizado	Atividade de Inspeção	Realizado
1. Limpeza do bobinado com Isolimp	OK	1. Ensaio de Resistência de Isolação	OK
2. Secagem em estufa com temperatura controlada	OK	2. Ensaio MCA	OK
3. Reimpregnação à vácuo	OK	3. Ensaio à vazio	OK
4. Cura em estufa com temperatura controlada	OK	4. Coleta de envelope de aceleração	OK
5. Troca de rolamento lado acoplado	OK		
6. Troca de rolamento oposto ao lado acoplado	OK		
7. Usinagem do assentamento do rol. LA	NOK		
8. Usinagem do assentamento do rol. LOA	NOK		

Observações	Motor apresentou considerável contaminação por lubrificante. Foi realizada a rotina de rejuvenescimento e os testes necessários para a liberação do motor.
-------------	--

Inspetor responsável:	
-----------------------	--

Fonte: Planejamento e Controle da Manutenção – Empresa, 2024.