



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE LAVRAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MANUTENÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS NA INDÚSTRIA

LEANDRO DE MOURA SILVA
MATHEUS HENRIQUE DA SILVA
RANGEL RODRIGO CORRÊA
WAGNER MESSIAS MARTINS

LAVRAS-MG

2024

**LEANDRO DE MOURA SILVA
MATHEUS HENRIQUE DA SILVA
RANGEL RODRIGO CORRÊA
WAGNER MESSIAS MARTINS**

MANUTENÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS NA INDÚSTRIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário de Lavras, como parte das exigências da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, curso de graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR

Prof. Me. Janilson Godinho Carvalho

CONVIDADO

Prof. Me. Evandro Pereira

PRESIDENTE DA BANCA

Prof. Dr. Isadora Cota Carvalho

LAVRAS-MG

2024

Ficha Catalográfica preparada pelo Setor de Processamento Técnico da
Biblioteca Central do UNILAVRAS

S586m Silva, Leandro de Moura.
Manutenção de motores elétricos na indústria / Leandro
Moura Silva, Matheus Henrique da Silva, Rangel Rodrigo
Corrêa, WagnerMessias Martins. – Lavras: Unilavras, 2024.

154f.: il.

Portfólio acadêmico (Graduação em Engenharia
Elétrica) –Unilavras, Lavras, 2024.

Orientador: Prof. Janílson Godinho Carvalho.

1. Manutenção. 2. Motor. 3. Elétrico. 4. Indústria. I. Silva,
MatheusHenrique da. II. Corrêia, Rangel Rodrigo. III. Martins,
Wagner Messias. IV. Carvalho, Janílson Godinho. (Orient.). V.
Título.

Centro Universitário de Lavras – UNILAVRAS


Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "**MANUTENÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS NA INDÚSTRIA**", de autoria dos graduandos Leandro De Moura Silva, Matheus Henrique Da Silva, Rangel Rodrigo Corrêa, Wagner Messias Martins, aprovado pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:



Prof. Ms. Janilson Godinho Carvalho - UNILAVRAS (Orientador)



Prof. Dr. Evandro Pereira da Silva - UNILAVRAS (Convidado)



Profa. Drª Isadora Cota Carvalho – UNILAVRAS (Presidente da Banca)

Aprovado em 23 de novembro de 2024

AGRADECIMENTOS

Ao chegar no fim deste curso, minha mente volta no passado a lembrar de onde vim e ao mesmo tempo para o futuro onde quero ir com a graça de Deus pai, vim de uma família maravilhosa, minha mãe mulher que nunca comeu o pão da preguiça, sempre nos deu conselhos da importância da educação pra se tornar um homem, um cidadão com conhecimento pra exercer sempre o meu melhor, e eu com meu irmão mais velho transmitir para os meus irmãos os ensinamentos da nossa mãe que é mãe e pai ao mesmo tempo. Depois no meu caminho Deus me abençoou com minha esposa que me levou mais fundo a Deus, e também a completar o que minha mãe tinha lá na minha infância plantado na minha mente a busca por conhecimento, minha esposa mulher virtuosa é quem pegou na minha mão e me ajudou e ajuda a chegar aqui neste momento, agradeço a Deus por ter colocado cada uma dessas pessoas e meus colegas de curso que me ajudaram na conclusão deste trabalho tão importante para trilhar meu caminho.

"Tudo que era grandioso no passado foi ridicularizado, condenado, combatido e reprimido, somente para emergir com maior poder e mais triunfante depois da luta"
"Nikola Tesla.

Leandro de Moura Silva

Agradeço a Deus por ter proporcionado a oportunidade de encarar um desafio tão grande e por ter me dado forças, mesmo nos momentos mais difíceis, para seguir em frente e chegar a essa etapa final.

Agradeço também a minha namorada Maria Eduarda que sempre esteve ao meu lado, que durante esse tempo diante de tantas mudanças me apoiou e incentivou a não desistir, me mantendo firme em todas as adversidades.

Agradeço a meu pai Geraldo e meus irmãos Pierry e Leidiane, que desde o início dessa jornada estiveram comigo e que com toda a certeza sem o incentivo deles eu não estaria chegando a essa etapa.

Agradecer a todos os colegas e professores, foram muitas lições aprendidas e que não foram apenas lições acadêmicas, foram lições para a vida, conhecimentos que nenhuma faculdade é capaz de ensinar e um agradecimento especial aos colegas que fazem parte deste trabalho, Rangel, Wagner e Leandro, que estão colaborando para que essa etapa tão difícil se torne mais leve.

E por fim um agradecimento especial ao nosso professor Janilson, que sempre buscou a melhor forma para nos ensinar, trazendo da maneira mais didática possível o conteúdo que as vezes parecia impossível de ser entendido, sem dúvidas é um grande exemplo de pessoa que pretendo seguir considerando sua história e humanidade.

Matheus Henrique da Silva

Primeiramente a Deus, por me conceder força de vontade e saúde, mesmo nos momentos difíceis, em que pensamos que não seremos capazes, a força divina sempre estará lá para dar aquele empurrãozinho para seguir em frente para concluir o meu tão sonhado objetivo.

A minha família, que pela segunda vez, me apoiou nessa caminhada, agradeço minha esposa Isabella e meus filhos Gabriel e Julia, que souberam ter paciência nos momentos em que eu precisava me dedicar aos estudos e as vezes deixando de estar com eles nas diversões.

Agradeço também aos meus professores e colegas de classe, mostrando união sempre que necessário, com incentivos, conselhos, tornando sempre o ambiente leve e agradável dentro das salas de aula, em especial ao Wagner, Matheus e Leandro, que além da parceria durante o curso, tivemos a oportunidade de trabalhar juntos nesse trabalho de conclusão de curso.

Aos meus colegas de serviço, que serviram como incentivo a retomada dos estudos, fazendo com que o trabalho se tornasse parte de meus estudos, podendo conciliar os aprendizados de sala de aula com a prática dentro da indústria, principalmente meu gestor Jose Cavalcante Junior, que foi o maior apoiador e incentivador dessa conquista.

Rangel Rodrigo Correia

Primeiramente a Deus, pois tua é, Senhor, a magnificência, e o poder, e a honra, e a vitória, e a majestade; porque teu é tudo quanto há nos céus e na terra; e tu és o meu Deus, o meu refúgio, a minha fortaleza e em ti sempre confiarei.

Agradeço a Patrícia, minha esposa sábia e espiritual, por suas orações, conselhos, afirmação, apoio, paciência e respeito durante o período da graduação e elaboração deste trabalho. Obrigado por ser minha inspiração e por sempre acreditar em mim. Este trabalho é dedicado a você.

Um agradecimento muito especial a minha querida filha, Rebeca. Sua presença ilumina os meus dias, e seu amor e compreensão foram essenciais nos momentos em que as dificuldades pareciam maiores. Obrigado por ser minha inspiração. Este trabalho é dedicado a você.

Tenho agradecimentos especiais a:

Aos meus colegas do curso de engenharia elétrica, que sempre contribuíram com discussões enriquecedoras, trocando experiências e compartilhando emoções ao longo dessa jornada.

Aos meus professores por compartilhar seus conhecimentos e experiências em toda minha jornada do curso de engenharia elétrica, e em especial ao amigo e Professor Janílson, por seu contínuo apoio e sugestões, enquanto orientador, na elaboração desta monografia. Sua expertise e conselhos foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos amigos, Leandro, Matheus e Rangel pela parceria no desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, agradeço a meus amigos e companheiros de trabalho, desde os gerentes, coordenadores e técnicos que me ajudaram de alguma forma a melhorar substancialmente a qualidade do trabalho desenvolvido, seja com palavras de incentivo ou apoio prático durante as pesquisas.

A minha gratidão a todas as pessoas que nos ajudaram a empreender este trabalho, principalmente aqueles que nos ensinaram tudo que aqui expomos.

Wagner Messias Martins

RESUMO

O presente trabalho, tem como tema principal a manutenção de motores elétricos no ambiente industrial. Com o objetivo de abordar os conceitos básicos e também as práticas de vivência em manutenção de motores na indústria. Os diferentes tipos de manutenção existentes, serão apresentados separadamente como desenvolvimento de cada aluno.

Iniciando pela manutenção corretiva, que foi o primeiro método de manutenção existente, que ficou mais evidenciado após a segunda guerra mundial, e que ainda nos dias de hoje, pode ser aplicado. Mesmo que não se deseje ter manutenção corretiva, ela é inevitável, conhecida por ser um método corretivo de uma falha, o material apresentado aqui evidenciará que a corretiva pode também se dividir entre uma corretiva planejada ou não planejada.

Já a manutenção preventiva mostra-se eficaz, trazendo sempre resultados positivos de desempenho quando analisado o número de horas de produção de uma máquina que recebe cuidados preventivos. Podem ser aplicados métodos de diferentes conceitos, como o método da manutenção baseada no tempo de operação ou na manutenção baseada na condição do equipamento. Qualquer uma dessas manutenções tem suas vantagens e desvantagens.

O último método de manutenção a ser apresentado, é o preditivo, que tem seu objetivo principal acompanhar o desempenho dos equipamentos. Podendo realizar a manutenção preventiva, baseando-se nos dados que são coletados de cada equipamento, as variáveis coletadas na preditiva, passam uma análise comparativa, com os dados considerados padrões.

Para fechamento do tema geral, será apresentada uma forma de controlar os processos de manutenção, utilizando conceitos importantes, modelos de estrutura ideal, métodos aplicados, softwares de gestão, planos de manutenção, acompanhamento dos indicadores e controle de custos.

ABSTRACT

The main theme of this paper is the maintenance of electric motors in an industrial environment. It aims to address the basic concepts and practical experiences in motor maintenance in the industry. The different types of maintenance that exist will be presented separately as a development for each student.

Starting with corrective maintenance, which was the first maintenance method that existed, which became more evident after the Second World War, and which can still be applied today. Even if you do not want to have corrective maintenance, it is inevitable, known for being a method to correct a failure, the material presented here will show that corrective maintenance can also be divided into planned or unplanned corrective maintenance.

Preventive maintenance, on the other hand, proves to be effective, always bringing positive performance results when analyzing the number of production hours of a machine that receives preventive care. Methods with different concepts can be applied, such as the maintenance method based on operating time or maintenance based on the condition of the equipment. Each of these types of maintenance has its advantages and disadvantages. The last maintenance method to be presented is predictive maintenance, which has the main objective of monitoring equipment performance. Preventive maintenance can be performed based on data collected from each piece of equipment. The variables collected in predictive maintenance undergo a comparative analysis with the data considered standard.

To conclude the general topic, a way of controlling maintenance processes will be presented, using important concepts, ideal structure models, applied methods, management software, maintenance plans, monitoring of indicators and cost control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de Falhas em Máquinas CA	23
Figura 2 -Tipos de Falhas em Máquinas Elétricas Rotativas	24
Figura 3 - Trabalho em um MIT de rotor bobinado.....	25
Figura 4 - Substituição dos rolamentos L.A e L.O.A do MIT	26
Figura 5 - Controle Dimensional das Tampas L.A, L.O.A e Rolamentos.....	26
Figura 6 - Processo de Limpeza utilizando CO ₂	27
Figura 7 - Resistência de isolação (antes e após a limpeza com CO ₂)	28
Figura 8 - Jateamento CO ₂ x Métodos Tradicionais de limpeza.....	29
Figura 9 - Retirada da isolação contaminada pelo pó de escovas	30
Figura 10 - Reisolamento das barras de conexão do rotor	30
Figura 11 - Contaminação do bobinado por pó de escovas e óleo	33
Figura 12 - Ponto da perfuração do isolamento onde ocorreu fuga de corrente	33
Figura 13 - Proporção de perdas por localização no MIT.....	34
Figura 14 - Aplicação de barra isolante de TVE	37
Figura 15 - Aplicação do cadarço de fibra de vidro impregnada com resina	40
Figura 16 - Aplicação tinta isolante e Antiflash no rotor do MIT de alta tensão.....	41
Figura 17 - Exemplos de resinas existentes e suas propriedades	42
Figura 18 - Estufa de secagem do bobinado de maquinas elétricas rotativas	43
Figura 19 - Processo de impregnação por imersão de MITs de BT com bobinas tipo random	45
Figura 20 - Etapas do processo de impregnação por VPI em MITs de MT e AT	46
Figura 21 - Lubrificação de rolamento.....	53
Figura 22 - Relatório técnico final do Motor de Indução Gevisa.....	54
Figura 23 – Megômetro	55
Figura 24 - Reaperto conexões	56
Figura 25 - Tensões aplicadas no Megômetro	60
Figura 26 - Resistências referência.....	61
Figura 27 – Câmera de imagem térmica	65
Figura 28 – Câmera termográfica infravermelha de apontar.....	67
Figura 29 - Termovisor em análise termográfica de painel elétrico	68
Figura 30 - Imagem de uma termográfica de um motor em operação	69
Figura 31 - Exemplo de uma análise de termográfica em motor elétrico	69
Figura 32 - Termógrafo Testo 865 em análise termográfica	71

Figura 33 – Termovisor Testo 868 com recurso APP.....	71
Figura 34 – Queima de motor elétrico por sobreaquecimento	73
Figura 35 - Relatório de análise termográfica.....	75
Figura 36 - Relatório de análise termográfica.....	76
Figura 37 – Tabela de Grau de Severidade	77
Figura 38 – Tabela de classificação de alarmes	77
Figura 39 - Acelerômetro de dois canais.....	79
Figura 40 - Anéis de força sensor piezoelétrico.....	80
Figura 41 - Estator e Rotor do motor de indução	81
Figura 42 - Onda de fluxo de um período e onda de força magnética	83
Figura 43 - Esquema de espectro com componente a 100Hz	83
Figura 44 - Faixa de frequência ideal para sensores de vibração	84
Figura 45 - Oscilação de nível de vibrações devido a duas componentes de frequência com valores muito próximos.....	85
Figura 46 – Frequência de escorregamento do motor	86
Figura 47 - Curva exemplo de um sensor de aceleração e o espectro de frequência	87
Figura 48 - Folga de entreferro assimétrica em torno do rotor	88
Figura 49 - Espetro quando se corta a alimentação do motor.....	89
Figura 50 - Rotor excêntrico	90
Figura 51 - excentricidade dinâmica no rotor	91
Figura 52 - Motor C.C.....	92
Figura 53 – Vista explodida do motor de indução trifásico W22.....	94
Figura 54 - Sistema de isolamento para máquinas de média tensão	94
Figura 55 - Estator com bobinas pré-formadas e ranhura com disposição dos condutores.....	95
Figura 56 - Megôhmetro digital.....	96
Figura 57 - Componentes de corrente no ensaio de resistência do isolamento DC ..	99
Figura 58 - Equação 1: correção temperatura de referência	99
Figura 59 - Equação 2 e 3: valores dos índices I_P e I_{Abs}	100
Figura 60 - Critérios de avaliação para medição de resistência de isolamento (<i>IEEE43</i>)	100
Figura 61 - Medidor Tangente Delta.....	101
Figura 62 - Características f-tan δ de amostras defeituosas/não defeituosas	102

Figura 63 - Comparação entre viscosidade para classificações ISO e SAE.....	107
Figura 64 - Diagrama viscosidade-temperatura para óleo ISO VG (Óleo mineral com índice de viscosidade 95).....	108
Figura 65 - Teste de crepitação.....	110
Figura 66 - Chapa de crepitação Aquecedora Digital.....	110
Figura 67 - Nenhuma presença de água livre ou emulsionada.....	111
Figura 68 - Presença de água na concentração de 0,05 a 0,10%.....	111
Figura 69 - Presença de água na concentração de 0,1 a 0,2%	112
Figura 70 - Crepitação audível	112
Figura 71 - Tabela AS4059	114
Figura 72 - Contador de Partículas Portátil	115
Figura 73 - exemplos de partículas vistas na análise de ferrografia.....	118
Figura 74 – CMMS	120
Figura 75 - Responsabilidades da manutenção	121
Figura 76 - Itens de verificação de uma ordem de manutenção motores de baixa tensão	123
Figura 77 - itens de verificação de uma ordem de manutenção de motores de rotor bobinado	124
Figura 78 - Pontos de medição de escovas do rotor	125
Figura 79 - Itens de verificação de uma ordem de manutenção de motores de rotor bobinado, frequência trimestral	126
Figura 80 - Texto de uma ordem de manutenção de motores de rotor bobinado, plano semestral.....	126
Figura 81 - Cálculo de fiabilidade	128
Figura 82 - Cálculo de taxa de falha.....	128
Figura 83 - Gráficos dos principais indicadores da manutenção	129
Figura 84 - Tabela de Indicadores.....	129
Figura 85 - Software de coleta de paradas.....	130
Figura 86 - Análise de falha, baseada nos 5 porquês	131
Figura 87 - Análise de espectros de vibração dos rolamentos de um motor	132
Figura 88 - Nota aberta pela preditiva para manutenção do Motor	133
Figura 89 - Modelos de estrutura organizacional	133
Figura 90 - Gráficos de acompanhamento de execução das ordens de manutenção	134

Figura 91 - Fluxograma da política de grandes motores	137
Figura 92 - Quadro geral do status momentâneo dos motores	138
Figura 93 - Gráfico de desgaste de escova por anel.....	139
Figura 94 - Gráfico de resistência de isolamento do anel coletor	139
Figura 95 - quadro de monitoramento online dos motores críticos.....	140
Figura 96 - Gráficos de variáveis monitoradas do motor	141

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD	Índice de Adsorção
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
C.A	Corrente Alternada
CO ₂	Dióxido de Carbono
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
L.A	Lado Acionado
L.O. A	Lado Oposto Acionado
MIT	Motor de Indução Trifásico
MT	Média Tensão
PI	Índice de Polarização
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TVE	Tecido de Vidro com Resina Epóxi
VPI	Vacuum Pressure impregnation
CMMS	Computerized Maintenance Management System

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivo específico	19
3 DESENVOLVIMENTO	20
3.1 Manutenção.....	20
3.1.1 Manutenção Corretiva	21
3.1.1.1 Manutenção Corretiva dos MITs em campo	25
3.1.1.2 Manutenção Corretiva dos MITs em oficinas especializadas	31
3.1.1.3 Materiais empregados	34
3.1.1.3.1 Materiais elétricos.....	35
3.1.1.3.2 Materiais Isolantes.....	36
3.1.1.3.3 Placas de tecido de vidro com resina epóxi (TVE)	36
3.1.1.3.4 Papel meta aramida	37
3.1.1.3.5 Fita ou Filme de poliamida	38
3.1.1.3.6 Fita de Mica	39
3.1.1.3.7 Cadarço de Vibra de Vidro	39
3.1.1.3.8 Tintas Isolantes e Antiflash.....	40
3.1.1.3.9 Vernizes de impregnação	41
3.1.2 Manutenção Preventiva.....	48
3.1.2.1 Manutenção Baseada em Tempo (TBM).....	48
3.1.2.2 Manutenção preventiva baseada na condição (CBM)	49
3.1.2.3 Importância da Manutenção Preventiva em Motores Elétricos.....	50
3.1.2.4 Práticas de manutenção preventiva em motores elétricos	51
3.1.2.4.1 Preventiva mecânica	51
3.1.2.4.1.1 Limpeza.....	51
3.1.2.4.1.2 Lubrificação	52
3.1.2.4.1.3 Medições de folga no eixo e mancais.....	53
3.1.2.4.2 Preventiva Elétrica.....	54
3.1.2.4.2.1 Medições elétricas.....	54
3.1.2.4.2.2 Reaperto de conexões	56
3.1.2.4.2.3 Restauração da vedação da caixa de ligação	56
3.1.2.4.2.4 Verificação do Sistema de Escovas	56

3.1.2.4.2.5 Verificação de Proteções Elétricas	57
3.1.2.4.3 Manutenção Preventiva aplicada a motores de grande porte	57
3.1.2.4.3.1 Verificação e reaperto das conexões elétricas	57
3.1.2.4.3.2 Vedação	57
3.1.2.4.3.3 Medição de resistência ôhmica entre fases.....	58
3.1.2.4.3.4 Estado geral das escovas	58
3.1.2.4.3.5 Pátina do anel coletor.....	59
3.1.2.4.3.6 Desgaste mecânico do anel coletor.....	59
3.1.2.4.3.7 Limpeza de depósito de material das escovas.....	60
3.1.2.4.3.8 Rejuvenescimento dos enrolamentos.....	60
3.1.2.4.3.9 Surg Test (Teste de surto).....	61
3.1.2.4.3.10 Teste HIPOT (<i>High Potential Test</i>)	61
3.1.2.4.4 Resultados da aplicação da manutenção preventiva	62
3.1.3 Manutenção Preditiva.....	63
3.1.3.1 Manutenção Preditiva de Motores Elétricos	63
3.1.3.1.1 Termografia	65
3.1.3.1.1.1 Porque investir em uma análise termográfica?	67
3.1.3.1.1.2 As vantagens da análise termográfica.....	72
3.1.3.1.1.3 Ocorrências que uma inspeção termográfica pode detectar.	73
3.1.3.1.1.4 Relatório de inspeção termográfica	74
3.1.3.1.2 Análise de Vibrações.....	78
3.1.3.1.2.1 Vibrações em motores elétricos e a modulação de amplitude e escorregamento	84
3.1.3.1.2.2 A análise de vibração através do Escorregamento do motor	85
3.1.3.1.2.3 Folga de entreferro assimétrica (excentricidade estática)	87
3.1.3.1.2.4 Rotor excêntrico (excentricidade dinâmica).....	89
3.1.3.1.3 Isolamento.....	92
3.1.3.1.3.1 Motor monofásico universal.....	93
3.1.3.1.3.2 Testes nos sistemas de isolamento.....	96
3.1.3.1.4 Análise de óleo	104
3.1.3.1.4.1 Viscosidade	106
3.1.3.1.4.2 Umidade	109
3.1.3.1.4.3 TAN – Número de Acidez Total	113
3.1.3.1.4.4 Contagem de Partículas	113

3.1.3.1.4.5 Espectrometria.	116
3.1.3.1.4.6 Ferrografia.....	116
3.1.4 Gestão da Manutenção	119
3.1.4.1 Importância do controle da manutenção	119
3.1.4.2 Responsabilidades da Manutenção.....	121
3.1.4.2.1 Planejamento de Manutenção	122
3.1.4.2.1.1 Plano quinzenal.....	124
3.1.4.2.1.2 Plano trimestral.....	125
3.1.4.2.1.3 Plano semestral.....	126
3.1.4.2.2 Controle.....	127
3.1.4.2.2.1 Fator de Fiabilidade.....	127
3.1.4.2.2.2 Taxa de falha.....	128
3.1.4.2.3 Execução.....	131
3.1.4.2.4 Organização	133
3.1.4.2.4.1 Terceirização da Manutenção	135
3.1.4.2.4.2 Política de grandes motores.....	135
3.1.4.2.4.3 Monitoramento online.....	140
4 CONCLUSÃO	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143

1 INTRODUÇÃO

A Engenharia Elétrica é uma área bastante ampliada, os profissionais dessa área podem atuar em diversos setores produtivos e, dentro desses setores produtivos, podemos ter a Engenharia apoiando em projetos, desenvolvimento de melhorias, segurança do trabalho, automação e também na manutenção, que é o tema principal desse trabalho.

A manutenção dos ativos elétricos dentro da indústria já existe desde a década de 40 e, a cada ano que se passa a manutenção continua em evolução.

O ativo elétrico evidenciado aqui nesse trabalho é o motor elétrico. esse equipamento é um dos principais dentro das indústrias, sua aplicação é bastante diversificada e, por isso, a amostragem pode abordar diversos tamanhos e tipos de motores elétricos.

Motores elétricos são equipamentos que possuem a característica de transformar energia elétrica em energia mecânica, por isso é uma das máquinas mais importantes de uma indústria.

Seu funcionamento se deve basicamente à interação entre os fenômenos magnéticos e elétricos. O motor é constituído, de forma simplificada, por bobinas (o rotor) dispostas adequadamente sobre imãs fixos (o estator). Quando as bobinas são percorridas por uma corrente elétrica, o campo magnético gerado ao redor delas interage com o campo dos imãs, fazendo com que elas girem. Provocando-se a inversão da corrente com uma determinada frequência, as bobinas não param de girar. Se ligarmos um motor a um eixo que transmite esse movimento para fora da estrutura, temos um motor (Weg,2024).

Nessa visão de importância desse equipamento na indústria, o trabalho desenvolvido aqui, mostra o controle existente na indústria, visando melhor desempenho de motores elétricos dentro dos padrões esperados, trazendo lucratividade para a indústria.

A definição de importância de cada motor dentro da indústria, depende do papel a ser exercido por ele no processo e, através da definição, dessa importância, começaremos aqui a tratar do tema comum entre essas máquinas: A manutenção e seus controles. Dentro da manutenção, busca se melhor performance dos equipamentos e através do resultado positivo, diminuimos os custos e aumentamos os lucros.

O tamanho do esforço e dos custos gastos na manutenção desses equipamentos, dependerá diretamente do valor desse ativo. Desde monitoramentos

simples, como o monitoramento de temperatura e vibração, à controles realizados por inteligência artificial (IA), são capazes de reportar situações e comportamentos em tempo real. Todo esse processo de monitoramento tem como objetivo comum, a prevenção e previsão de falhas.

Uma vez que o objetivo do motor elétrico é transformar energia elétrica em mecânica, sua forma construtiva engloba desde motores elétricos de pequeno, médio e grande porte, podem ser alimentados à partir de diferentes valores de tensão. Considera-se baixa tensão de alimentação valores abaixo de 1000 volts e alta tensão, os motores que trabalham com tensões acima de 1000 volts.

Neste trabalho trata-se de forma objetiva e técnica a manutenção desses motores, baseado nas referências bibliográficas, mas evidenciando também as boas práticas aplicadas dentro das indústrias e também nas oficinas especializadas.

Para tanto, são apresentadas as manutenções divididas por tipos e também serão apresentados, os controles dessas manutenções.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Apresentar ao leitor as formas existentes de manutenção de motores elétricos, evidenciando detalhes nos métodos, conceitos e práticas.

Apresentar o resultado alcançado nas diversas formas de manutenção.

2.2 Objetivo específico

Apresentar práticas de manutenção corretiva, programada ou não, aplicação de materiais e formas de reconstrução do equipamento danificado, explorar os motivos causadores de falhas e métodos de prevenção. Como programar uma manutenção corretiva.

Aplicabilidade da manutenção preventiva, vantagens, desvantagens, expectativas de vida útil, expectativas de performance.

Explorar as vantagens da crescente manutenção preditiva, utilização de ferramentas capazes de traduzir a real condição do equipamento, podendo gerenciar o risco, baseado na condição do equipamento.

No controle da manutenção, apresentar a definição do tipo de estrutura de manutenção, apresentar os pilares de composição dessa estrutura, métricas da eficiência, análises de falhas e planos de manutenção.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Manutenção

Desde o início da revolução industrial, no século XVIII, quando as máquinas tomaram conta do ambiente industrial, surgiu a necessidade de técnicas e procedimentos para assegurar que os equipamentos continuassem a operar. Essas técnicas e procedimentos são definidos como manutenção. A origem da palavra manutenção vem do latim “manu tentione,” que significa ter na mão. O termo manter pode ser definido como fazer continuar ou permanecer no estado atual. Tais definições sugerem que o termo manutenção significa preservar alguma coisa (Moubray, 2000)

Segundo Gangorra (2013), o termo manutenção consiste no conjunto de atividades necessárias para restabelecer ou manter em perfeito estado de conservação um determinado ativo.

A primeira geração da manutenção estava voltada para a correção da falha após a ocorrência da mesma. Naquele tempo, a indústria não era altamente mecanizada, portanto, não havia uma preocupação com as paradas inesperadas na produção. Os períodos de paralização à espera da recuperação de falhas ocorridas não eram tão importantes.

Segundo Moubray (2000), a prevenção contra falhas de equipamentos não era uma prioridade alta na mentalidade da maioria dos gestores. Ao mesmo tempo, a maioria dos equipamentos possuíam engenharia simplificada e, muitos deles, superdimensionados, o que os tornava confiáveis e fáceis de reparar. Tal fato, dispensava a necessidade de uma manutenção sistemática de qualquer tipo além de uma simples rotina de limpeza, assistência e lubrificação.

A primeira evolução das técnicas de manutenção ocorre durante a segunda guerra mundial, neste período ocorre o aumento da demanda por bens de todos os tipos e, em contrapartida, o suprimento de mão de obra industrial diminuiu drasticamente. Esse fato levou a uma mecanização aumentada do ambiente produtivo e, por volta da década de 50, os equipamentos de todos os tipos e processos produtivos eram mais numerosos e complexos. Dentro desse cenário, o ambiente industrial começava a depender cada vez mais das máquinas (Moubray, 2000).

Conseqüentemente, neste período, o tempo de paralisação entrou em foco. Isso levou a ideia de que as falhas dos equipamentos poderiam e deveriam ser evitadas, surgindo então o conceito de manutenção preventiva. Nos anos 60, a manutenção preventiva consistia basicamente em revisões gerais dos equipamentos e eram realizadas a intervalos fixos.

Neste período, os custos de manutenção começaram a ganhar destaque quando comparados aos custos operacionais devidos sua expressiva elevação. Tal fato, contribuiu para o crescimento dos sistemas de planejamento e controle de manutenção, o que ajudou a colocar a manutenção sob controle e, hoje, é parte integrante da prática de manutenção (Moubray, 2000).

Com o aumento das expectativas da manutenção, o crescimento da mecanização e da automação dos processos, a confiabilidade e disponibilidade dos ativos tornaram-se questões imprescindíveis nos mais diversos setores. É a partir daí, que surge a manutenção preditiva como metodologia de maiores vantagens para o monitoramento e análise da condição individuais e reais dos ativos.

3.1.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é caracterizada pela correção da falha nos equipamentos e instalações quando estas surgissem. Em comparação aos outros métodos de manutenção, ela aparenta ter um custo menor por ser aplicada somente quando o processo é interrompido, no entanto, é necessário analisar os prejuízos causados pelo tempo de parada do processo produtivo, muitas vezes a torna a manutenção mais cara (Souza, 2009).

A manutenção corretiva é dividida em duas classes:

Manutenção corretiva Emergencial: A manutenção corretiva não planejada caracteriza-se pela correção aleatória de falhas. Normalmente, acarreta altos custos devido às perdas de produção e à redução da qualidade do produto resultantes de quebras inesperadas, além dos elevados custos indiretos de manutenção. Agrava-se a situação pelo fato de tais eventos ocorrerem frequentemente em períodos com cronogramas apertados. Adicionalmente, quebras aleatórias podem provocar danos significativos ao equipamento, com a possibilidade de extensão considerável dos tempos de reparo e prejuízos ao processo produtivo (Kardec e Nascif, 2012). Nos processos industriais contínuos, as paradas acidentais para reparação imediata de

um equipamento comprometem a performance de funcionamento de outros que estavam operando normalmente. Um exemplo disso são as vibrações detectadas em grandes máquinas que antes funcionavam sem problemas. As organizações onde a maior parte das manutenções são corretivas e não planejadas, seu departamento de manutenção reage as falhas dos equipamentos, as necessidades de reparos emergenciais e o desempenho da organização não acompanha as exigências da competitividade do mercado atual (Filho, 1996).

Manutenção corretiva Planejada: Nas manutenções corretivas planejadas, a intervenção ocorre após a detecção de anormalidades no funcionamento do equipamento. Embora se trate de falhas, estas não interrompem o processo produtivo, sendo o reparo geralmente determinado pela gestão, por meio de monitoramento das condições do equipamento ou pela decisão de manter o funcionamento até o limite viável. Assim, as ações emergenciais são desnecessárias, e o reparo pode ser programado para momentos em que a indisponibilidade do equipamento não afete a produção. A programação antecipada da intervenção garante menor custo, maior agilidade e segurança em comparação a reparos não planejados (Kardec e Nascif, 2012). A eficácia desse tipo de manutenção depende da qualidade da informação coletada durante o monitoramento condicional do ativo. A decisão de operar o equipamento até a falha, quando tomada, deve ser uma estratégia conhecida, permitindo um planejamento prévio, como a substituição por unidade idêntica, o estoque de peças de reposição e a preparação do ambiente de trabalho para que o impacto da intervenção seja o menor possível no processo produtivo. Nestes casos, as paradas de equipamento tornam-se mais curtas e, paradas mais curtas, são paradas mais fáceis de gerenciar e também mais fáceis de executar como foram planejadas. As interrupções, neste caso, não acarretam perdas significativas no processo produtivo (Moubray, 2000).

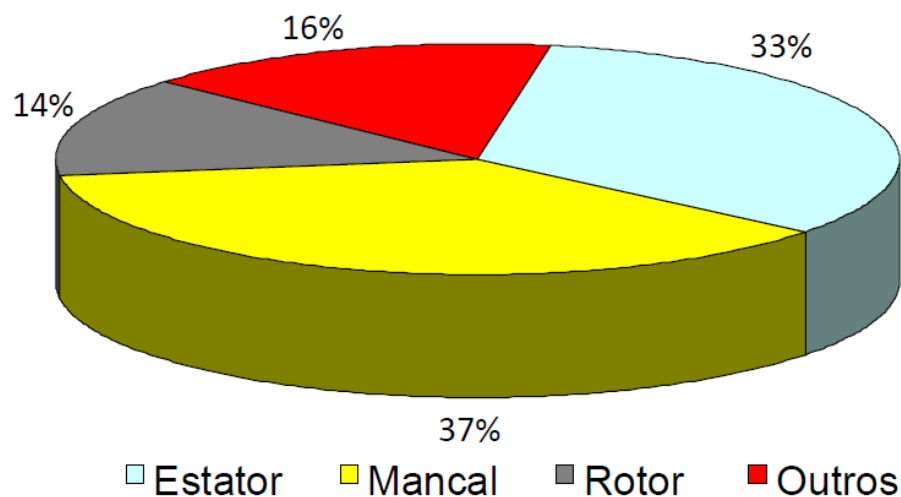
Segundo Souza (2009), a Manutenção corretiva visa fornecer as informações necessárias para avaliação do desempenho e da repetibilidade da falha dos equipamentos. As principais informações necessárias às análises são originadas da manutenção corretiva e, é fundamental que seja dada ênfase à formação de um time capaz de transmitir estas informações de forma eficiente ao setor de manutenção preditiva a partir de análise de causas das falhas funcionais dos equipamentos.

No passado, em muitos sites industriais, a manutenção corretiva era a única manutenção a ser realizada nas máquinas elétricas rotativas, mais especificamente,

nos motores de indução trifásico e a manutenção acontecia quando havia a ocorrência de avarias nas máquinas elétricas rotativas. Até os dias atuais, a manutenção corretiva nos MITs (motores de indução trifásico) consiste na maioria das vezes, na troca de rolamentos e mancais de deslizamento, rejuvenescimento e recuperação dos enrolamentos do estator e a recuperação elétrica e mecânica de rotores. Na Figura 1 são apresentadas as principais causas de falhas em MITs e na Figura 2 temos ilustrado as principais falhas em maquinas elétricas rotativas de acordo com os estudos do IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) e do EPRI (*Electrical Power Research Institute*).

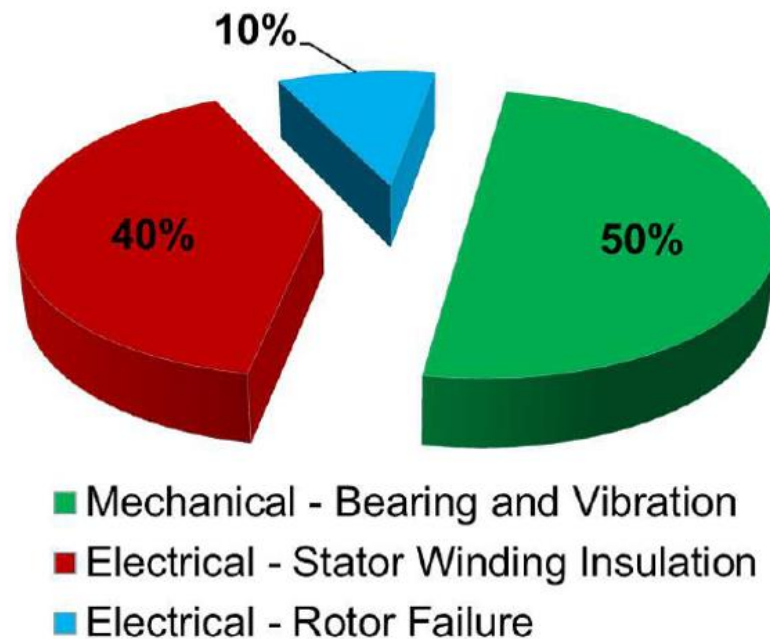
É importante salientar, que o papel fundamental das máquinas elétricas rotativas dentro dos mais variados processos produtivos, não apenas pela sua vital importância, mas também pelo seu alto custo intrínseco, principalmente em se tratando de grandes MITs e de maquinas elétricas rotativas especiais. Portanto, as paradas destes equipamentos e, conseqüentemente, a manutenção corretiva deverá ocorrer quando identificada a presença de algum defeito a ser corrigido e que esta manutenção corretiva seja planejada e não incorrer em prejuízos de produção. Para que isso aconteça, faz-se necessário um excelente plano de manutenção preventiva e a aplicação de técnicas de manutenção preditiva, visando um melhor planejamento e conseqüentemente maior confiabilidade e disponibilidade operacional, reduzindo os custos de manutenção e melhorando o planejamento na compra e aquisição de equipamentos e componentes e sobressalentes.

Figura 1 – Tipos de Falhas em Máquinas CA



Fonte: Data Engenharia (2019).

Figura 2 -Tipos de Falhas em Máquinas Elétricas Rotativas



Fonte – Data Engenharia (2019).

Estratificando as falhas descritas na Figura 1 (Tipos de Falhas em Máquinas CA) para cada parte constituinte do MIT (Motor de indução trifásico) tem-se a seguinte descrição das principais falhas:

- Mancais
 - Quebra de eixos;
 - Travamento de rolamentos;
 - Afrouxamento de fixadores;
 - Falta de lubrificação;
 - Excesso de vibração;
- Estatores
 - Aterramento do enrolamento (curto para terra);
 - Curto entre fases ou espiras;
 - Rompimento de conexões (curto por falta de fases);
 - Barra estática quebrada;
- Rotores
 - Rompimento de bandagem do rotor bobinado;
 - Aterramento de barra no rotor bobinado;
 - Abertura de arco no sistema de levantamento de escovas;
 - Curto no porta escovas por excesso de contaminação de pó de escovas.

A manutenção corretiva pode ser realizada tanto em campo quanto em oficina especializada em máquinas elétricas rotativas e os processos de manutenção consistem basicamente em limpeza, revitalização, substituição de componentes danificados e recuperação de isolamento dos estatores e rotores dos MITs.

3.1.1.1 Manutenção Corretiva dos MITs em campo

A manutenção corretiva dos MITs em campo dá-se principalmente através da execução de atividades de troca de mancais e rolamentos, embuchamento de tampas, limpeza e descontaminação com diluente dielétrico, rejuvenescimento e jateamento de CO₂ para limpeza dos enrolamentos do estator e rotor e a recuperação de bandagens da cabeça de bobinas e conexões contaminadas pelo pó de escovas.

A Figura 3 apresenta um exemplo de trabalho corretivo em um MIT (motor de indução trifásico) de rotor bobinado num site de fabricação de cimento, onde durante os trabalhos de desmontagem, retirada e inspeção mecânica nos mancais foram identificados três conjuntos de selos mecânicos danificados, ressecados, trincados e quebradiços e está avaria ocasionou vazamento de óleo ao lado oposto do ao acoplamento do MIT.

Figura 3 - Trabalho em um MIT de rotor bobinado

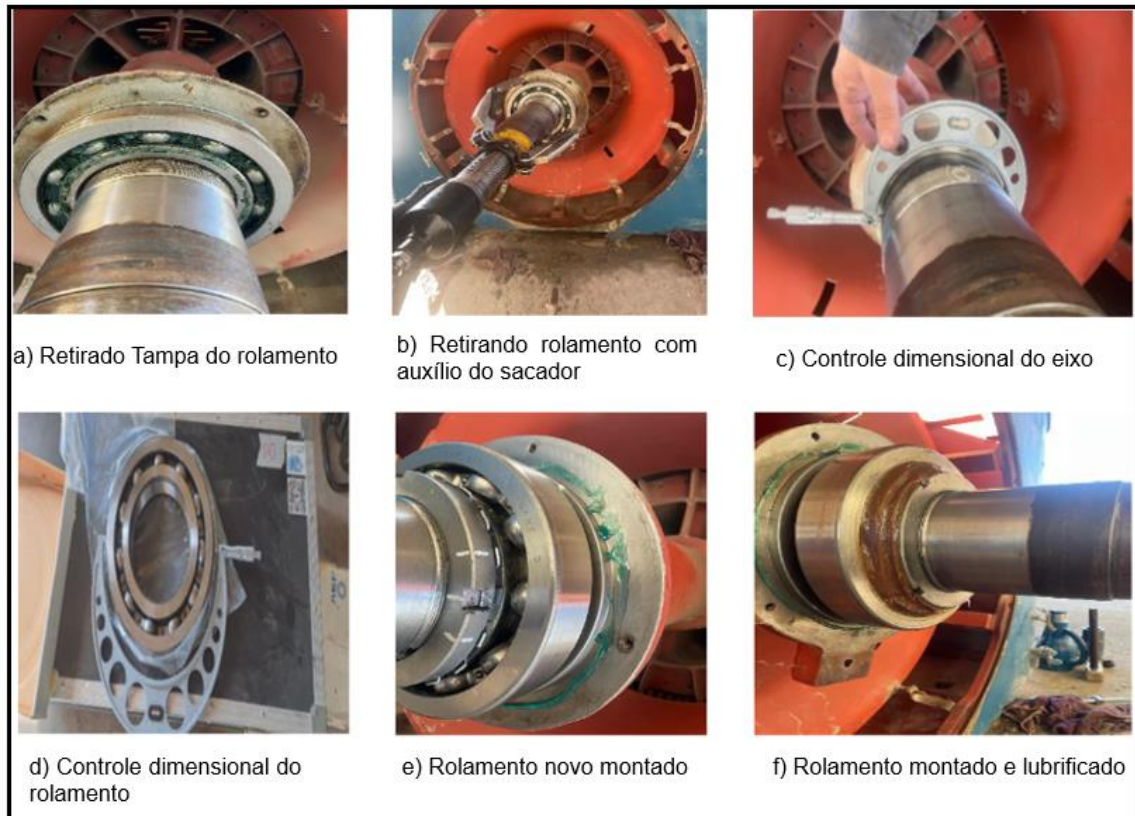


Fonte – De autoria própria (2017).

Outro exemplo de manutenção corretiva em rolamentos dos MITs em campo é ilustrado nas Figuras 4 e Figura 5, onde pode-se observar a substituição dos

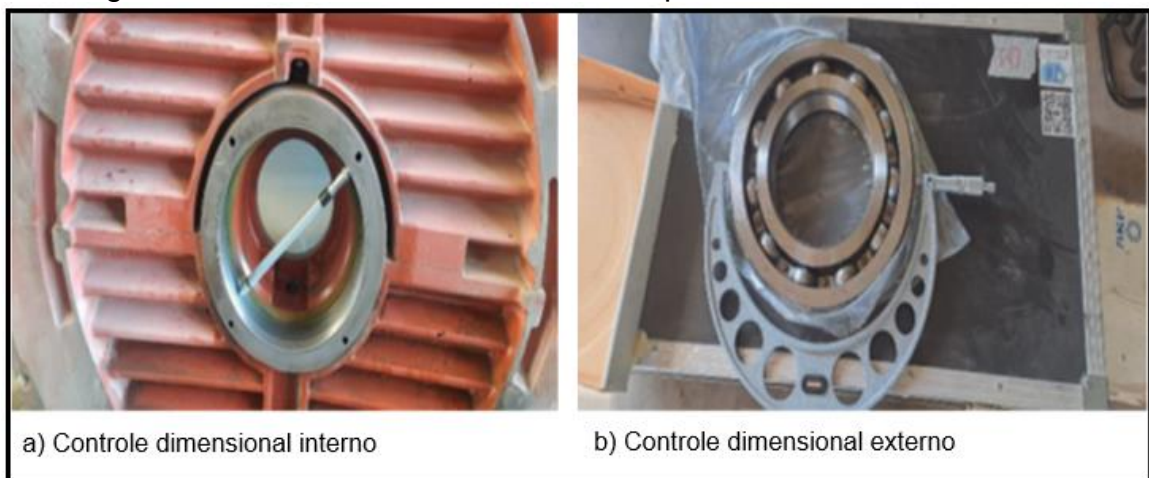
rolamentos L.A (lado acionado) e L.O.A (lado oposto acionado) e o controle dimensional das tampas dianteira e traseira de um MIT da fabricante Gevisa, modelo: KAF, potência de 1240KW (tensão 4160 volts e corrente de 209 A (amperes)).

Figura 4 - Substituição dos rolamentos L.A e L.O.A do MIT



Fonte: De autoria própria (2024).

Figura 5 - Controle Dimensional das Tampas L.A, L.O.A e Rolamentos



Fonte: De autoria própria (2024).

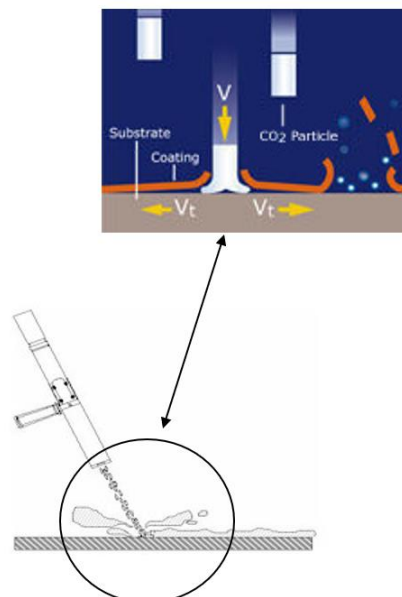
Nos motores elétricos as falhas prematuras nos rolamentos são devido a diferentes motivos. Dentre eles destacam-se: cargas superiores às suportáveis, lubrificação inadequada, cargas demasiado leves, danos durante o transporte, manuseio impróprio, problemas durante a montagem, erosão elétrica, contaminação interna do rolamento, vedações inadequadas ou folgas, quer seja do lado da chumaceira ou do lado do eixo (Carvalho, 2019).

O Jateamento de CO₂ é um novo sistema para limpeza e descontaminação de maquinas elétricas e automaticamente tem substituído os métodos tradicionais utilizados, como por exemplo é o caso de lavagem em campo dos enrolamentos e partes do MIT com solvente dielétrico. O jateamento de CO₂ tem sido utilizado em uma grande ordem de aplicações, principalmente para remoção de limpezas pesadas de contaminantes nos MIT.

O jateamento de gelo é um processo no qual as partículas de dióxido de carbono, são propulsionadas em alta velocidade atingindo e limpando a superfície devido ao impacto. Após o impacto as partículas de CO₂ retornam ao seu estado natural como gás de dióxido de carbono, desaparecendo com a sujeira.

O gelo seco penetra no contaminante, mas instantaneamente sublima. Esta sublimação cria uma onda de tensão de compressão entre a superfície a camada a ser limpa. Com energia suficiente para remover os contaminantes e deixar a superfície seca. A Figura 6 ilustra o processo de limpeza utilizando CO₂.

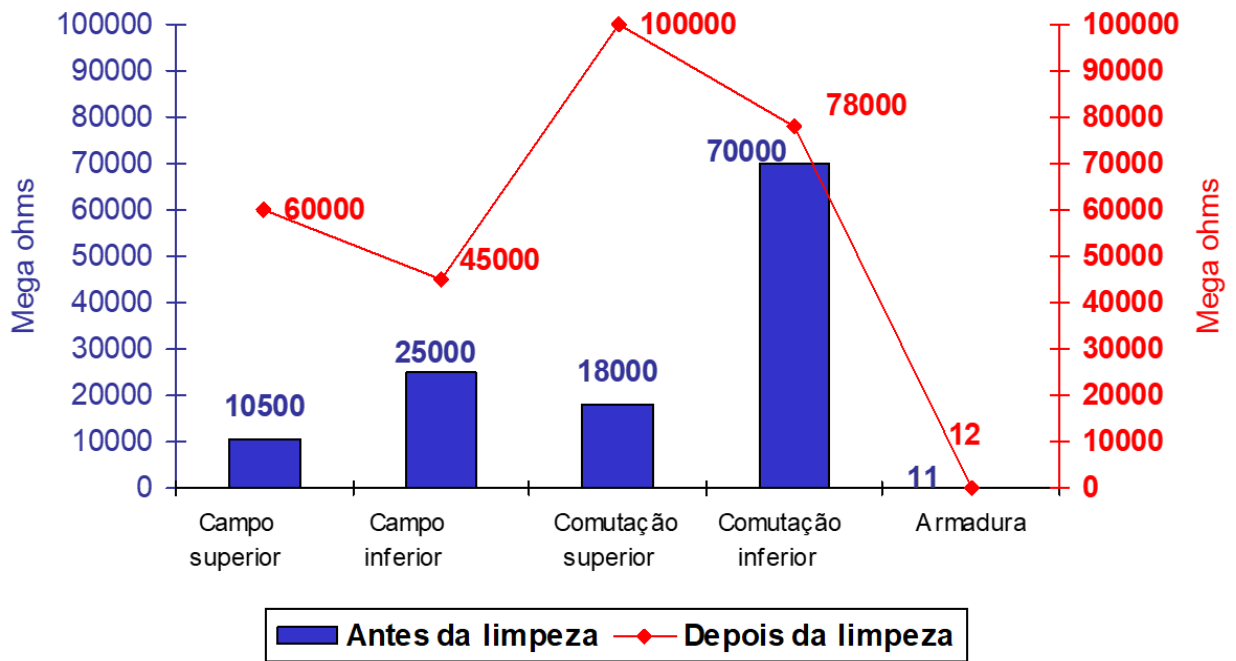
Figura 6 - Processo de Limpeza utilizando CO₂



Fonte – ABB (2002).

Na Figura 7 pode-se observar o aumento da resistência de isolamento de uma máquina elétrica rotativa após realização do procedimento de limpeza do enrolamento com jateamento de CO₂.

Figura 7 - Resistência de isolamento (antes e após a limpeza com CO₂)



Fonte: ABB (2002).

As vantagens desse tipo de procedimento de limpeza de máquinas elétricas rotativas são:

- Diminuição do tempo de parada do equipamento para realização da manutenção;
- Limpeza no local de instalação do equipamento;
- Limpeza mais rápida e eficiente;
- Eliminação de risco de danos ao equipamento;
- Eliminação do uso de solventes;

Já o quadro ilustrado na Figura 8 mostra o comparativo entre os métodos tradicionais de limpeza de máquinas elétricas rotativas versus o jateamento com CO₂.

Figura 8 - Jateamento CO₂ x Métodos Tradicionais de limpeza

Método	Limpeza com CO ₂	Limpeza com detergente/solvente
Equipamentos	- Máquinas Jateadora - Compressor de Ar	- Cabine de Lavagem (oficina) - Estufa
Mão de Obra	- 06 Pessoas motor grande porte	- 10 pessoas motor grande porte
Tempo	- Máximo de 24 h motor grande porte	- Média de 96 h para motor grande porte
Meio Ambiente	- Não há resíduos secundários. - Não utiliza material tóxico.	- Há resíduos secundários - Utiliza material tóxico
Qualidade	- Apresenta bom resultado	- Apresenta bom resultado

Fonte: ABB (2002).

A recuperação de bandagens da cabeça de bobinas e conexões contaminadas pelo pó de escovas faz-se necessária em campo quando os valores de resistência de isolamento dos MIT apresentam-se reduzidos e o processo de limpeza com uso do solvente dielétrico na superfície da isolação mostra-se ineficiente para aumentar os valores de isolação do MIT. A recuperação da resistência de isolação do MIT é realizada seguindo os procedimentos descritos na sequência:

- Inspeção visual do ponto de maior incidência da contaminação;
- Testes elétricos no MIT (Resistência de isolação, teste de surto, resistência ôhmica);
- Limpeza, remoção da resina e eliminação de pontos contaminados pelo acumulo de pó de escovas;
- Limpeza das barras, cabeças de bobinas e de conexões do estator ou rotor (uso de lixa e nitrogênio);
- Reisolamento dos pontos recuperados com material isolante (Mica isolante, fita elétrica, cadarço de fibra de vidro e resina de impregnação).

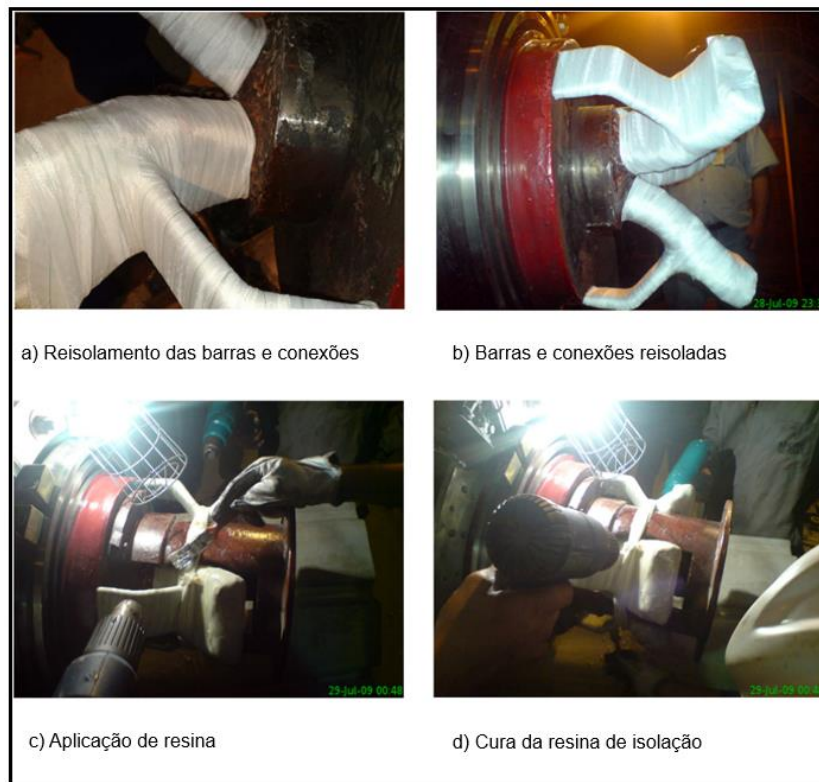
As Figuras 9 e 10 apresentam a sequência lógica dos procedimentos de recuperação do reisolamento das barras de interligação do rotor bobinado de um MIT em um site de produção de cimento.

Figura 9 - Retirada da isolamento contaminada pelo pó de escovas



Fonte – De autoria própria (2017).

Figura 10 - Reisolamento das barras de conexão do rotor



Fonte – De autoria própria (2017).

O isolamento aplicado ao processo de Reisolação do fechamento das barras de conexão do rotor, consiste em papel de mica altamente absorvente, juntamente com fita de fibra de vidro resinada com resina epóxi especial, a fim de preencher os espaços vazios e fornecer resistência mecânica durante o processo de impregnação das barras de conexão do rotor.

3.1.1.2 Manutenção Corretiva dos MITs em oficinas especializadas

A manutenção corretiva realizada em oficinas especializadas acontece quando temos a ocorrência de avarias nas máquinas elétricas rotativas e que dada a dimensão das avarias, os reparos não podem ser realizados em campo. A manutenção corretiva nos MITs em oficinas especializadas consiste, na maioria das vezes, na troca de rolamentos e mancais de deslizamento, rejuvenescimento e recuperação dos enrolamentos do estator e a recuperação elétrica e mecânica de rotores.

O escopo de manutenção oferecido pelas grandes oficinas especializadas em reparo de motores elétricos de baixa tensão corrente alternada, consiste na grande maioria das vezes na realização dos procedimentos listados a seguir:

- Rejuvenescimento;
- Rebobinamento;
- Impregnamento à vácuo;
- Balanceamento;
- Metalização de colos no sistema aspersão térmica;
- Usinagem de partes mecânicas;
- Peritagem elétrica e mecânica;
- Ensaio de carga conforme ABNT 5383-1, após reparos;
- Avaliação do rendimento, após os reparos.

Para os motores elétricos trifásicos de média e alta tensão o escopo de trabalhos de manutenção corretiva oferecidos e realizados nas oficinas especializadas consiste nos seguintes procedimentos:

- Peritagem elétrica e mecânica;
- Processo de lavagem e limpeza do estator e rotor;
- Recuperação de coletores de anéis;
- Rebobinamento de rotor;
- Balanceamento de partes rotativas;

- Correção de colo de eixos via metalização;
- Reisolamento de partes recuperadas (estator e rotor);
- Rebitagem de casquilhos e mancais;
- Impregnação do isolamento em tanques de imersão;
- Cura e secagem em estufas.

A necessidade de manutenção corretiva em máquinas elétricas rotativas nas oficinas especializadas, na maioria das vezes, está associada a algum fator de estresse ocorrido sobre o isolamento da máquina, alterando a estrutura física ou química do material isolante. Esses fatores desencadeiam mecanismos de degradação que causam a redução gradativa da sua isolação. Os fatores mais relevantes no processo de degradação do isolamento das máquinas elétricas rotativas são os térmicos, elétrico, mecânico e ambiental.

Os fatores de estresse podem agir de forma constante ao longo do tempo ou atuar de forma transitória. Quando a ação do fator de estresse é constante, o tempo de falha será proporcional ao número de horas de operação do motor. Em contrapartida, uma ação transitória de um fator de estresse acarreta um tempo de falha proporcional à magnitude e ao número de transientes ao qual o motor foi submetido (Guedes, 2018).

Na Figura 11 é ilustrado o bobinado do estator de um MIT de MT contaminado por pó de escovas misturado ao óleo vazado do mancal do lado acoplado da máquina que é um caso típico e recorrente de contaminação ambiental de máquinas elétricas rotativas. Na Figura 12 nota-se a formação de uma pasta escura aderida às cabeças de bobina do estator. Nesta situação, a contaminação desencadeou uma redução gradativa da capacidade dielétrica do isolamento do motor e, conseqüentemente, a perfuração da isolação próximo a entrada de um dos condutores do estator na ranhura do núcleo (Figura 12). Nesse ponto, houve a fuga da corrente para o núcleo e conseqüentemente para a massa (aterrada) do motor.

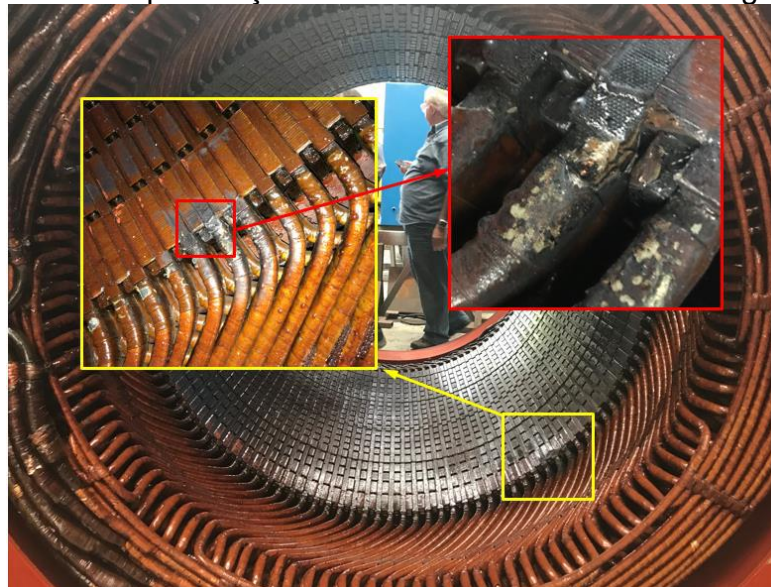
Figura 11 - Contaminação do bobinado por pó de escovas e óleo



Fonte: De autoria própria (2017).

Os fatores ambientais estão relacionados à absorção de umidade, ou à contaminação do material isolante por óleo ou graxa e sujeira com partículas condutoras ou agentes químicos. Os fatores ambientais quando associados, correspondem a 32% das falhas do isolamento do estator dos MITs de grande porte e nos MITs de BT este percentual pode alcançar até 40% das ocorrências (Guedes, 2018).

Figura 12 - Ponto da perfuração do isolamento onde ocorreu fuga de corrente



Fonte: De autoria própria (2017).

Continuando a narrativa do dano na isolação do MIT de MT ilustrado na figura anterior, o processo de manutenção corretiva adotado foi a recuperação do ponto danificado através da aplicação dos materiais isolantes compatíveis com a classe de temperatura do MIT. Posteriormente o MIT foi submetido ao processo de limpeza e

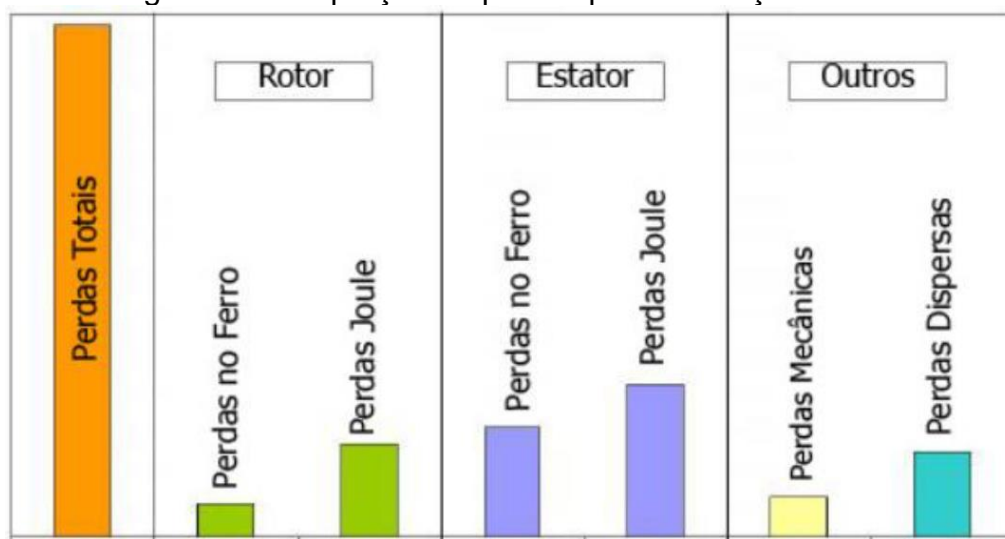
descontaminação geral com jato de CO₂. Após processo de recuperação e limpeza, o dielétrico do MIT foi submetido aos testes de isolamento final para liberação.

3.1.1.3 Materiais empregados

A vida útil e a eficiência dos MITs após processo de manutenção corretiva dependem primordialmente da qualidade dos materiais empregados no processo de manutenção. Os materiais empregados têm relação direta com os mecanismos de perdas nos MITs. Os principais tipos de perdas no MIT são: as perdas joule, as perdas por histerese, perdas por corrente de Foucault, as perdas dispersas e perdas mecânicas (Oliveira, 2009).

A Figura 13 mostra a contribuição das perdas de acordo com o local onde ocorrem no MIT.

Figura 13 - Proporção de perdas por localização no MIT



Fonte: Cezário (2005).

Os materiais empregados na manutenção corretiva dos MIT devem ser escolhidos para minimizar ao máximo as perdas e serem viáveis economicamente. O cobre puro tem maior aplicação para os circuitos elétricos (enrolamentos), enquanto que o alumínio e o latão têm maior aplicação para enrolamentos dos MIT de gaiola de esquilo.

3.1.1.3.1 Materiais elétricos

Na execução da manutenção corretiva dos enrolamentos dos motores indução trifásico são utilizados os fios de cobre ou as barras de cobre. Estes possuem uma alta pureza e são fabricados pelo processo de eletrolise com uma pureza acima de 99%.

Em geral, os condutores de seção circular são fabricados em diâmetros padrões até um diâmetro de cerca de 2.5 mm a 3 mm. A densidade de corrente varia entre 3.5 e 15 A/mm² dependendo do sistema de ventilação, número de partidas por hora, e eficiência desejada. Motores de alta eficiência são caracterizados por densidade de corrente menor (Gilio, 2003).

Segundo Azevedo (2000), os fios de cobre esmaltados de formato redondo e os fios de cobre de formato retangular são respectivamente, aplicados na manutenção dos MITs de baixa tensão e pequeno porte e dos MITs de média e alta tensão. Os fios esmaltados devem possuir as seguintes propriedades:

- Elétricas: Os materiais devem possuir rigidez dielétrica e uniformidade da película protetora de esmalte. As características dielétricas não podem sofrer redução em função de tratamentos térmicos ou da aplicação dos vernizes de impregnação no processo de manutenção corretiva.
- Mecânicas: As principais propriedades mecânicas para os fios esmaltados são:
 - Boa flexibilidade, permitindo que o fio esmaltado seja dobrado ou enrolado em torno de diâmetros pequenos ou formatos trapezoidais sem agredir a integridade da camada isolante;
 - Boa aderência da película esmaltada em toda extensão do condutor;
 - Elevada resistência à abrasão afim de resistir as raspagens que normalmente ocorrem nos processos de enrolamento;
- Resistência ao choque térmico: O material deve resistir as variações bruscas de temperatura, que caracterizam o choque térmico, sem que ocorra redução da sua vida útil (WEG, 2024).
- Resistência aos agentes químicos: Os fios esmaltados devem resistir a imersão em solventes e/ou compostos isolantes comuns, vernizes e resinas de impregnação (WEG, 2024).

3.1.1.3.2 Materiais Isolantes

A vida útil de uma máquina elétrica depende, majoritariamente, do isolamento elétrico dos seus enrolamentos. Os fatores de maior relevância no desempenho do sistema de isolação dos enrolamentos são: as vibrações, temperatura de trabalho dos materiais isolantes impregnados, umidade, ambientes corrosivos e outros.

A combinação dos materiais isolantes aplicados na configuração do sistema de isolação dos MITs é definida a partir do conhecimento da temperatura de trabalho quando o MIT se encontra em regime de operação, a tensão nominal do MIT, a resina utilizada na impregnação, o ambiente em que o MIT irá operar bem como a aplicação do MIT.

Os materiais isolantes devem atuar como barreiras isolantes afim de impedir, limitar e direcionar as correntes elétricas, interrompendo o fluxo de corrente de um condutor para o aterramento ou para um potencial inferior. Desempenham também a função de suporte estrutural mecânico e proteção do condutor contra as influências e agressividades ambientais. Além disso, permite a dissipação do calor gerado no interior do próprio condutor. Para os materiais isolantes é necessário avaliar a máxima temperatura de trabalho suportada, resistência à tração, resistência à flexão, o seu custo, a rigidez dielétrica, absorção de umidade e índice de temperatura (Weg, 2024).

3.1.1.3.3 Placas de tecido de vidro com resina epóxi (TVE)

A fibra de vidro também conhecida como TVE, é um plástico laminado a base de tecido de fibra de vidro e resina epóxi.

Apresenta propriedades mecânica, elétricas e térmicas superiores aos outros tipos de laminados. Oferece resistência a tração, flexão e ao impacto, maior que os laminados fenólicos e, adicionalmente, possui excelente rigidez dielétrica e resistência térmica (Anelk, 2024).

Nos MITs são utilizadas na fabricação de cunhas para as máquinas, cunhas magnéticas, isolantes elétricos nas barras de saída de rotores, espaçadores, barras isolantes de conjunto porta escovas e calços.

Na Figura 14 é ilustrado a aplicação de barras do material isolante TVE como espaçador isolante entre as barras de cobre de fechamento do rotor de anéis e o eixo do rotor.

Figura 14 - Aplicação de barra isolante de TVE



Fonte: De autoria própria (2017).

Nota-se que a aplicação da placa de TVE no caso mencionado, permite a isolamento elétrico das barras de fechamento das fases do rotor bobinado para o conjunto de anéis coletores.

3.1.1.3.4 Papel meta aramida

No processo de isolamento de máquinas elétricas, o papel meta aramida é a escolha ideal para todos os tipos de motores, contribuindo para o aumento da confiabilidade do isolamento da máquina e extensão da vida útil dos MTIs.

Sua excelente resistência térmica e elevada resistência mecânica são as justificativas de sua preferência como material isolante para todos os tipos de motores corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC), abrangendo uma ampla gama de equipamentos que variam desde servo motores até os motores industriais de elevada potência, com tensão nominal de 13,6 kV (Dupont, 2024).

O papel meta aramida oferece proteção térmica superior o isolamento dos motores prevenindo a ocorrência de falhas prematuras e tempo de inatividade dos motores. O papel de meta aramida possui excelente estabilidade térmica devido à ausência de contração, fragilização, amolecimento ou fusão durante a exposição de curto prazo a temperaturas de até 300 °C. O material mantém excelentes propriedades isolantes a 220 °C por 10 anos. Essa resistência térmica elevada em alta temperatura possibilita a miniaturização e/ou a maior densidade de potência dos motores elétricos assegurando confiabilidade elétrica a longo prazo (Dupont, 2024).

A resistência mecânica e a resiliência do isolamento proporcionadas pelo papel meta aramida ajudam a estender a vida útil dos motores submetidos a condições operacionais severas, como fortes choques e vibrações intensas (ENC, 2024).

Possui compatibilidade química com todas as classes de vernizes e resinas de impregnação.

Sua aplicação estende-se desde o uso na fabricação das máquinas elétricas rotativas até o reparo corretivo e estas seguem listadas a seguir:

- Revestimento de fendas;
- Cunhas e hastes;
- Isolamento de fases;
- Isolamento do condutor;
- Separação de bobinas;
- Isolamento de polos;
- Isolamento da parede principal;
- Isolamento de giro;
- Fitas OCP.

3.1.1.3.5 Fita ou Filme de poliamida

O Filme de poliamida é desenvolvido em poliamida, material que possui diferentes propriedades, destacando-se suas propriedades isolantes e de resistência a temperaturas extremas entre -269°C a 400°C .

As propriedades únicas da poliamida permitem que ele seja amplamente utilizado na indústria de motores e fios magnéticos. A Poliamida possui excelente capacidade mecânica e elétrica que permitem designs de isolamento mais finos, conservando espaço para os condutores, o que acaba proporcionado mais potência sem aumentar o tamanho do motor (Senma, 2024).

A poliamida fornece excepcional proteção contra sobrecarga e longa vida útil do motor, mesmo nas aplicações e ambientes mais exigentes. A poliamida tem boa estabilidade química, resistente à maioria dos solventes, hidrocarbonetos, lubrificantes, resinas e vernizes. A poliamida também possui excelente propriedade retardante de chamas. Quando combinado com outros materiais, suas características de resistência à umidade e à corrosão são bastante melhoradas (Dupont, 2024).

As aplicações típicas do filme de poliamida nos motores incluem fio magnético, volta a volta, fio, bobina, revestimento de ranhura e isolamento de aterramento.

O filme de poliamida é rotineiramente utilizado em laminações com outros materiais isolantes como papel isolante, meta-aramida ou mica, bem como em fita adesiva sensível à pressão (Senma, 2024).

3.1.1.3.6 Fita de Mica

A fita de mica é um composto mineral que apresenta elevada rigidez dielétrica, sendo sua aplicação ideal para o isolamento em máquinas elétricas de alta tensão. Apresenta notável elasticidade, flexibilidade e resistência a altas temperaturas e à umidade, tornando-a um material amplamente empregado no isolamento dos motores elétricos de elevada potência (Síderos, 2024).

A utilização fita de mica na separação de condutores elétricos, visa impedir a fusão de componentes metálicos, evitando o curto circuito nos motores elétricos. Sua utilização nos MITs tem o objetivo de reduzir os riscos associados a penetração de metais nas bobinas, assegurando, assim, a estabilidade operacional e o pleno funcionamento dos MITs.

A flexibilidade da fita de mica, proporciona uma grande praticidade em sua aplicação e uma ótima superfície de deslizamento. Mesmo sob condições de temperaturas extremas, a fita de mica mantém suas características elétricas e, sua fusão, ocorre somente a temperaturas entre 1145°C e 1400°C. Essa característica a torna um material de alto desempenho em procedimentos que exijam resistência a elevadas temperaturas (Data engenharia, 2019).

3.1.1.3.7 Cadarço de Vibra de Vidro

Os cadarços ou fitas de vibra de vidro são utilizados na amarração de barras, bobinas e cabeças de bobinas estáticas e rotóricas impregnadas ou não, proporcionando maior proteção mecânica ao bobinado dos MITs. Sua utilização é combinada no acabamento final com resina epóxi ou TAC permanente (Data engenharia, 2019). Os cadarços empregados podem receber tratamentos com resinas especiais não condutoras que são conhecidos como cadarços especiais e, sua aplicação, permite o isolamento e identificação das veias e cabos elétricos dos MITs, resultando em um acabamento de alta performance e qualidade (Weg, 2024).

A Figura 15 ilustra a isolamento das cabeças de fechamento do rotórico de um motor de anéis com o cadarço de fibra de tecido de vidro impregnado com resina.

Figura 15 - Aplicação do cadarço de fibra de vidro impregnada com resina



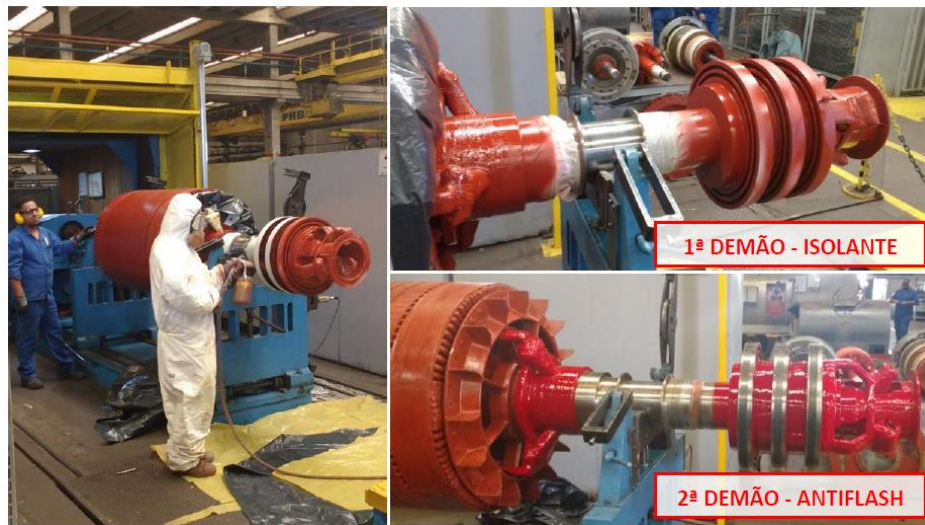
Fonte: De autoria própria (2017).

A bandagem radial da fixação das cabeças de fechamento rotor bobinado com cadarço de fibra de vidro resinada tem a função de impedir a quebra dos braços do rotórico devido à força centrífuga em alta rotação da máquina.

3.1.1.3.8 Tintas Isolantes e Antiflash

As tintas isolantes e Antiflash tem como diferencial a rápida cura e a boa resistência à corrosão. Oferece excelente resistência aos motores elétricos sujeitos a ambientes de elevada agressividade física e química. Nos MITs de média e alta tensão de rotor bobinado proporciona a redução de aderência de pó de escovas nos anéis coletores e maior resistência à fuga de corrente pela superfície. Na Figura 16 pode-se observar a aplicação da tinta isolante e da tinta Antiflash na manutenção de recuperação do isolamento do conjunto rotórico de um MIT de alta tensão da indústria cimenteira.

Figura 16 - Aplicação tinta isolante e Antiflash no rotor do MIT de alta tensão



Fonte: De autoria própria (2017)

O tratamento da superfície de isolamento com aplicação da tinta isolante e antiflash proporciona, além da proteção do dielétrico, um excelente acabamento final da isolação do motor (Data engenharia, 2019).

3.1.1.3.9 Vernizes de impregnação

A vida útil de uma máquina elétrica depende, majoritariamente, do isolamento elétrico dos seus enrolamentos. Devido as características higroscópicas dos fios esmaltados de cobre utilizados nos MITs de baixa tensão (BT) e média tensão (MT), os enrolamentos devem ser impregnados com verniz ou resina para proteção dos fios contra os efeitos da umidade que podem deteriorar o esmalte dos fios.

Uma impregnação com verniz proporciona uma superior isolação do bobinado contra os efeitos da umidade impedindo o contato dos fios com a umidade, além de proporcionar um superior isolamento elétrico das partes sob tensão do motor, melhor dissipação de calor gerado no bobinado, proteção contra agentes corrosivos e excelente estrutura mecânica ao bobinado. Finalizado o processo de cura do verniz ou da resina, o bobinado do motor deve ficar rígido, não permitindo a ocorrência de vibrações e esforços dinâmicos (Azevedo, 2000).

Os vernizes de impregnação consistem, principalmente, de resinas naturais ou sintéticas, diluídas e devem ser corretamente curados. Para evitar a ocorrência dos espaços vazios na isolação, principalmente na evaporação dos diluentes, os materiais empregados devem possuir altos teores de substâncias sólidas e baixos teores de

substâncias voláteis. Outro fator importante é a viscosidade, pois a penetração da resina nos enrolamentos e o perfeito preenchimento dos espaços depende dos limites de viscosidade da resina aplicada.

A qualidade do verniz de impregnação ou resina são fatores determinantes para a classe térmica final da isolamento. Na Figura 17 é possível visualizar os tipos de resinas atualmente mais utilizadas e suas respectivas propriedades e características (Brutsch, 1996).

Figura 17 - Exemplos de resinas existentes e suas propriedades

Tipo de Resina	Poliéster	Poliéster Imida	Epóxi híbrida	Epóxi Anidrido	Epóxi Calisado
Classe Térmica	F	H	F	F	F
Vida Útil	Média	Elevada	Média	Média - Elevada	Média - Elevada
Sensibilidade à Humidade	Não	Não	Sim	Sim	Não
Problemas de toxicidade	Estireno	Estireno	Estireno	Anidrido	-----
Temperatura de Impregnação	RT	RT	RT	40-70C	RT-60°C
Tempo de gel (120°C), min.	15-30	2-3	4-6	4-6	>100
Ciclo de Cura	Pequeno	Pequeno	Médio	Médio	Médio - Elevado
Adesão da Resina Curada	Moderada	Moderada	Boa	Boa	Boa
Propriedades Eléctricas	Moderada	Boa	Boa	Boa	Moderada - Boa

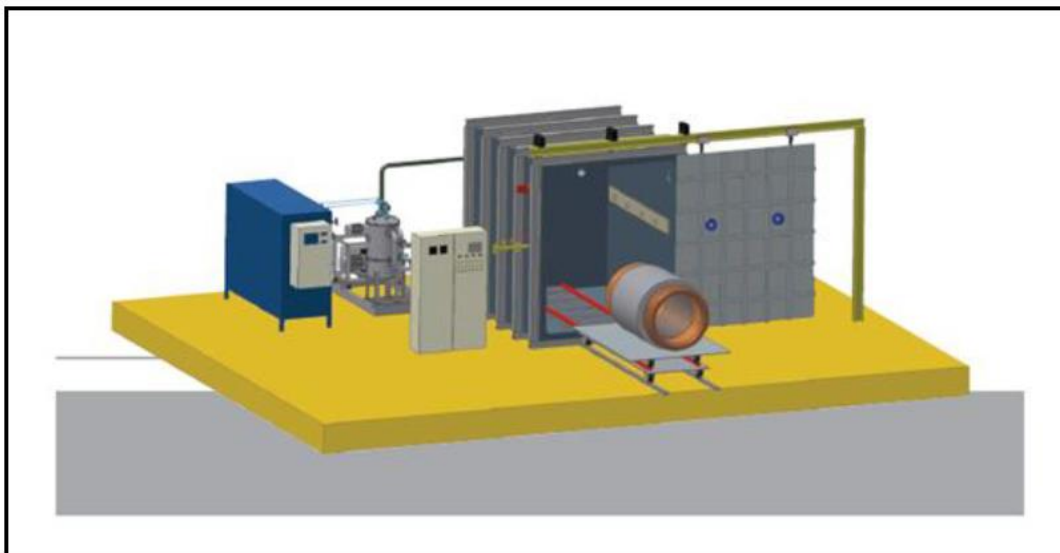
Fonte: Brutsch, (1996).

Descrito os materiais elétricos e isolantes aplicados no processo de manutenção corretiva, o processo seguinte consiste na impregnação dos enrolamentos dos MITs que obedece aos seguintes passos (Azevedo, 2000):

Secagem preliminar do bobinado:

existem dois modos de secagem preliminar dos bobinados, podendo ser realizada sob pressão normal ou à vácuo. A secagem sob pressão normal é realizada em estufa, provida de boa ventilação para permitir a retirada da umidade. A secagem à vácuo é realizada em autoclave. Na autoclave, é estabelecido o vácuo e a umidade desprendida do enrolamento é succionada e recolhida (Rodrigues, 2010). No processo de secagem preliminar o bobinado é colocado na estufa, para pré-aquecimento e secagem em um ambiente de 90°C e o tempo de secagem depende do tamanho e do tipo de bobina do estator e do rotor bobinado. A Figura 18 ilustra uma estufa de secagem à vácuo utilizado para secagem do bobinado de maquinas elétricas rotativas.

Figura 18 - Estufa de secagem do bobinado de maquinas elétricas rotativas



Fonte: A.M.S (2024).

a) Impregnação:

De acordo com Rodrigues (2010), impregnação é uma etapa de extrema importância dentro do processo de recuperação do bobinado das maquinas elétricas rotativas. O processo de impregnação é realizado com resina ou verniz isolante de aplicação em equipamentos elétricos, e devem ter classe de temperatura igual ou superior a de isolamento do MIT.

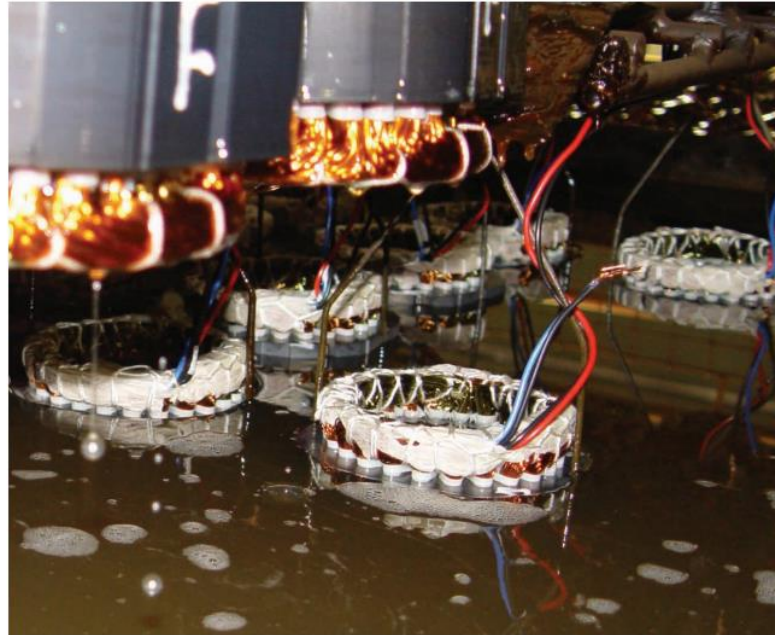
Uma boa impregnação deve cumprir quatro funções básicas para garantir um desempenho adequado e ótimo do motor elétrico, são elas:

- Preenchimento dos espaços vazios dentro das ranhuras permitindo melhor capacidade de transferência do calor gerado no bobinado.
- Aumentar a resistência mecânica do bobinado. Após o processo de cura da resina ou verniz de impregnação, o bobinado do MIT deve ficar rígido e, não permitir a ocorrência de vibrações.
- Proteção do isolamento dos produtos químicos, sujidade e umidade.
- Boa aderência aos condutores promovendo um melhor isolamento das partes sob tensão do motor.

Existem dois métodos de impregnação que são amplamente utilizados, e que atendem os requisitos básicos de uma boa manutenção: impregnação por imersão e impregnação sob vácuo e pressão (*VPI - Vacuum Pressure impregnation*). Na impregnação por imersão, o bobinado é submerso na resina ou verniz de impregnação por tempo suficiente para que a resina ou verniz penetrar nas ranhuras e preencher os espaços vazios entre as camadas isolantes removendo o ar e proporcionado boa aderência entre os condutores e o núcleo, evitando movimentações internas decorrentes de vibrações que possam danificar o isolamento. Posteriormente o MIT é colocado em estufa para cura do isolamento. O processo de impregnação por imersão é largamente utilizado em motores de baixa tensão que possuem os enrolamentos construídos por bobinas do tipo random (aleatórias). As bobinas do tipo random são utilizadas nos MITs de BT (< 1000V) e potência até 100KW. A Figura 19 ilustra o processo de impregnação por imersão em MITs de BT com bobinas do tipo random.

Na impregnação por imersão em recipiente aberto deve-se atentar para um importante detalhe do processo que é o escoamento. O escoamento deve ser realizado em local seco e permitir que todo o excesso de verniz esorra completamente do bobinado (Guedes, 2018).

Figura 19 - Processo de impregnação por imersão de MITs de BT com bobinas tipo random



Fonte – Weg (2024).

O processo de impregnação por imersão é considerado um processo simples, porém de bom resultado.

Já a impregnação por vácuo e pressão (*VPI - Vacuum Pressure Impregnation*) é um processo de maior complexidade, que exige um equipamento específico, que é uma planta de impregnação à vácuo e pressão. O VPI (*Vacuum Pressure Impregnation*) é, atualmente, a técnica que proporciona a melhor impregnação para os MITs de MT e AT e, que são construídos com bobinas Form (pré-formadas). As bobinas tipo form estão presentes nos motores com tensão ($> 1000V$) e com potência superior a 100KW. No processo de impregnação a vácuo e pressão (VPI) o motor é colocado dentro de um tanque especial, hermeticamente fechado. Este tanque está ligado a um outro tanque, onde a resina ou verniz fica armazenado a uma temperatura de 55°C. Aplica-se o vácuo no tanque onde se encontra o MIT para retirada do ar e umidade. Posteriormente pela abertura de uma válvula de comunicação entre os tanques, a resina ou verniz inunda o tanque, impregnando o enrolamento do MIT. Nesta etapa, o vácuo e a pressão submetidos ao interior do tanque, garantem que as bolhas de ar existentes no interior das ranhuras e bobinas do MIT sejam totalmente removidas. Na etapa final do processo de VPI o bobinado do MIT fica em repouso para o escoamento e a drenagem do tanque sob pressão atmosférica. Após a

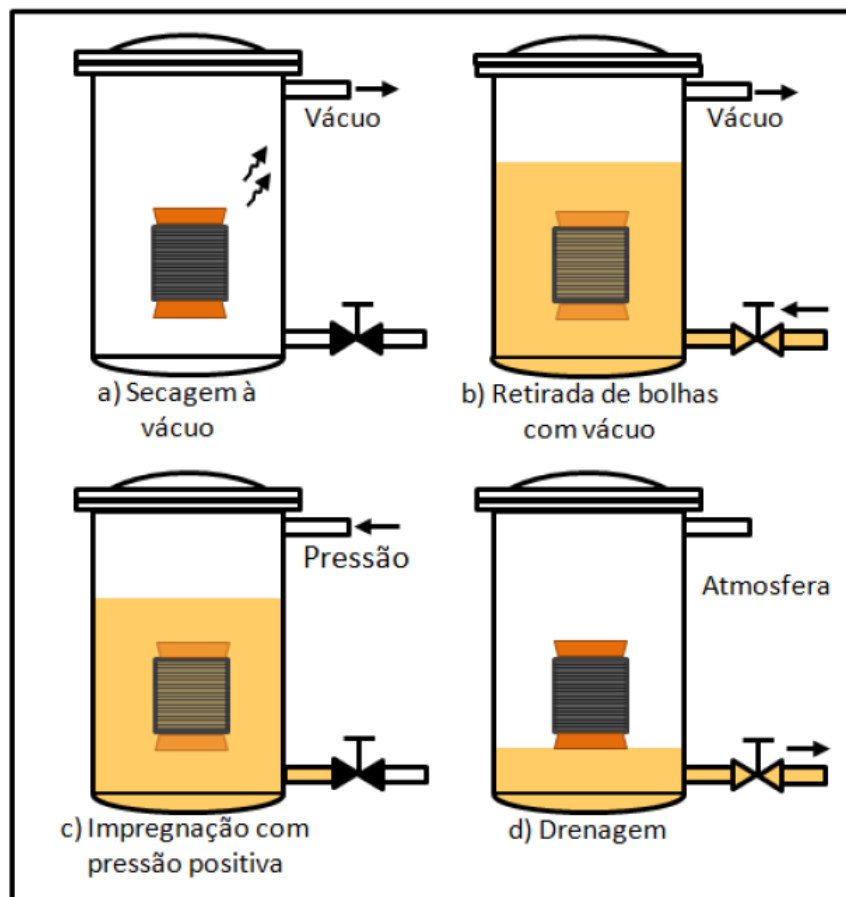
impregnação é realizado o processo de cura do isolamento da máquina elétrica através de secagem em estufa de cura a 170°C por aproximadamente 12 horas.

A vantagem do processo de impregnação VPI é que o vácuo promove melhor preenchimento das ranhuras do estator do MIT, proporcionando uma maior rigidez ao bobinado e melhor dissipação de calor das ranhuras (Rodrigues, 2010).

O processo de impregnação VPI permite não só aumentar a durabilidade do equipamento como também contribui para uma melhor eficiência energética.

A Figura 20 ilustra as etapas de impregnação através do processo de VPI (*Vacuum Pressure Impregnation*).

Figura 20 - Etapas do processo de impregnação por VPI em MITs de MT e AT



Fonte – Rodrigues (2010).

Os parâmetros do ciclo de impregnação a vácuo e pressão (VPI) devem ser bem ajustados ao tipo de MIT e ao sistema de isolamento a fim de garantir a completa impregnação e utilização otimizada de toda a instalação de impregnação VPI, e atender aos requisitos esperados das características elétricas e mecânicas das máquinas rotativas de média e alta tensão (Brutsch, 1996).

Considerações importantes relacionadas às características do projeto dos MITs e à escolha do sistema de isolamento, fita e processo VPI devem ser cuidadosamente observadas (Von Roll, 2024).

Os principais critérios a serem considerados na garantia de um bom processo de isolamento VPI são:

- Classe térmica da resina compatível com a classe de temperatura da máquina;
- Estabilidade do tanque de impregnação no processo;
- Condições de armazenamento (resfriado ou temperatura ambiente) da resina de impregnação;
- Sensibilidade da resina de impregnação VPI à umidade;
- Influência dos COVs (compostos orgânicos voláteis) no processo de cura;
- Temperatura de impregnação;
- Necessidade de cura rotativa para uniformização da resina, no caso de uso de resinas com diluentes reativos;
- Condições de cura, tempo e a taxa de aquecimento afim de reduzir os riscos de escorrimento da resina no final da impregnação.

Após o processo de manutenção corretiva na recuperação do isolamento das máquinas rotativas é necessário realizar uma sequência de ensaios fundamentais para garantir a qualidade e confiabilidade do processo de isolação do estator e/ou rotor bobinado. Os ensaios são invasivos, portanto, deve se dar especial atenção aos parâmetros de configuração do equipamento de prova para não gerar defeitos ou falhas no motor provado. Igualmente cabe salientar que estes ensaios nos asseguram a confiabilidade do equipamento por períodos prolongados, por isto é importante realizá-los.

A sequência recomendada dos ensaios realizados nos estatores e rotores bobinados, são os ensaios de resistência eléctrica do enrolamento, de resistência de isolação, de índice de polarização (PI) e absorção dielétrica (DA), de determinação de perdas dielétricas (tangente de delta), de tensão aplicada (Hi-pot rampa), de tensão aplicada (Hi-pot em degrau), de descargas parciais, de teste de surto (*Surge Test comparativo*) e de verificação dimensional e visual. Importante salientar que todos os ensaios devem ser conduzidos em conformidade com suas respectivas normas regulamentadoras (Rodrigues, 2010).

O estado da arte das técnicas e metodologias de ensaios para a avaliação do estado do bobinado do estator dos MITs e do rotor dos MITs de rotor bobinado será explorado nas próximas seções do trabalho que trata das técnicas de manutenção preventiva e preditiva de acompanhamento do estado da isolação ao longo do ciclo de vida do motor.

3.1.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é uma estratégia fundamental para garantir a operação eficiente e segura de motores elétricos em ambientes industriais. A implementação de um programa eficaz pode reduzir falhas e aumentar a vida útil dos equipamentos (Mobley, (2002)), além de permitir o aproveitamento máximo da máquina.

A importância desse tipo de manutenção está relacionada principalmente a redução de custos em manutenção corretiva e paradas na produção, sendo as paradas uma das maiores vilãs do processo produtivo, a minimização das interrupções assegura a economia de recursos, a redução de custos e o aumento na confiabilidade das entregas melhorando a satisfação dos clientes.

Programar as intervenções em motores elétricos, principalmente na indústria, é crucial para a melhor eficácia da produção, essa estratégia garante o funcionamento ideal dos equipamentos sendo a principal forma de atuação da manutenção preventiva as inspeções regulares durante as paradas programadas.

Temos algumas formas diferentes de atuação da manutenção preventiva, basicamente podemos destacar a Manutenção Baseada em Tempo (Time-Based Maintenance) – TBM e Manutenção preventiva baseada na condição (Condition-Based Maintenance) – CBM. (Mobley, (2002)).

3.1.2.1 Manutenção Baseada em Tempo (TBM).

Nesse tipo de manutenção as intervenções são realizadas baseadas no tempo de operação ou mesmo em um período pré-determinado, levando em consideração os dados do fabricante do motor elétrico ou mesmo experiências anteriores com o equipamento. Alguns aspectos importantes sobre a TBM são:

- Intervalos fixos – as intervenções são planejadas para acontecer em intervalos pré-estabelecidos independente se o equipamento apresentou algum sinal de falha.

- Enfoque em componentes críticos – alguns componentes são mais suscetíveis ao desgaste como rolamentos e vedações, por tal motivo as intervenções pelo modelo TBM são focadas na verificação desses componentes.
- Simplicidade de implantação – o fato de a intervenção somente levar em consideração o tempo simplifica o processo já que não leva em consideração nenhuma medição ou análise.
- Adoção pelos fabricantes – os fabricantes geralmente fornecem esse tipo de cronograma de manutenção levando em consideração o regime ideal de trabalho do equipamento, a partir desse modelo é possível personalizar as intervenções de acordo com a aplicação do motor.
- Desvantagem: Sub ou Supermanutenção: Apesar de muito eficiente na maioria das aplicações, a TBM pode levar a submanutenção ou supermanutenção (Mobley, (2002)). A submanutenção ocorre quando o equipamento trabalha em regime mais intenso e seus componentes se desgastam antes do prazo determinado levando a falhas, já a supermanutenção ocorre quando há a substituição de componentes quando os mesmos ainda oferecem boas condições de funcionamento levando a elevação de custos e desperdício de recursos.
- Confiabilidade – oferece uma boa confiabilidade, pode não ser superada nesse quesito por manutenções do tipo preditiva que envolvem sensoriamento e tecnologia avançada, porém em ambientes industriais que envolvam pouca complexidade apresenta bons resultados (Mobley, (2002)).

3.1.2.2 Manutenção preventiva baseada na condição (CBM)

Nesse tipo de manutenção as intervenções são realizadas baseadas nos resultados obtidos pelo monitoramento do equipamento aplicados na manutenção preditiva, a partir dessas medições os indicadores mostram a necessidade de manutenção. Fundamentada na análise de dados operacionais, a CBM substitui a abordagem tradicional de manutenção por intervalos fixos, adaptando-se à taxa de desgaste real de cada equipamento. Essa prática é especialmente vantajosa em aplicações críticas, como motores elétricos de grande porte, onde uma falha pode resultar em paradas de produção dispendiosas e altos custos de reparo (Mobley, 2002). Alguns aspectos importantes sobre a CBM são:

- Monitoramento contínuo – os dados obtidos em tempo real permitem um diagnóstico antecipado de uma possível falha, esses dados podem ser de temperatura, vibração, ruído e em caso de motores elétricos a medição de grandezas. Esses dados são comparados com padrões históricos, possibilitando a identificação precoce de potenciais problemas, como aquecimento excessivo, que pode indicar falta de lubrificação, ou vibrações anormais, que sugerem desgaste em rolamentos (Hernandez et al., 2015).
- Intervenção baseada em dados – a manutenção é feita somente quando os dados obtidos indicam princípio de falha quando comparado aos dados históricos do equipamento, a programação da intervenção no momento certo contribui para que os gestores mantenham o foco em problemas críticos que estão mais próximos de acontecer. (Pintelon & Van Puyvelde, 2006).
- Redução de custos – garante que o equipamento trabalhe com o melhor aproveitamento possível, evita a substituição de peças que ainda oferecem condições de trabalho e reduz paradas desnecessárias.
- Confiabilidade - A análise contínua dos motores melhora sua confiabilidade e evita paradas não planejadas, permitindo que intervenções sejam programadas antes de ocorrerem falhas críticas (Mobley, 2002).

3.1.2.3 Importância da Manutenção Preventiva em Motores Elétricos

- **Confiabilidade** – O aumento da confiabilidade no processo produtivo é um dos pilares da indústria e o processo depende muito dos motores elétricos trabalhando com maior eficácia possível. A manutenção preventiva pode reduzir significativamente as falhas inesperadas. Um estudo mostrou que a aplicação dessa prática diminui em até 40% as falhas em motores elétricos. (Hernandez, J. et al. (2015). 'Impact of Preventive Maintenance on Motor Failures.' Journal of Industrial Maintenance, 22(4), 45-52.).
- **Vida Útil** – Motores elétricos apresentam vida útil prolongada se mantidos da maneira correta, a manutenção preventiva visa conservar os equipamentos para que os mesmos ofereçam condições de funcionamento adequadas durante o maior tempo possível, além de garantir que não ocorram falhas que podem reduzir a vida útil ou até mesmo condenar o equipamento.

- **Redução de custos** - A longo prazo, a manutenção preventiva pode levar a economias de até 30% nos custos operacionais em comparação com a manutenção corretiva (Pintelon, L., & Van Puyvelde, F. (2006).). Manutenções corretivas envolvem, além dos gastos relacionados aos reparos, os gastos com as paradas não planejadas.
- **Segurança** – A manutenção preventiva aumenta a segurança no ambiente de trabalho tanto no aspecto produtivo quanto no aspecto referente ao planejamento de realização de atividades de manutenção.

3.1.2.4 Práticas de manutenção preventiva em motores elétricos

3.1.2.4.1 Preventiva mecânica

A manutenção preventiva das partes mecânicas de um motor elétrico envolve principalmente limpeza e lubrificação

3.1.2.4.1.1 Limpeza

A limpeza garante que o sistema de ventilação funcione perfeitamente, permitindo a circulação de ar pelas aletas, tampa defletora e pás do ventilador, mas além da circulação externa é importante realizar a limpeza interna para eliminar contaminantes como óleo, graxa, poeira ou qualquer outro tipo de material que dificulte a troca de calor do motor com a parte externa e que possam interferir na resistência de isolamento do motor ou prejudicar componentes internos.

- **Aletas de ventilação**

Estão localizadas na parte externa do motor e muito susceptíveis a contaminação e acúmulo de material, são responsáveis por aumentar a área de troca de calor da carcaça com o ambiente externo servem para que o ar empurrado pelo ventilador passe por elas, por esse motivo é importante mantê-las limpas.

- **Tampa defletora**

Direciona o ar do ventilador para as aletas, geralmente acumula material arremessado pelo ventilador reduzindo sua eficiência.

- **Ventilador**

Aspira o ar e empurra para o resfriamento do motor, pode ocorrer falha devido a aspiração de partículas sólidas.

- **Interno do motor**

Deve ser mantido limpo para garantir a troca de calor e manter a resistência de isolamento, a contaminação pode ocorrer quando há alguma falha nos mancais e/ou rolamentos e o lubrificante se espalha na parte interna.

3.1.2.4.1.2 Lubrificação

A lubrificação consiste na aplicação de substâncias capazes de reduzir o atrito nos mancais do motor, essas substâncias são definidas de acordo com o ambiente, regime de trabalho e tipo de motor, geralmente as informações sobre os lubrificantes são definidas pelo fabricante, os mais comuns são o óleo e a graxa, aplicados nos mancais que podem ser de bucha ou de esferas.

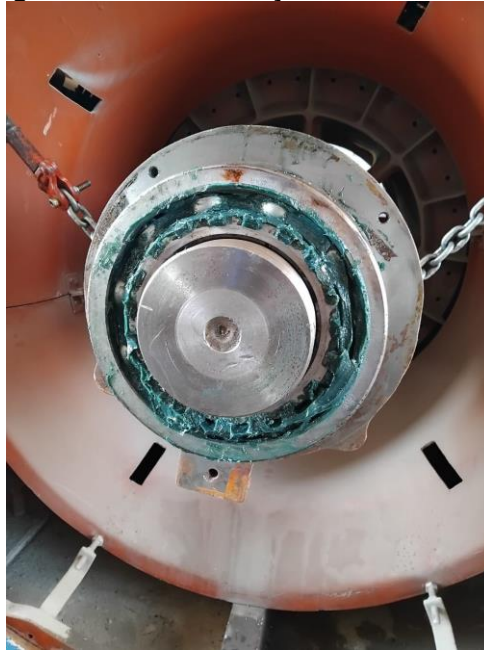
- **Mancais de bucha**

Deve ser lubrificado de acordo com a orientação do fabricante usando o lubrificante especificado, quando aplicável o óleo deve manter o nível estabelecido e estar com boa viscosidade, as folgas devem ser verificadas para garantir que o eixo se mantenha na posição e não haja diferença nos entreferros.

- **Mancais de esferas**

São mancais onde se aplicam rolamentos e lubrificação através de graxa, por ser um lubrificante com alta viscosidade diminui a chance de vazamento e contaminação, os rolamentos não estão sujeitos ao mesmo nível de atrito em relação aos mancais de bucha por isso tem vida útil superior, porém exigem cuidados especiais na montagem e desmontagem, pois podem sofrer avarias se o processo não for realizado da maneira correta. A Figura 21 ilustra um mancal de esferas aberto e seu respectivo rolamento lubrificado no processo de manutenção preventiva de um motor elétrico.

Figura 21 - Lubrificação de rolamento



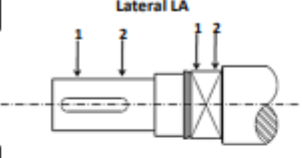

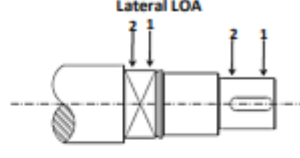
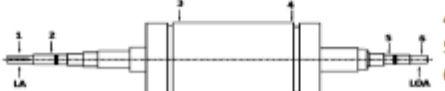
Fonte: De autoria própria (2024).

A aplicação de graxa nos rolamentos deve seguir as especificações e quantidades recomendadas pelo fabricante do motor ou no plano de manutenção elaborado de acordo com os dados históricos do equipamento.

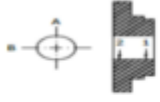

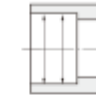
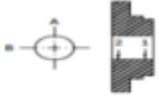
3.1.2.4.1.3 Medições de folga no eixo e mancais

Realizar as medições mecânicas no equipamento diminui as chances de desgaste prematuro de outros componentes, reduz vibração e aquecimento, o acompanhamento das medidas deve ser feito em todos os pontos onde possa acontecer possíveis desgastes Na Figura 22 é possível verificar o relatório das medições realizadas num motor GEVISA 415 KW – 440 V – 1489 RPM.

Figura 22 - Relatório técnico final do Motor de Indução Gevisa

Medições Mecânicas no Eixo						
						
Posição	Referência (mm)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Média (mm)	Condição	
Sede do Acoplamento	-	110,03	110,03	110,03	Aprovado	
Sede do Rolamento LA	120,01 – 120,03	120,04	120,04	120,04	Aprovado	
Sede do Rolamento LOA	120,01 – 120,03	120,03	120,03	120,03	Aprovado	
Sede Ventilador Externo	-	-	-	-	N/A	
Run-Out						
1	0,07			4	0,10	Condição
2	0,01			5	0,02	
3	0,10			6	0,01	Aprovado

4.2 – Acoplamento, Mancais e Ventiladores Iniciais

Medições Mecânicas dos Mancais					
					
Acoplamento		Tampa Principal LA		Tampa Principal LOA	
					
Ventilador Externo					
Posição	Referência (mm)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Média (mm)	Condição
Acoplamento	-	110,05	110,05	110,05	Aprovado
Tampa Principal LA	215,00 – 215,03	215,20	215,20	215,20	Reprovado
Tampa Principal LOA	215,00 – 215,03	215,20	215,20	215,20	Reprovado
Sede Ventilador Externo	-	-	-	-	N/A

4.3 – Rolamentos

Sede	Modelo	Marca	Condição
LA	6224 C3	SKF	Reprovado
LOA	6224 C3	SKF	Reprovado
Lubrificante	SHELL ALVANIA R2		-

Fonte: Data engenharia (2024)

Na imagem é possível perceber que o rotor e o acoplamento estão dentro das tolerâncias exigidas, entretanto as tampas não atendem as medidas e necessitam de uma ação corretiva.

3.1.2.4.2 Preventiva Elétrica

A preventiva na parte elétrica de um motor deve abranger primeiramente o motor considerando o interno e externo do mesmo, mas é importante também considerar todo o caminho até o motor como, disjuntores, inversores, fusíveis, cabos, terminais, sensores e qualquer outro componente que faça parte do acionamento.

3.1.2.4.2.1 Medições elétricas

Medir a resistência dos enrolamentos em relação a terra para verificar a integridade dos enrolamentos. O valor da resistência de isolamento é útil para indicar

se o motor está em condições adequadas para ser submetido a ensaios dielétricos ou para ser colocado em funcionamento ou para fins de manutenção. (NBR 5383-2). Na Figura 23 é mostrado um motor em que o técnico de manutenção realiza as medições de resistência de isolamento com uso do megômetro.

As medições da resistência de isolamento são afetadas pelos seguintes fatores:

- estado da superfície;
- umidade;
- temperatura;
- magnitude da tensão contínua de ensaio;
- duração da aplicação da tensão contínua de ensaio;(NBR 5383-2).

Figura 23 – Megômetro



Fonte: De autoria própria (2024).

Um valor mínimo de resistência de isolamento geralmente aceito é:

Para motores com tensão nominal até 1000V:

- Resistência de isolamento mínima (M Ω) é dada pela divisão da tensão nominal por mil e somado 1M Ω ao resultado.

Motores de média e alta tensão (acima de 1000 V):

- A resistência de isolamento mínima deve ser **acima de 100 M Ω** .
- Para motores de alta tensão, a resistência de isolamento de qualidade geralmente está na faixa de 500 M Ω ou mais. (**Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)**).

3.1.2.4.2.2 Reaperto de conexões

Reapertar as conexões elétricas para evitar falhas e aquecimento das mesmas, conexões frouxas que podem causar baixa eficiência e reduzir a vida útil do motor (Figura 24).

Figura 24 - Reaperto conexões



Fonte: De autoria própria (2024).

É importante verificar se a prensagem dos terminais está adequada e se não há avarias no isolamento dos cabos aumentando as chances de fuga e curto-circuito.

3.1.2.4.2.3 Restauração da vedação da caixa de ligação

Manter a vedação da caixa de ligação garante que não haverá contaminação e nem umidade no local, é importante observar com atenção a vedação da entrada dos cabos.

3.1.2.4.2.4 Verificação do Sistema de Escovas

Quando aplicável é imprescindível verificar se o sistema de escovas está desgastado e se atende as tolerâncias especificadas pelo fabricante, isso garante um bom funcionamento e evita um desgaste prematuro do comutador.

3.1.2.4.2.5 Verificação de Proteções Elétricas

A manutenção preventiva também deve ser aplicada aos sistemas de proteção dos motores para garantir que o equipamento esteja resguardado em caso de alguma falha, evitando maiores problemas ou até mesmo a perda do equipamento.

3.1.2.4.3 Manutenção Preventiva aplicada a motores de grande porte

A manutenção preventiva em motores de grande porte é essencial para garantir o desempenho e a longevidade desses equipamentos, levando em consideração que são motores que estão a muito tempo em operação ou que a pretensão é que trabalhem por muitos anos, são equipamentos que tem custo elevado para aquisição e implantação e geralmente são aplicados em equipamentos vitais à produção industrial (Mobley, (2002).

As práticas de manutenção preventiva nesses equipamentos devem seguir o que foi apresentado acima junto com outras práticas específicas para esse tipo de motor, algumas delas são:

3.1.2.4.3.1 Verificação e reaperto das conexões elétricas

A prática do reaperto das conexões em motores de grande porte garante a continuidade da condução elétrica evitando aquecimento pelo aumento da resistência ôhmica no contato, um reaperto adequado deve acontecer após uma verificação detalhada se há contaminação do contato, sinais de aquecimento, problemas com a prensagem de terminais, após a verificação o reaperto deve ser realizado com o auxílio de um torquímetro configurado para aquela aplicação, evitando que a conexão sofra afrouxamento.

3.1.2.4.3.2 Vedação

Verificar a vedação em todo o motor prevenindo a entrada de umidade e contaminantes que podem reduzir a resistência de isolamento, provocar oxidação e danificar componentes internos como o anel coletor, escovas, contatos elétricos e rolamentos.

3.1.2.4.3.3 Medição de resistência ôhmica entre fases

A medição de resistência entre fases do motor deve ser realizada através de um instrumento chamado microhmímetro, ele é capaz de medir baixas resistências com alta precisão, com uma resolução que pode chegar as frações de micro-ohms. O microhmímetro é crucial para identificar falhas em conexões elétricas e alta resistência de contato que podem comprometer a integridade do motor elétrico. O processo de medição deve ser feito entre duas fases por vez, por exemplo, fases U e V, fases V e W e fases W e U, os resultados devem apresentar valores próximos de resistência e equilibrados entre as fases medidas (Mobley, (2002).

Em caso de discordâncias maiores que 2 %, deve ser pesquisada a existência de anormalidade, tais como: espiras em curto-circuito, número incorreto de espiras, dimensões incorretas dos condutores, conexões e contatos em más condições (NBR 5383-2:2007), além disso os resultados devem ser comparados com medições anteriores para avaliação de alguma anomalia que possa acontecer futuramente.

As medições devem ser realizadas após algum tempo de inatividade do motor para que o motor esteja uniformemente resfriado próximo a temperatura ambiente, evitando falsas leituras devido ao aquecimento interno. Em motores com rotor bobinado a medição deve ser feita tanto no estator quanto no rotor.

3.1.2.4.3.4 Estado geral das escovas

A manutenção preventiva das escovas de motores elétricos é crucial para garantir o funcionamento eficiente e seguro do equipamento. As escovas, que fazem parte do sistema de coleta de corrente, são responsáveis por transmitir energia elétrica para o rotor do motor. Alguns aspectos a serem observados são:

- **Inspeção visual** – Observar se a escova está bem posicionada, alinhada ao anel coletor, se não há sinais de desgaste na lateral devido a vibração, e verificar alteração na cordoalha e em seus terminais de contato.
- **Desgaste** – Verificar as medidas da escova, esse dado deve respeitar as orientações do fabricante, o desgaste excessivo pode afetar a eficiência do motor e levar a falhas. As escovas devem ser substituídas antes que atinjam o limite mínimo de espessura especificado pelo fabricante (NBR 5392, 2010), é importante estar atento que ao realizar a troca da escova é necessário fazer a curvatura do anel coletor na área de contato da escova para evitar centelhamento.

- **Temperatura** - Monitorar a temperatura das escovas durante a operação. Temperaturas elevadas podem indicar problemas de contato ou sobrecarga (Mobley, 2002), uma forma de identificar se a escova está sofrendo aquecimento é observar se há mudança na coloração da cordoalha da escova.

- **Verificar o tensionamento da mola da escova** - Verificar o tensionamento da mola da escova de um motor elétrico é fundamental para garantir um contato adequado entre a escova e o anel coletor, o que, por sua vez, influencia a eficiência e a vida útil do motor. A ferramenta que pode ser usada para realizar essa medição é o dinamômetro, com ela é possível avaliar qual a força exercida pela mola, os valores devem respeitar as recomendações do fabricante.

3.1.2.4.3.5 Pátina do anel coletor

A observação da pátina do anel coletor em motores elétricos é uma parte fundamental da manutenção preventiva, pois a condição do anel coletor pode impactar diretamente o desempenho do motor. A pátina refere-se ao desgaste e ao acúmulo de resíduos na superfície do anel coletor, que podem afetar o contato elétrico entre as escovas e o comutador.

- **Inspeção visual** - Realizar uma inspeção visual detalhada do anel coletor, buscando sinais de desgaste, manchas ou alterações de cor que podem indicar a presença de pátina. A superfície deve ser lisa e uniforme. Qualquer irregularidade pode sinalizar problemas no funcionamento (NBR 5392, 2010). A pátina ideal deve ter uma coloração uniforme, geralmente um tom marrom ou cinza escuro, resultante do desgaste natural. A ausência de manchas ou descolorações irregulares indica uma condição saudável.

3.1.2.4.3.6 Desgaste mecânico do anel coletor

Identificar o desgaste no anel coletor de um motor elétrico é fundamental para garantir o desempenho eficiente do motor e evitar falhas. O desgaste pode afetar o contato elétrico entre as escovas e o comutador, resultando em perda de eficiência e possível superaquecimento. As ferramentas para realizar a medição podem ser um paquímetro de precisão ou um micrometro, os resultados devem atender as tolerâncias especificadas pelo fabricante, em caso de não conformidade o reparo ou substituição deve ser programado.

3.1.2.4.3.7 Limpeza de depósito de material das escovas

As escovas sofrem desgaste naturalmente devido a sua função de contato e lubrificação da pátina, o desgaste libera um pó fino com características condutoras, esse pó se espalha internamente no motor, as consequências são redução da resistência de isolamento, contaminação de rolamentos e risco de formação de arcos elétricos principalmente em motores de média tensão.

3.1.2.4.3.8 Rejuvenescimento dos enrolamentos

A aplicação desse tipo de manutenção pode ser bem específica, por ser uma manutenção que envolve uma intervenção maior, geralmente é aplicada a motores de grande porte com o intuito de aumentar a vida útil e reestabelecendo a integridade do isolamento interno do equipamento.

Para definir o momento correto da realização do procedimento é necessário observar uma série de fatores, como: ambiente de trabalho, níveis de umidade e contaminantes, recomendações do fabricante e principalmente as leituras de resistência de isolamento interno do motor. O instrumento utilizado para realização deste ensaio é o megômetro. Os ensaios de resistências de isolamento são realizados com tensões continua, com amplitude que depende da magnitude da tensão do MIT a ser ensaiado. Conforme ilustrado na Figura 25, os valores aplicados para testes de resistência de isolação são definidos de acordo com as recomendações da norma IEEE Std 43-2000.

Figura 25 - Tensões aplicadas no Megômetro

Tensão nominal de operação (V)	Tensão DC aplicada para o teste megohm (V)
< 1000	500
1000-2500	500 – 1000
2501-5000	1000 – 2500
5001-12000	2500 – 5000
> 12000	5000 – 10000

Fonte: Weg (2024).

A aplicação da faixa de tensão correta diminui a chance de falsos resultados ou até mesmo danos no isolamento devido a aplicação de tensões muito superiores ao projeto do motor. Na Figura 26, é ilustrado a tabela orientativa contendo os critérios de avaliação dos valores limites de resistência de isolamento para avaliação das condições do isolamento do motor elétrico de acordo com as recomendações da

norma IEEE Std 43-2000. A tabela orientativa é uma excelente ferramenta que deve ser utilizada na rotina de manutenção preventiva dos motores elétricos, no intuito de auxiliar e direcionar os diagnósticos diante dos resultados obtidos nas medições efetuadas em campo ou oficinas de manutenção.

Figura 26 - Resistências referência

Teste de Resistência de Isolamento - Motor de Baixa Tensão		
Valor da Resistência do Isolamento (MΩ)		Avaliação do Isolamento
Maior ou igual	Menor	
-	2	Perigoso
2	50	Ruim
50	100	Problemático
100	500	Bom
500	1000	Muito bom
Acima de 1000		Excelente

Fonte: Weg (2024).

A impregnação é feita através da aplicação de um banho de verniz nos enrolamentos do motor, recomenda-se o processo de impregnação sob vácuo para garantir que todo o enrolamento será envolvido sem a presença de bolhas. O processo de impregnação sob vácuo foi explorado de maneira detalhada no tópico anterior deste trabalho que trata da manutenção corretiva nos motores elétricos.

3.1.2.4.3.9 Surg Test (Teste de surto)

O teste de surto é um procedimento utilizado para avaliar a integridade isolante de motores elétricos, transformadores e outros equipamentos elétricos. O objetivo principal deste teste é identificar a presença de falhas de isolamento que podem causar falhas de equipamento e interrupções na operação. O teste consiste em aplicar uma tensão maior que a tensão nominal do equipamento, os resultados definem se o motor é capaz de suportar um surto de tensão e também podem indicar problemas de isolamento que não são detectados pelo megômetro.

3.1.2.4.3.10 Teste HIPOT (*High Potential Test*)

O teste HIPOT é um procedimento crítico utilizado para avaliar a integridade do isolamento de motores elétricos e outros equipamentos elétricos. Este teste aplica uma tensão elétrica alta entre os condutores e a terra, ou entre os enrolamentos do motor, para verificar a resistência do isolamento e garantir que não haja falhas que possam levar a curtos-circuitos ou falhas de equipamentos, é um teste arriscado, caso

o equipamento esteja em início de falha o teste danificará o isolamento inutilizando o equipamento, portanto recomenda-se que seja aplicado somente em equipamentos novos ou em equipamentos fora de operação.

3.1.2.4.4 Resultados da aplicação da manutenção preventiva

Os resultados obtidos com um bom plano de manutenção preventiva em motores elétricos, especialmente em motores de grande porte, podem ser amplamente benéficos. Aqui estão alguns dos principais resultados:

- **Aumento da Disponibilidade Operacional**

Um plano de manutenção preventiva bem implementado aumenta significativamente a disponibilidade operacional dos motores. Isso significa menos paradas não programadas, resultando em maior produtividade e eficiência nas operações industriais.

- **Redução de Custos com Manutenção Corretiva**

Com a adoção de um plano de manutenção preventiva, as empresas frequentemente experimentam uma redução nos custos relacionados à manutenção corretiva. Isso ocorre porque a detecção precoce de falhas permite reparos menores e menos dispendiosos, além de evitar danos severos que poderiam levar à substituição do equipamento.

- **Prolongamento da Vida Útil dos Equipamentos**

Um bom plano de manutenção preventiva contribui para o aumento da vida útil dos motores elétricos. As inspeções regulares e a manutenção programada ajudam a identificar e corrigir problemas antes que se tornem críticos, garantindo que os motores operem dentro de suas especificações por mais tempo.

- **Melhoria da Eficiência Energética**

A manutenção regular, como a lubrificação adequada e o alinhamento correto, pode melhorar a eficiência energética dos motores. Motores bem mantidos consomem menos energia, resultando em economia significativa de custos operacionais e reduzindo o impacto ambiental.

- **Maior Segurança no Local de Trabalho**

Com a implementação de práticas de manutenção preventiva, é possível reduzir os riscos associados a falhas de equipamentos. Isso se traduz em um

ambiente de trabalho mais seguro, com menos acidentes e interrupções devido a falhas de equipamentos.

- Aumento na Confiabilidade do Sistema

A manutenção preventiva aumenta a confiabilidade dos sistemas de produção. Os motores operam de maneira mais estável e previsível, o que é crucial em ambientes industriais onde a continuidade é vital.

- Melhores Dados e Insights Operacionais

Um bom plano de manutenção preventiva gera um registro detalhado das atividades realizadas, permitindo análises futuras e a identificação de tendências. Isso ajuda na tomada de decisões informadas e na otimização de estratégias de manutenção.

- Redução do Tempo de Inatividade

A manutenção planejada evita o tempo de inatividade não programado, resultando em operações mais contínuas e eficientes. Isso é particularmente importante em indústrias onde a produção não pode ser interrompida facilmente.

3.1.3 Manutenção Preditiva

3.1.3.1 Manutenção Preditiva de Motores Elétricos

A manutenção preditiva (também conhecida como manutenção preventiva condicional) é aquela em que as intervenções estão condicionadas a algum dado ou informação reveladora do estado de degradação ou nível de desgaste do sistema ou equipamento.

Trata-se de um tipo de manutenção em que as inspeções periódicas se limitam a monitoração de parâmetros que possam determinar o estado operacional da máquina. Assim, se na análise desses parâmetros ocorrer uma modificação na condição e no desempenho de operação da máquina, estima-se a tendência evolutiva do defeito e programa-se uma intervenção com a parada programada da máquina (Junior, 2004).

A manutenção preditiva aplicada em motores elétricos desempenha um papel crucial na operação eficiente e na longevidade do equipamento. De acordo com Junior (2004), a adoção da manutenção preditiva significa que as intervenções sobre a máquina serão de forma condicional, ou seja, somente se os parâmetros de controle

evoluírem de forma significativa para níveis que sejam considerados perigosos e não admissíveis.

Como a característica básica do processo de manutenção preditiva ou condicional consiste no monitoramento de parâmetros que caracterizam o estado de funcionamento das máquinas, os métodos empregados envolvem técnicas e procedimentos de medição, acompanhamento e análise desses parâmetros (Junior, 2004). Os parâmetros mais utilizados para monitoramento da condição das máquinas e equipamentos são as análises termográficas (processo que consiste na análise da temperatura dos equipamentos ou componentes), análises tribológicas (análises de óleo, ferrografia que consiste na análise da presença de detritos de provenientes do desgaste de peças em contato), Ultra-sons (técnica que permite diferenciar ruídos e localizar defeitos em peças como rolamentos, etc.), análise de vibrações (técnica que permite determinar o estado dos componentes através da análise na distribuição da sua energia vibratória, facilitando assim a predição do defeito), análise de corrente elétrica em motores de corrente alternada (CA) (Dias, 2010).

A manutenção preditiva é importante porque: Reduz os custos de manutenção, aumenta a disponibilidade dos equipamentos, minimiza o tempo de inatividade e melhora o rendimento geral das máquinas.

De forma mais direta, manutenção preditiva prediz as condições das máquinas e quando é detectada a necessidade de intervenção o que se faz, na realidade, é uma manutenção corretiva planejada (Kardec & Nascif, 2012). Assim, as vantagens e os objetivos da manutenção preditiva são:

- Aumentar do tempo médio entre cada revisão;
- Eliminar as desmontagens desnecessárias para inspeção;
- Reduzir os índices de reparações emergenciais não planejadas;
- Aproveitar a vida útil dos componentes e equipamentos na sua totalidade;
- Diminuir os custos de intervenção;
- Diminuir o estoque de peças de reposição;
- Aumentar o grau de confiança no desempenho do equipamento ou da linha de produção.

A manutenção preditiva nos motores elétricos não apenas assegura uma operação mais confiável e segura, é principalmente uma estratégia inteligente para maximizar o retorno sobre o investimento no ativo.

Na sequência, será apresentado de modo detalhado, os métodos empregados, as técnicas e os procedimentos de manutenção preditiva utilizados na manutenção dos motores elétricos.

3.1.3.1.1 Termografia

A manutenção a partir da termografia em motores elétricos se dá através da utilização de câmeras termográficas, que fazem uma análise da temperatura dos motores elétricos além de painéis de comando, e também outros dispositivos elétricos e eletrônicos em que, seu funcionamento se dá através de circuitos termoelétricos.

" A inspeção termográfica em motores industriais é uma técnica vital para a manutenção. Ela utiliza a termografia infravermelha para identificar variações de temperatura e detectar potenciais problemas antes que levam a falhas catastróficas". (Engefaz, 2024).

Na Figura 27, é ilustrado um exemplar de uma câmera de imagem térmica ou termovisor, instrumento utilizado para análise de Termografia elétrica e mecânica.

Figura 27 – Câmera de imagem térmica



Fonte: Teleyne Flir (2024).

Para a manutenção preditiva, a termografia em motores elétricos é de suma importância, visto que a termografia é uma análise muito mais crítica no ponto de se detectar alguma falha interna do motor, ou seja, nos seus componentes interno.

"A termografia em motores elétricos é uma ferramenta poderosa para a manutenção preditiva, permitindo a correção de problemas antes que se tornem críticos. Além disso essa técnica contribui para a eficiência energética e a prolongação da vida útil dos motores" (Santos, 2016).

Na Figura 28, é ilustrado outro modelo de uma câmera termográfica de infravermelho de apontar com empunhadura manual. O modelo de apontar é um termovisor robusto que permite a captura de imagens térmicas e que podem auxiliar os termografistas a fazer as inspeções com maior eficiência. Os termovisores mais modernos, na sua maioria, possuem tela sensível ao toque com excelente resolução térmica, permitindo a localização e identificação de problemas rapidamente, através da geração de imagens térmicas vibrantes. Estes termovisores simplificam o fluxo de trabalho dos termografistas, permitindo edição e organização das fotos, inserção de notas detalhadas do ponto monitorado e carregamento dos arquivos da inspeção diretamente na nuvem para acesso prático de qualquer dispositivo eletrônico. Os termovisores modernos permitem ainda, o compartilhamento de imagens com o cliente e criação de relatórios avançados de maneira rápida em softwares dedicados dos fabricantes.

Figura 28 – Câmera termográfica infravermelha de apontar



Fonte: Teleyne Flir (2024).

Os termovisores são instrumentos usados para aferir temperatura dos motores elétricos, ou qualquer outra análise que se precise aferir condições de temperatura. Os termovisores permitem a reprodução de uma imagem térmica completa, nítida, com características de luz visível que permite ao inspetor termografista reconhecer instantaneamente onde encontra-se o padrão de calor problemático no interior do motor elétrico.

3.1.3.1.1.1 Porque investir em uma análise termográfica?

Para a total proteção dos ativos, assim fazendo-o a confiabilidade aumenta, deixando uma maior segurança de uso nos ativos.

Além disso a termografia também é responsável por: Aumentar a confiabilidade do sistema; minimizar riscos de falhas e danos irreversíveis; evitar a ocorrência de incêndios; evitar paradas não programadas e perdas de produtividade; diminuir riscos de segurança; evitar manutenções corretivas emergenciais; aumentar a eficiência

energética; garantir conformidade com normas regulamentadoras e normas técnicas (da Silva, 2023).

Na Figura 29, é ilustrado um termovisor sendo utilizado para a análise termográfica de painéis elétricos, isto é, para a medição de temperatura e checagem até mesmo das ligações dos circuitos a fim de poder ver através das imagens do termovisor as conexões interrompidas ou mal conectadas, entre outras ocorrências.

Figura 29 - Termovisor em análise termográfica de painel elétrico



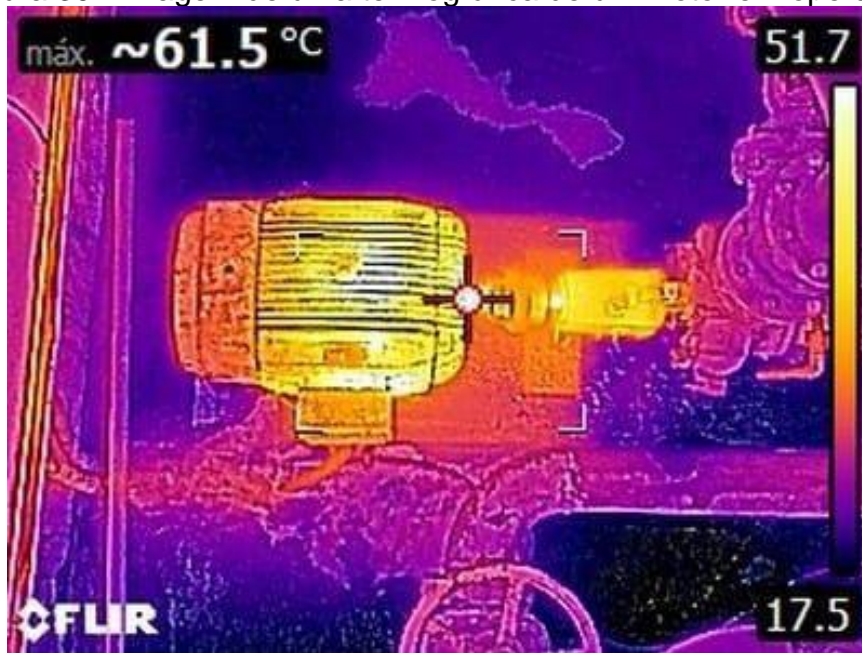
Fonte: Da Silva (2023).

A análise termográfica se dá de forma visual utiliza-se um aparelho com câmeras térmicas capazes de uma visão termal dos componentes que estão dentro dos motores, esse equipamento é o termovisor.

Segundo da Silva (2023), "Os termovisores captam a radiação infravermelhas dos sistemas e as transformam em imagens térmicas, chamadas de termogramas, que indicam quais pontos do sistema apresentam excesso de calor, através de uma escala de cores".

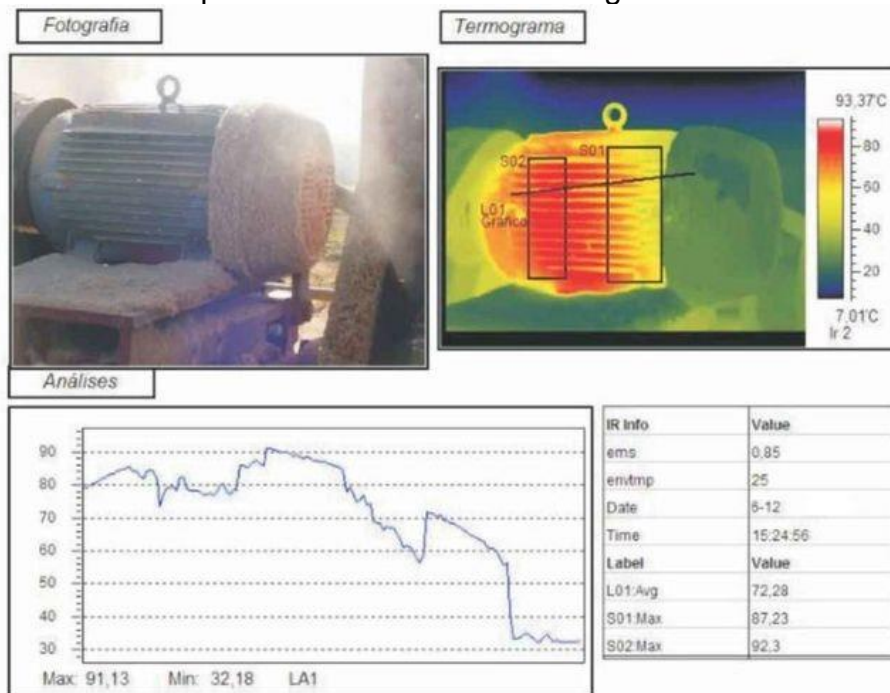
As Figuras 30 e 31 mostram as imagens térmicas obtidas durante inspeção preditiva termográfica de motores elétricos. A termografia em motores elétricos permite a visualização da imagem térmica dos componentes que constituem o motor elétrico, podendo apontar falhas em rolamentos, enrolamentos estáticos e conexões elétricas em caixas de conexões.

Figura 30 - Imagem de uma termográfica de um motor em operação



Fonte: Teleyne Flir (2024).

Figura 31 - Exemplo de uma análise de termográfica em motor elétrico



Fonte: Engfaz (2024).

No mercado há uma ampla e infinita variedade de modelos de termovisores, o que dificulta na escolha da melhor opção, no entanto, a pontos que se deve destacar como a resolução, detecção automática de pontos quentes, foco, medições precisa,

sensibilidade térmica, possibilidade de inserir notas detalhadas nas imagens, salvamento de fotos em nuvem e criação dinâmica de relatórios.

As Figura 32 e 33 nos mostram os modelos 865 e 868 de termógrafo ou termovisor da marca TESTO, os termovisores ilustrados nas figuras possuem baixa resolução, quando comparados com a gama de modelos ofertados no mercado, no entanto, os equipamentos já possuem os recursos necessários que permitem o diagnóstico de pontos quentes com grande facilidade de uso. Os modelos apresentam as seguintes características:

- Resolução IR de 160 x 120 pixels, boa qualidade de imagem;
- Resolução MSX de 320 x 240 pixels, tecnologia SuperResolution integrada gratuitamente.
- Grande faixa de medição de temperatura de -30°C a $+650^{\circ}\text{C}$.

Para elaboração dos relatórios de inspeção termográfica com uso dos modelos de câmeras termográficas TESTO 865 ou 868 basta conectar o aparelho ao computador e, com o software específico da TESTO e as templates pré-concebidas e fornecidas, rapidamente se elabora um relatório que sintetiza as imagens térmicas fotografadas e as fotos de luz natural, que auxiliam na identificação do equipamento inspecionado e sua condição. O fabricante oferece ainda, gratuitamente, o APP (Termovisor smart) que permite a confecção e envio do relatório no local e no momento da análise termográfica, bem como salvamento online da inspeção. Este recurso agiliza o processo de formatação e elaboração do relatório termográfico e permite que profissionais com pouco conhecimento de softwares de supervisão e produtividade possam ter acesso as ferramentas de análise.

Figura 32 - Termógrafo Testo 865 em análise termográfica



Fonte: Testo (2024).

Figura 33 – Termovisor Testo 868 com recurso APP



Fonte: Testo (2024).

As normas técnicas são de grande valia para se regulamentar a termografia e as análises termográficas, viabilizando assim, uma melhor proteção para os ativos inspecionados, uma qualidade superior na execução das análises, o bom funcionamento dos ativos em análise, diminuição dos riscos e perdas significativas.

Segundo da Silva (2023), "as principais normas que tratam da inspeção termográficas são:

- NBR15424: Ensaio não destrutivos-termografia-terminologia.
- NBR15763: Ensaio não destrutivos-termografia-critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência.
- NBR15866: Ensaio não destrutivos -termografia-metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos".

3.1.3.1.1.2 As vantagens da análise termográfica

De acordo com da Luz (2024), a aplicação da tecnologia de monitoramento oferece benefícios substanciais para a manutenção preditiva, contribuindo para a redução dos custos de manutenção nas instalações, o aumento da disponibilidade dos equipamentos e a otimização do desempenho dos processos produtivos. Entre as vantagens proporcionadas pela implementação de um programa preditivo baseado em inspeções infravermelhas na indústria, destacam-se:

- Identificar defeitos ou anomalias antes da ocorrência de uma falha no sistema produtivo;
- Elevar a segurança e confiabilidade dos equipamentos;
- Reduzir a frequência e duração das manutenções corretivas emergenciais;
- Elevar a eficiência e a eficácia das ações de manutenção, reduzindo os custos relacionados;
- Reduzir os estoques de peças sobressalentes em almoxarifado;
- Elevar a vida útil dos equipamentos e instalações;
- Diminuir custos operacionais;
- Elevar a qualidade do produto ou serviço fornecido;
- Diminuir os riscos de incêndio devido a defeito em equipamentos ou instalações.

A Figura 34 mostra uma situação de queima de motor elétrico por sobreaquecimento. A situação ilustrada na imagem evidencia as consequências de não se monitorar a temperatura dos motores elétricos, que é o superaquecimento da máquina a ponto de se ter a queima do motor ou até mesmo um princípio de incêndio.

Conforme citado por Melo (2017), embora a análise termográfica de equipamentos seja bastante útil para evidenciar pontos quentes e até indicar as falhas nos instrumentos de monitorização contínua de temperatura das máquinas, manter um registro termográfico de inspeção de cada equipamento poderá ser um processo moroso e não permitir uma análise fidedigna do histórico de dados recolhidos do

equipamento, pelo fato da análise ser pontual e tomada dentro do espaço temporal definido plano macro de manutenção. Estes espaços temporais podem ter uma frequência mensal, trimestral ou ainda semestral. Sendo assim, é preferível optar pela monitorização contínua de temperatura de equipamentos classificados como críticos e reservar a análise de inspeção termográfica como uma prática adicional de monitoramento preditivo.

Figura 34 – Queima de motor elétrico por sobreaquecimento



Fonte: Weg (2024).

Em resumo, a termografia, também conhecida como termovisão, é uma ferramenta eficaz para o diagnóstico de falhas ou problemas em sistemas inspecionados, permitindo a identificação de regiões ou pontos com temperaturas anormais em comparação a um padrão previamente definido.

3.1.3.1.1.3 Ocorrências que uma inspeção termográfica pode detectar.

A principal função de uma inspeção termográfica é encontrar defeitos que estão na fase inicial, e implementar soluções para a correção destes.

As principais aplicações da termografia estão voltadas para a análise de equipamentos, conexões, painéis e motores elétricos. No caso dos equipamentos, destacam-se seccionadoras, disjuntores, transformadores de potência, potencial e corrente, capacitores, fusíveis, relés térmicos, reatores, equipamentos eletrônicos de potência, descarregadores de sobretensão, cabos e outros. Para conexões, são

comuns as inspeções em barramentos, bornes, terminações, buchas de passagem, emendas, bays de distribuição e similares. Em relação aos painéis, incluem-se painéis de distribuição, painéis de comando, CCMs (Centros de Controle de Motores), bancos de capacitores, drivers, acionamentos de motores de grande porte, bancos de resistências, entre outros.

Algumas das falhas que a inspeção termográfica elétrica em motores pode detectar são: conexões ruins, frouxas ou deterioradas; desequilíbrio de correntes e tensão; circuitos abertos; obstrução em trocadores de calor; fugas de correntes em isoladores e cabos de aterramento; Desbalanço de cargas; aquecimento por indução; equipamento com defeito; alto consumo de energia (da Silva, 2023).

3.1.3.1.1.4 Relatório de inspeção termográfica

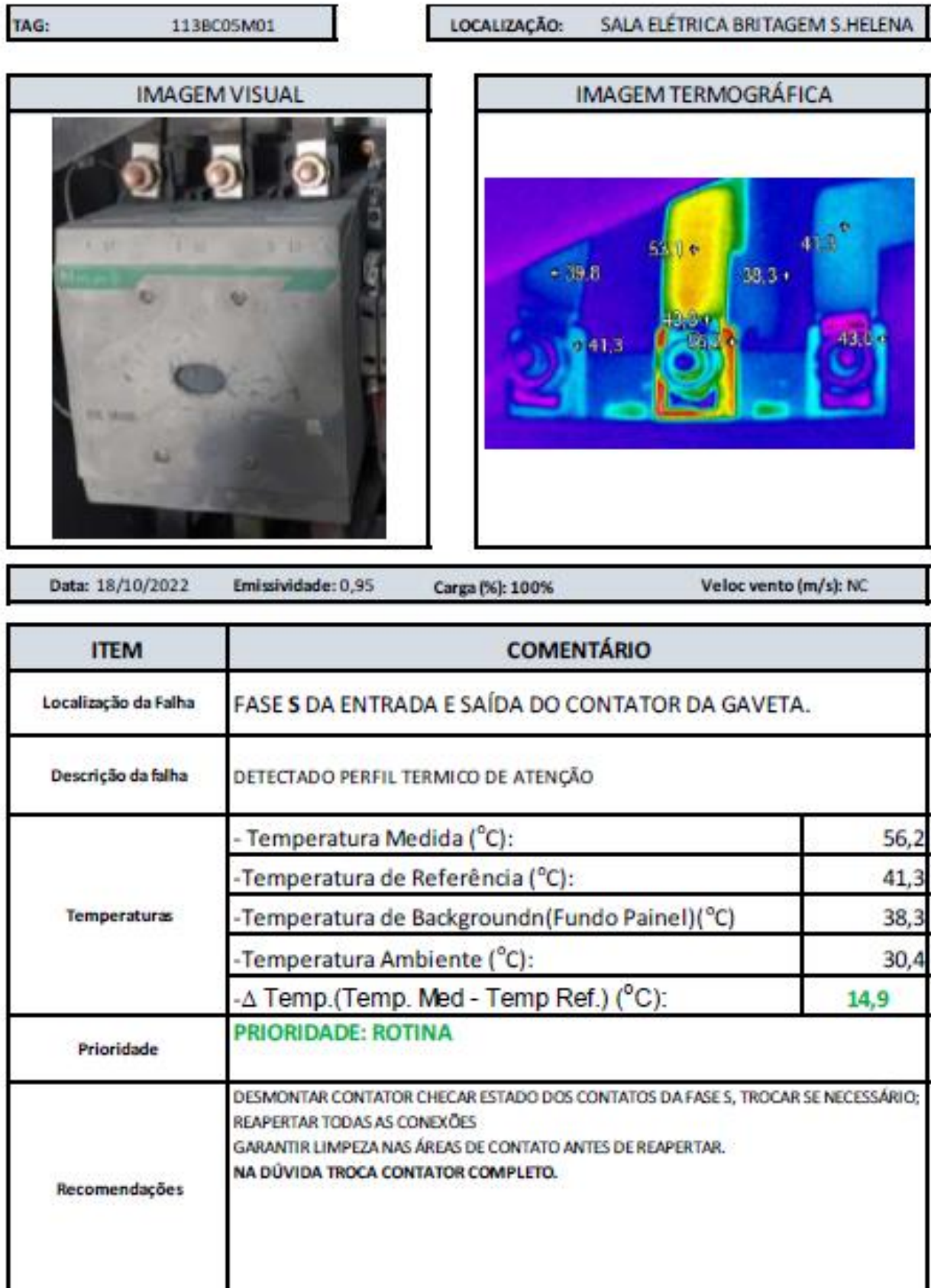
O relatório de uma análise termográfica é um documento de grande importância para as empresas, pois nele as informações importantes para se ter retidas em um arquivo de manutenção, que posteriormente pode ser usado caso haja a necessidade de informações mais detalhadas da análise termográfica realizada.

Nas Figuras 35, 36 são ilustrados os formatos e padrões de execução e apresentação visual dos pontos monitorados e apresentados nos relatórios de análise de termográfica, conforme normatização vigente. Este documento deve ser produzido de forma que todos que o analisar possam entender o seu objetivo.

A Figura 37 mostra uma tabela de referência para determinação do grau de severidade baseado no resultado da medição remota e da interpretação da radiação infravermelha emitida pelo ponto monitorado onde a temperatura encontra-se alterada com relação a um padrão estabelecido. Já a Figura 38 mostra a tabela de classificação de alarmes orientativa para definir a classificação automática dos pontos quentes observados. A classificação é definida através de normas ou experiência prática do analista.

Conforme da Luz (2024), os valores indicados na coluna "Prioridades de Manutenção" da tabela de alarmes são apenas orientações teóricas. Esses intervalos não levam em conta fatores cruciais, como a criticidade dos equipamentos no processo produtivo. Dessa forma, cabe ao cliente, que possui conhecimento aprofundado de sua planta, realizar os ajustes necessários para priorizar adequadamente as intervenções.

Figura 35 - Relatório de análise termográfica

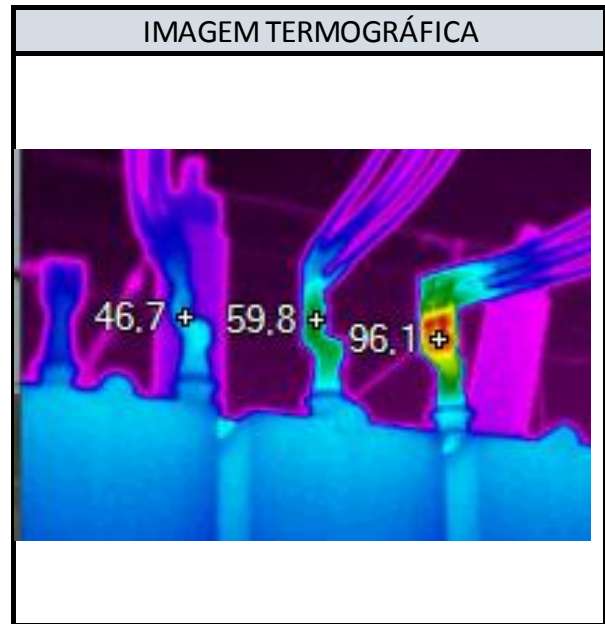
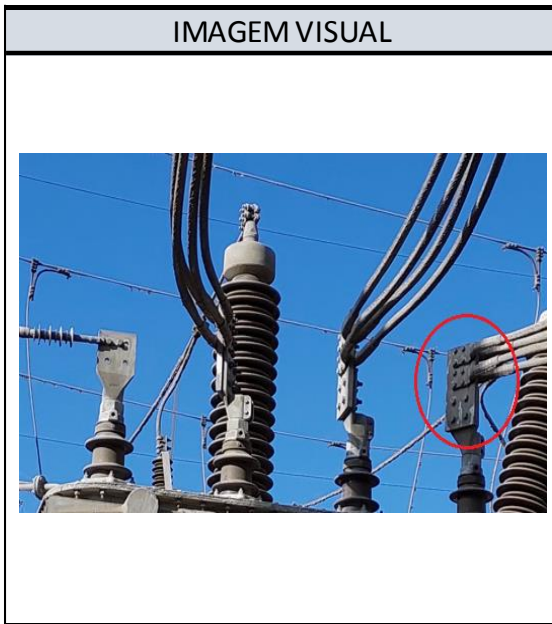


Fonte: da Luz (2024).

Figura 36 - Relatório de análise termográfica

TAG: 811TA01

LOCALIZAÇÃO: SUBESTAÇÃO PRINCIPAL



Data: 22/03/2024 **Emissividade:** autom. **Carga (%):** 57% da In do trafo **Umidade Relativa:** 99%

ITEM	COMENTÁRIO
Localização da Falha	BARRA CONEXÃO NO TERMINAL X3 E X2 DO TRANSFORMADOR
Descrição da falha	DETECTADO PERFIL TERMICO ANORMAL/EMERGENCIAL
Temperaturas	- Temperatura Medida (°C): 96,1
	-Temperatura de Referência (°C): 46,7
	-Temperatura de Backgroundn(Fundo Painel)(°C) 22
	-Temperatura Ambiente (°C): 22
	-Δ Temp.(Temp. Med - Temp Ref.) (°C): 49,4
Prioridade	PRIORIDADE: EMERGENCIAL (DELTA >=40 GRAUS) PARA ALTA TENSÃO.
Recomendações	CORRENTES: X1= 1500A; X2= 1542A e X3= 1529A DIFERENCIAL DE CORRENTES NÃO JUSTIFICA A DIFERENÇA DE TEMPERATURAS. SUGESTÃO NA GP SUBSTITUIR OS PARAFUSOS DE APERTO POR NOVOS; LIMPAR ÁREAS DE CONTATO DAS BARRAS E REAPERTAR TUDO COM TORQUÍMETRO CONFORME RECOMENDAÇÃO DA WEG TRANSFORMADORES. PRIORIZAR A SOLUÇÃO DA X3 E RECOMENDO FAZER O MESMO NA X2.

Fonte: da Luz (2024).

Figura 37 – Tabela de Grau de Severidade

Classificação	Comentários
Rotina	Reparar de conformidade com as datas do plano regular de manutenção. Pequena possibilidade de falha ou danos físicos no componente.
Intermediária	Reparar quando possível. Verifique a possibilidade de danos físicos no componente.
Séria	Reparar o mais rápido possível. Se necessário troque o componente e inspecione os adjacentes a procura de danos físicos. Há possibilidades de falha no componente.
Emergencial	Reparar imediatamente. Troque o componente, inspecione os adjacentes e troque-os se necessário. É grande a possibilidade de falha no componente.

Fonte: da Luz (2024).

Figura 38 – Tabela de classificação de alarmes

CLASSIFICAÇÃO	Delta de Baixa Tensão	Delta de Alta Tensão	Cabos de Alta Tensão	Conector de Alta Tensão	Isolação Padrão
Rotina	10,0 °C	10,0 °C	68,3 °C	79,5 °C	43,3 °C
Intermediária	16,6 °C	20,0 °C	76,7 °C	87,8 °C	48,9 °C
Séria	23,3 °C	30,0 °C	85,0 °C	96,1 °C	54,4 °C
Emergencial	30,0 °C	40,0 °C	98,9 °C	110,0 °C	60,0 °C

Fonte: da Luz (2024).

Os valores de Temperatura Máxima Admissível (MTA) para cada componente podem ser determinados com base em suas especificações técnicas ou por meio de consulta ao fabricante. Na ausência dessas informações, recomenda-se adotar como referência 90°C para conexões e componentes metálicos e 70°C para cabos isolados.

Conforme citado por da Luz (2024), tem-se os seguintes critérios a serem seguidos:

- O delta de temperatura refere-se à diferença da temperatura máxima corrigida do componente, subtraída da temperatura de um componente similar de referência;
- A temperatura máxima refere-se ao valor absoluto da temperatura máxima corrigida aceitável para o componente;
- A Temperatura Máxima Corrigida é calculada em função da temperatura absoluta medida do componente, tensão nominal, temperatura ambiente e temperatura de background (fundo do painel elétrico), quando aplicável a termografia de painel elétrico.

Nos casos em que os problemas apontados pelo relatório termográfico não podem ser analisados e resolvidos de imediato, poderá ser aumentado a data limite de correção do ponto detectado, tomando os seguintes cuidados:

- Redução de carga ou ventilação forçada pra o caso de motores elétricos e transformadores;
- Acompanhamento da evolução térmica do componente aquecido com termovisores;
- Consulta do fabricante para embasamento técnico quanto aos limites operacionais admissíveis;

De acordo com da Silva (2023), um relatório de termografia elétrica bem elaborado deve ser claro, objetivo e fácil de entender para o leitor, e deve fornecer informações precisas e confiáveis sobre a condição dos componentes elétricos inspecionados. É importante que a equipe responsável pela elaboração do relatório possua conhecimento técnico e experiência na interpretação de imagens termográficas e na análise dos resultados.

Após a entrega do relatório de termografia, ações corretivas ou preventivas devem ser tomadas, baseado nas medições encontradas, essas ações devem ser divididas por priorização, atendendo primeiramente aos itens considerados críticos, até chegar aos itens de checagens de rotina, conforme explanado anteriormente.

3.1.3.1.2 Análise de Vibrações

Segundo Rodrigues (2024), a análise de vibração é uma técnica amplamente empregada para monitorar a condição de motores industriais. Por meio dessa análise, é possível identificar falhas elétricas e mecânicas, bem como problemas originados de outras fontes de vibração, como ressonâncias ou defeitos internos e na alimentação do motor. Esse processo envolve a instalação de sensores e acelerômetros em pontos estratégicos para medir as vibrações. No entanto, não se trata apenas de monitorar ou registrar dados; as informações coletadas devem ser interpretadas por técnicos especializados. A análise detalhada das frequências de vibração e dos padrões observados permite localizar a origem do problema e direcionar ações corretivas de forma precisa.

Conforme Pacífico (2024), um sensor de vibração é um dispositivo projetado para converter vibrações mecânicas em sinais elétricos. Esses sinais podem ser analisados para identificar características como amplitude, frequência e outros parâmetros da vibração.

De acordo com Pacífico (2024), há diversos tipos de sensores de vibração, cada um com características e aplicações específicas. Os mais utilizados em máquinas industriais são os acelerômetros e os sensores piezoelétricos. Os acelerômetros, por exemplo, medem a aceleração de uma máquina e são particularmente indicados para detectar vibrações rotacionais, comuns em equipamentos como motores e turbinas. A Figura 39 mostra um modelo de acelerômetro de dois canais com coletor e nos dá uma visão deste equipamento de análise de vibração.

Figura 39 - Acelerômetro de dois canais



Fonte: Loja Elocation (2024).

Conforme Pacífico (2024), os sensores piezoelétricos utilizam o efeito piezoelétrico para detectar vibrações, convertendo-as em um sinal elétrico. Esse efeito ocorre quando uma força é aplicada a um material piezoelétrico, resultando na geração de uma tensão elétrica.

Os anéis de força da Figura 40, tem como função dentro da análise de vibração: detectar desalinhamentos, desgaste de rolamentos, desequilíbrios rotacionais e demais problemas que afetam a vida útil e o desempenho dos motores elétricos.

Figura 40 - Anéis de força sensor piezoelétrico



Fonte: Kleckers (2024).

De acordo com Rodrigues (2024), o impacto das vibrações mecânicas em motores industriais é uma preocupação constante nos setores de manutenção das empresas que dependem desses componentes para o funcionamento de seus equipamentos. Se não forem controladas, as vibrações podem causar uma série de problemas, como o desgaste prematuro de componentes e falhas graves, comprometendo a segurança e a eficiência operacional. A longo prazo, isso pode até levar à perda dos equipamentos, resultando em custos elevados e interrupções na produção.

Vibrações em motores elétricos na indústria pode acarretar outros problemas, visto que esses motores sempre estão acoplados com outras peças fazendo assim que essas peças e interligações, também sofram com essas vibrações que segundo (Rodrigues, 2024). As vibrações mecânicas são causadas por fatores como desbalanceamento, desalinhamento, folgas, desgaste, entre outros problemas mecânicos. Já as vibrações elétricas têm origem em falhas no sistema elétrico do motor, como problemas na alimentação elétrica ou mau contato nos terminais.

As vibrações elétricas podem ser classificadas em três tipos principais:

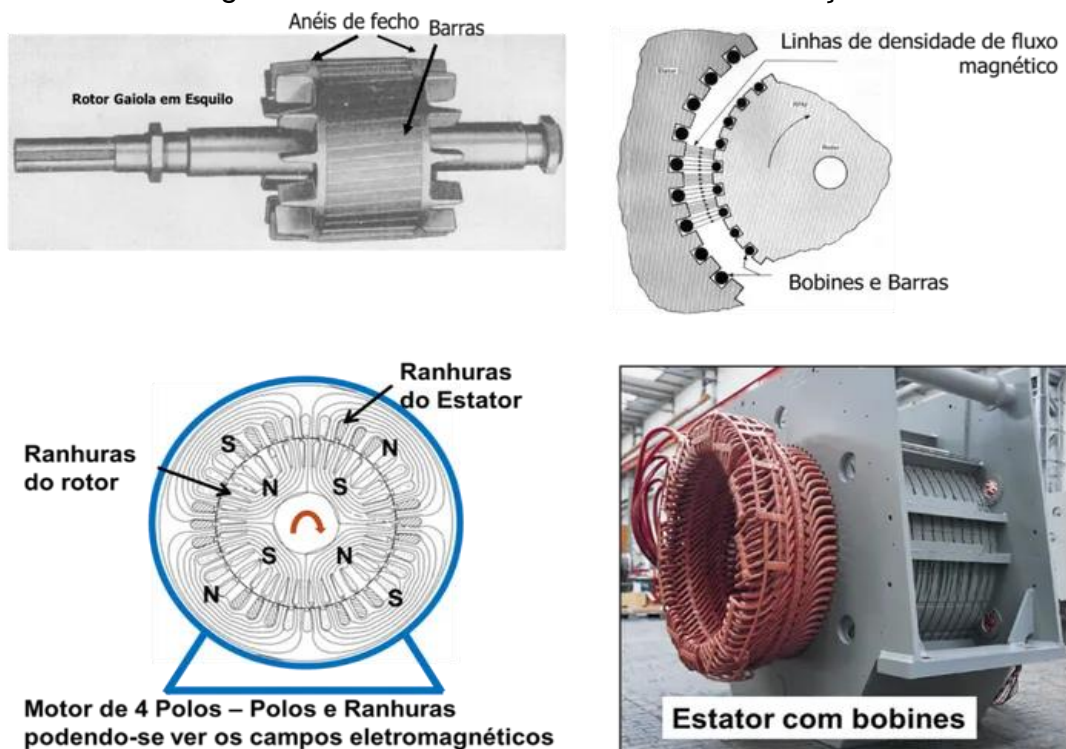
- **Vibração por desequilíbrio de tensão:** ocorre quando há uma diferença de tensão entre as fases do motor.

- **Vibração por corrente harmônica:** resulta da presença de harmônicos na corrente elétrica do motor.
- **Vibração por interferência eletromagnética:** acontece quando equipamentos elétricos próximos ao motor geram interferências que afetam seu desempenho.

Para identificar e corrigir as vibrações em motores elétricos industriais, é fundamental realizar uma análise de vibrações, que pode ser conduzida por meio de medições utilizando acelerômetros e a análise de espectros de frequência (Rodrigues, 2024).

Existem várias forças elétricas e mecânicas presentes nos motores de indução que podem causar vibrações (Figura 41). Além disso, a interação destas várias forças torna difícil a identificação da causa principal (Aroeira, 2024).

Figura 41 - Estator e Rotor do motor de indução



Fonte: DCM (2024).

De acordo com Rodrigues (2024), as vibrações mecânicas em motores elétricos são movimentos oscilatórios que acontecem em suas partes e componentes, originados pelas forças elétricas e mecânicas que agem sobre o motor.

Essas vibrações podem ser originadas por diversas fontes, como desequilíbrios de massa, deformações estruturais, atrito, desgaste dos componentes, entre outras causas.

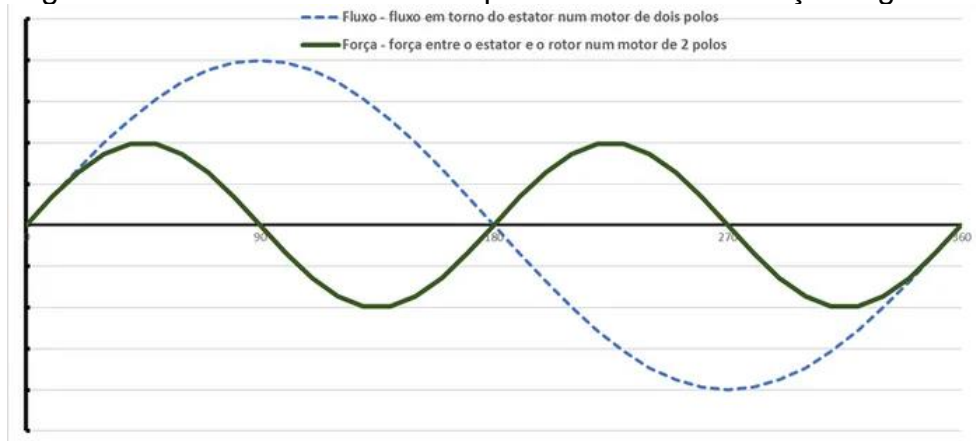
Independentemente da fonte da vibração, ela é prejudicial ao desempenho do motor, pois pode ocasionar danos aos componentes, reduzir a eficiência energética e até resultar em falhas catastróficas.

Às causas deste tipo de vibração em motores elétricos conforme cita Rodrigues (2024) são:

- Folga no eixo;
- Desalinhamento;
- Excentricidade do rotor;
- Frequência da rede elétrica;
- Escorregamento do motor;
- Desbalanceamento em componentes;
- Pé Manco;
- Problemas nos Rolamentos;
- Problemas em Engrenagem;
- Problemas na Base ou Fundação;
- Acoplamento Incorreto;
- Ressonância Estrutural;
- Problemas Hidráulicos em Bombas;
- Fadiga;
- Desgaste dos Mancais;
- Lubrificação Inadequada;
- Expansão Térmica Diferencial.

De acordo com Aroeira (2024), as vibrações elétricas são causadas por uma fonte de alimentação que gera uma força de atração eletromagnética entre o estator e o rotor, sendo máxima quando a corrente de magnetização no estator atinge seu pico, seja positivo ou negativo, nesse instante específico. Como resultado, duas forças de pico surgem durante cada ciclo da onda de tensão ou corrente, que se anulam quando a onda de corrente e o fluxo fundamental atingem zero, como ilustrado na Figura 42. Esse fenômeno resulta em uma frequência de vibração igual ao dobro da frequência da rede.

Figura 42 - Onda de fluxo de um período e onda de força magnética

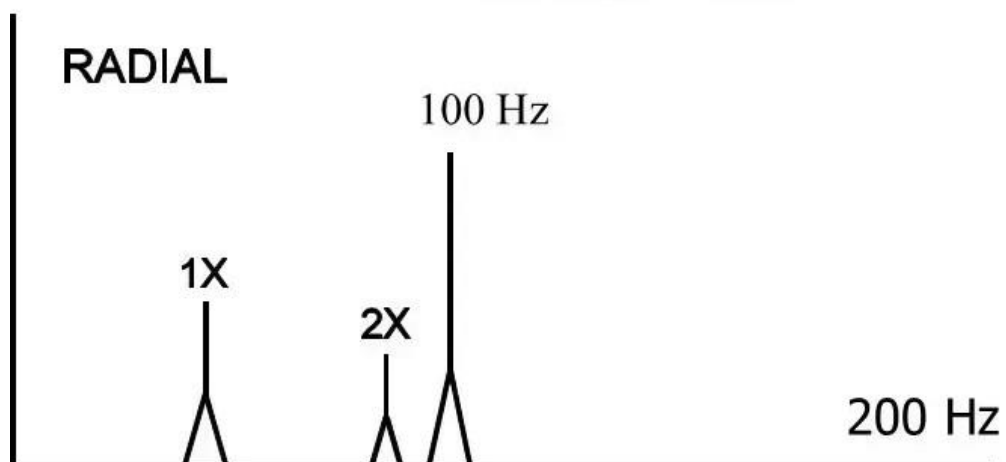


Fonte: DCM (2024).

Desta forma, segundo Aroeira (2024), esta vibração específica é extremamente sensível à planicidade da base do motor, à rigidez da estrutura e da base e à consistência da folga de entreferro entre o estator e o rotor, em torno do estator. Também é influenciada pela excentricidade do rotor.

A Figura 43 nos mostra um espectro de frequência de uma análise de vibração em uma máquina, onde a linha vertical representa a amplitude (intensidade) das vibrações em diferentes frequências, e a linha horizontal representa as frequências em Hertz (Hz).na figura acima há picos em 100Hz e 200Hz, que estão sendo mostrados como 1x e 2x. estes picos mostram que há vibrações significativas nessas frequências.

Figura 43 - Esquema de espectro com componente a 100Hz
FFT de 3200 linhas



Fonte: Aroeira (2024).

Como identificar qual o tipo de sensor para uma análise de vibração? Segundo Borges (2024), o que define o tipo de sensor a ser aplicado em uma máquina para a análise vibratória é a sua natureza. Uma máquina que vibra em baixa frequência apresenta baixo índice de amplitude, situação ideal para o uso de um sensor de deslocamento. Um equipamento que vibra em média frequência pode ser monitorado por um sensor de velocidade. Já máquinas que vibram em alta frequência precisam de um acelerômetro para detectar a elevada amplitude gerada pelo seu movimento. O gráfico da Figura 44, mostra a região de atuação desses sensores.

Figura 44 - Faixa de frequência ideal para sensores de vibração

Sensor	Faixa de Frequência					
	< 100 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	3000 Hz	> 4000 Hz
Deslocamento	█					
Velocidade	█					
Aceleração	█					

Fonte: Borges (2024).

Na figura pode -se notar a relação entre a faixa de frequência ideal para cada tipo de sensor usado na análise de vibração.

De acordo com Borges (2024), o sensor mais utilizado para análise de vibração é o acelerômetro. Sua característica eletromecânica possibilita medir a vibração de máquinas e converter esse efeito em uma tensão proporcional à força "g" (unidade gravitacional terrestre). Além disso, o acelerômetro permite a extração de dados em médias e baixas frequências, proporcionando uma análise detalhada das vibrações.

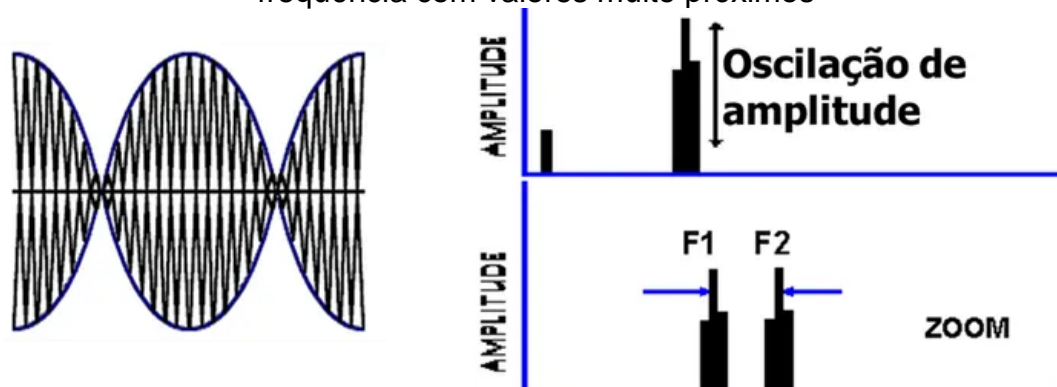
3.1.3.1.2.1 Vibrações em motores elétricos e a modulação de amplitude e escorregamento

Segundo Aroeira (2024), em motores de 2 polos, o nível de vibração de duas vezes a frequência da rede tende a modular ao longo do tempo, devido à sua proximidade com a vibração a duas vezes a rotação do motor. Problemas como fricção, peças soltas, um veio empenado ou chumaceiras elípticas podem gerar vibração a 2 vezes a frequência de rotação. Devido à proximidade das frequências, os níveis de vibração dessas duas fontes podem se somar quando estão em fase e

se subtrair quando estão fora de fase, voltando a se somar quando retornam à mesma fase.

A Figura 45 mostra a oscilação do nível de vibrações em motores de indução, devido à presença de duas frequências de vibração (F_1 e F_2) que estão próximas uma da outra. Essas frequências se combinam e causam uma variação na amplitude da vibração, conhecida como oscilação de amplitude. Esse efeito ocorre porque o motor não gira exatamente na velocidade teórica (exemplo: 3000 RPM), mas um pouco abaixo (como 2960 RPM) devido ao deslizamento. Essa diferença de velocidade gera uma vibração modulada que varia ao longo do tempo.

Figura 45 - Oscilação de nível de vibrações devido a duas componentes de frequência com valores muito próximos



Fonte: Aroeira (2024).

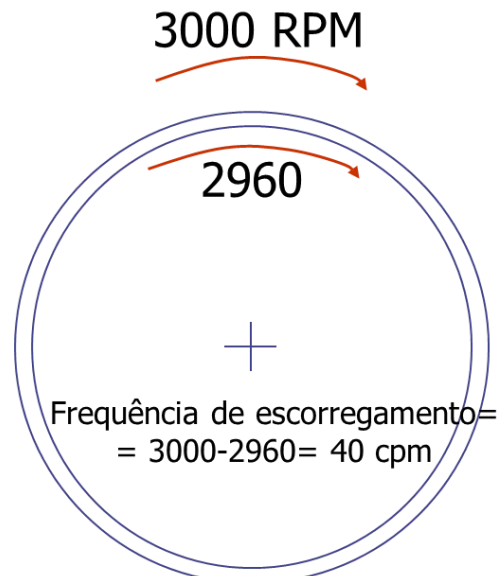
Essa modulação repete-se a uma frequência de 2 vezes o escorregamento nos motores de 2 polos. Mesmo em vazio, a vibração de rotação dupla em motores de 2 polos pode variar cerca de 100 Hz devido ao escorregamento. Como há sempre algum deslizamento nos motores de indução, embora pequeno em vazio, pode levar de 5 a 15 minutos para que uma rotação completa ocorra (Aroeira, 2024).

3.1.3.1.2.2 A análise de vibração através do Escorregamento do motor

De acordo com Aroeira (2024), existe um campo rotativo ao redor do estator com o qual o rotor tenta manter-se em fase, mas o rotor acaba ficando atrás do campo do estator por um número determinado de rotações por minuto, dependendo da carga. Quanto maior for a carga, maior será o deslizamento. O deslizamento típico é de cerca de 1% da velocidade nominal em plena carga e diminui para quase zero em vazio (Figura 46). Como os níveis de vibração não são constantes, para medir a vibração, é

frequentemente necessário realizar o que é conhecido como teste de modulação. Durante um teste de vibração de modulação, o motor pode operar por um período de 10 a 15 minutos, com a vibração sendo registrada continuamente, permitindo que os valores máximos e mínimos sejam estabelecidos.

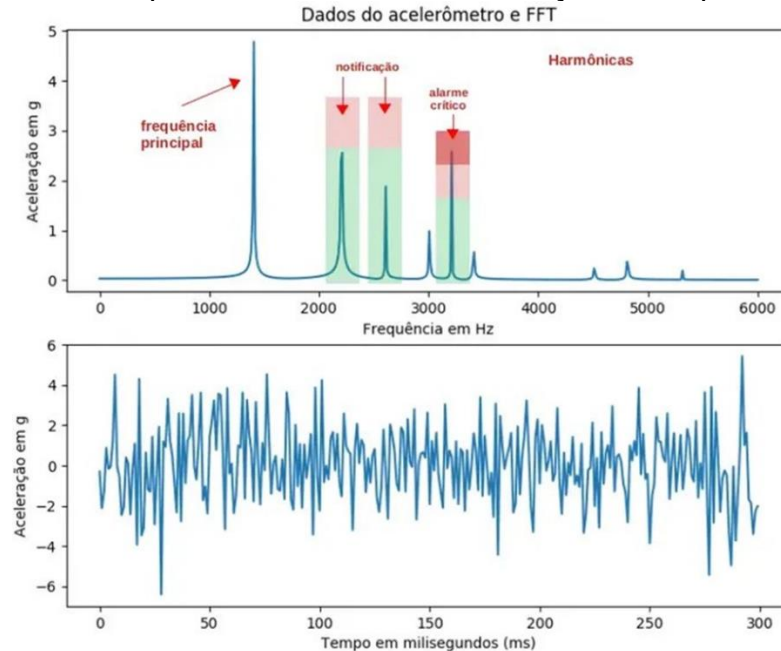
Figura 46 – Frequência de escorregamento do motor



Fonte: Aroeira (2024).

As falhas segundas Borges (2024), são detectadas na análise dos dados dos sensores e normalmente é feita no espectro de frequência e pode-se identificar uma evolução de aceleração dos espectros (Figura 47). É comum aplicar a transformada rápida de Fourier (FFT) às amostras do sensor do acelerômetro para verificar a amplitude do sinal em um intervalo de frequência. Essas amostras podem ser entendidas como laudos de saúde das máquinas. Um equipamento em pleno funcionamento apresenta indicadores em intervalos conhecidos. Quando esses indicadores fogem da faixa conhecida, entende-se que há indícios de que a máquina não está operando corretamente.

Figura 47 - Curva exemplo de um sensor de aceleração e o espectro de frequência



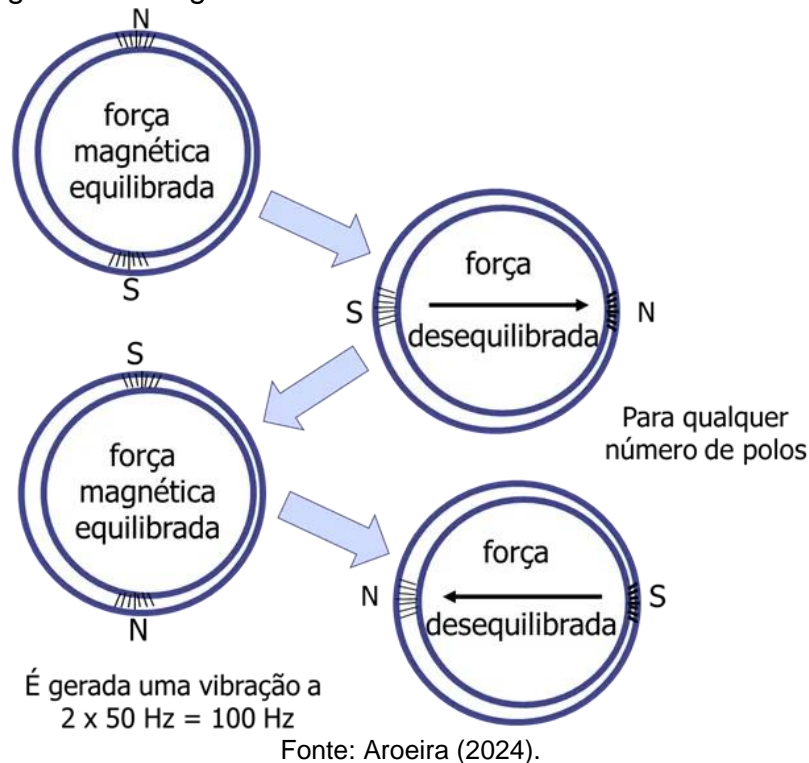
Fonte: Borges (2024).

De acordo Borges (2024), a Figura acima apresenta como essa análise pode ser feita. No gráfico inferior, mostra-se os dados recebidos do acelerômetro ao longo de uma janela de tempo apenas para referência visual desse sinal. No gráfico superior, mostra-se a FFT desse sinal, representado na escala de frequência por amplitude:

3.1.3.1.2.3 Folga de entreferro assimétrica (excentricidade estática)

De acordo com Aroeira (2024), a folga de entreferro de um motor elétrico é um elemento que oferece resistência ao fluxo magnético, sendo importante que seja pequena e constante. Quando a folga de entreferro não é simétrica, pode ocorrer uma atração magnética desequilibrada (Figura 48), o que provoca uma maior vibração do veio.

Figura 48 - Folga de entreferro assimétrica em torno do rotor



Segundo Crespim (2018), a excentricidade estática é causada devido a um desalinhamento entre o eixo do rotor e o centro do estator, quando eixo do rotor gira em torno de um eixo fixo. Essa excentricidade muitas vezes originada devido a tolerância de fabricação. O desequilíbrio estático excessivo geralmente ocorre quando os rolamentos, mesmo sendo feito pelo mesmo fabricante, com o pedido rotor agindo com forças diferentes um cada rolamentos pode levar a está situação. É pouco provável que os rolamentos em ambas as extremidades da máquina têm o mesmo desvio de desgaste. Por questões de simplicidade, é geralmente modelada a excentricidade por posicionar o rotor e o estator paralelos umas às outras e mantendo uma diferença constante ao longo do comprimento axial da máquina.

De acordo com Aroeira (2024), essa condição específica resultará em uma força maior na direção da folga de entreferro mais estreita. Em outras palavras, haverá uma atração magnética desequilibrada na direção da folga de entreferro mínima.

$$\text{Força} \approx B^2/d$$

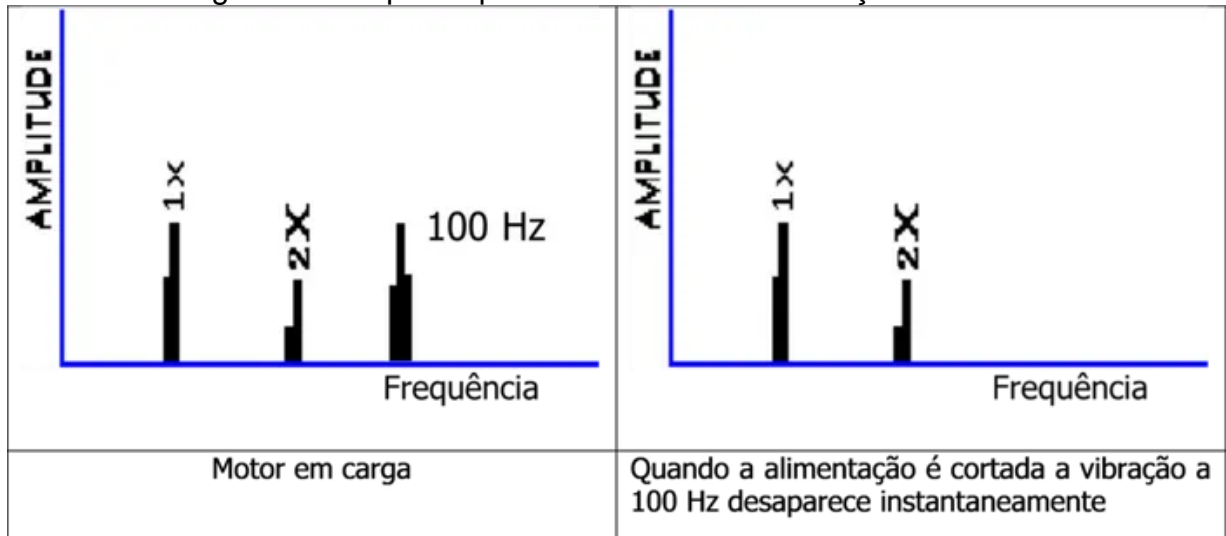
Onde:

B= Densidade do fluxo

d= distância de entreferro

O que interessa aqui, não é somente o estator ser puxado numa direção, mas também o rotor ser puxado na direção oposta, para o lado que tem a folga de ar mínima. Isto provoca uma maior vibração do veio, o que é mais prejudicial para a vida útil da chumaceira. Fato este observado quando se corta a fonte de energia do motor (Figura 49).

Figura 49 - Espectro quando se corta a alimentação do motor



Fonte: Aroeira (2024).

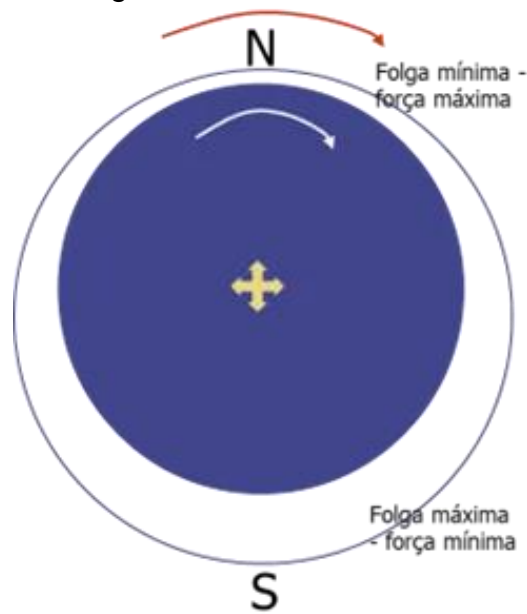
Sendo o diâmetro externo do rotor concêntrico com o eixo de rotação, isto faz com que a força permaneça máxima na direção da folga de entreferro mínima.

“Pata cocha” ou folgas nas chumaceiras podem provocar a excentricidade estática (Aroeira, 2024).

3.1.3.1.2.4 Rotor excêntrico (excentricidade dinâmica)

Conforme Aroeira (2024), o termo *rotor excêntrico* refere-se a uma situação em que o diâmetro externo do núcleo do rotor não é concêntrico com os eixos das chumaceiras, criando um ponto de folga de entreferro mínima que gira com o rotor à frequência de rotação (Figura 50). Em consequência, haverá uma força magnética desequilibrada agindo no ponto de entreferro mínimo, já que a força no entreferro mínimo é maior do que no entreferro máximo, como ilustrado na figura. Essa força de desequilíbrio líquido gira à frequência de rotação, na direção da folga de entreferro mínima, gerando vibração a essa mesma frequência.

Figura 50 - Rotor excêntrico



Fonte: Aroeira (2024).

E também de acordo com Crespim (2018), a excentricidade dinâmica ocorre quando o rotor não roda em torno de um eixo fixo, enquanto ainda gira em torno do eixo do estator. Os desequilíbrios estáticos e dinâmicos podem coexistir em um motor de indução trifásicos. As causas mais comuns de desequilíbrio dinâmicos são as tolerâncias de fabricação e os desgastes mecânicos. além disso, durante o desequilíbrio dinâmico, forças significativas São produzidas e tendem puxar o rotor mais longe da posição concêntrica.

Quando a velocidade do rotor fica próximo de um valor crítico, componentes mecânicos começam a ter maior efeito, introduzindo assim uma outra fonte de excentricidade dinâmica. Essa velocidade crítica é um parâmetro importante em grandes máquinas. Como a excentricidade estática, a excentricidade dinâmica também tem um modelo uniforme axial no entreferro.

A Figura 51 ilustra uma situação de excentricidade dinâmica no rotor, em que a excentricidade se manifesta a duas vezes a frequência de deslizamento num motor de dois polos.

Figura 51 - excentricidade dinâmica no rotor



Fonte: Aroeira (2024).

Em condições normais de operação o nível de vibração do MIT (motor indução trifásico) é mantido constante. No entanto, quando ocorre alguma anormalidade e os níveis de vibração são alterados e transmitidos ao conjunto acionado, aos componentes integrantes da máquina, se propagando para estrutura mecânica do equipamento resultando numa frequência de vibração mais complexa composta por várias frequências que pertencentes ao próprio equipamento (Campos, 2023) e, diante de uma infinidade de técnicas para avaliar e acompanhar o comportamento dinâmico dos motores elétricos, para uma boa análise de vibração, o analista deve ser analítico e criterioso, buscando sempre os meios necessários para resguardar o funcionamento dos ativos em análise.

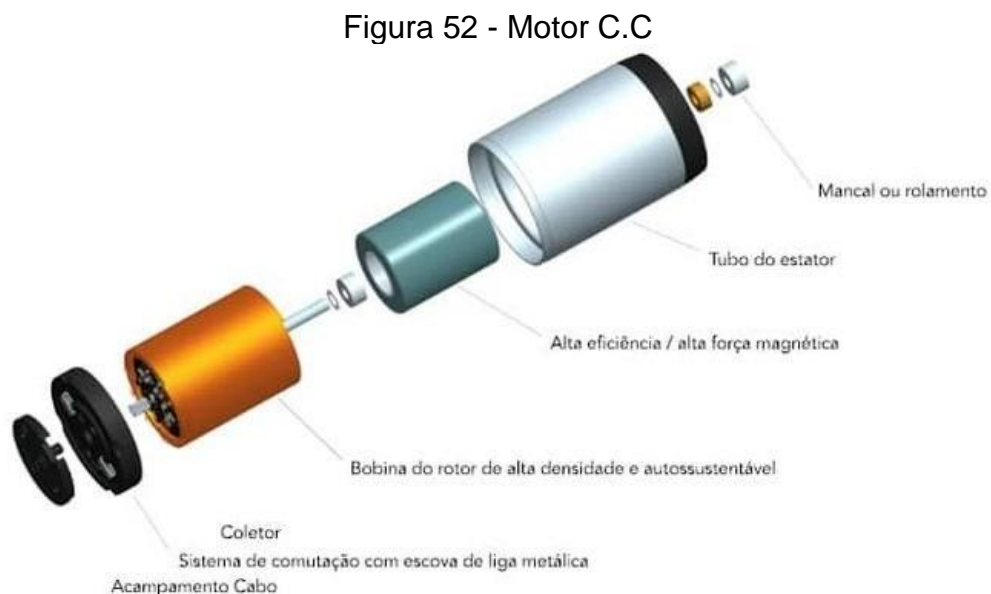
Conforme mencionado por Campos (2023), a identificação correta da natureza da falha é de extrema importância para que possa ser possível o planejamento de uma intervenção preventiva, ou corretiva a fim de mitigar o problema e evitar perdas de produção por uma quebra inesperada da máquina.

3.1.3.1.3 Isolamento

O isolamento de motores elétricos é fundamental para o funcionamento adequado do mesmo sendo assim um assunto muito importante para a manutenção preditiva de motores elétricos, sendo estes de corrente contínua ou de corrente alternada, ou o mais usados dentro das indústrias o motor de indução o que vamos abordar aqui nesta revisão sobre o assunto de isolamento de motores elétricos.

Primeiramente vamos entender o princípio de funcionamento de cada tipo de motores elétricos, sendo estes de CC e CA e o de indução.

Os motores de corrente contínua (DC) requerem uma fonte de corrente contínua, o que pode exigir o uso de um circuito retificador para converter a corrente alternada, fornecida pela concessionária de energia elétrica, em corrente contínua. Esses motores oferecem velocidades ajustáveis em uma ampla faixa e são ideais para controles de grande flexibilidade e precisão. Por esse motivo, seu uso é limitado a situações específicas, em que essas características justificam o custo significativamente mais alto da instalação, ou quando a alimentação disponível já é contínua (RR Motores, 2021). A Figura 52 mostra um motor C.C (corrente contínua) em vista explodida.



Fonte: Abecom (2024).

Os motores de corrente alternada, ou motores AC, são os mais utilizados, porque a distribuição de energia elétrica é feita normalmente em corrente alternada.

3.1.3.1.3.1 Motor monofásico universal

O princípio de funcionamento dos motores de corrente alternada (AC) é baseado no campo girante, que é gerado quando um sistema de correntes alternadas trifásicas é aplicado em polos fisicamente defasados de 120° . Dessa forma, como as correntes são defasadas em 120° elétricos, em cada instante, um par de polos possui o campo eletromagnético de maior intensidade. A combinação vetorial desses campos resulta no efeito de um campo girante que se desloca ao longo do perímetro do estator, variando também ao longo do tempo (RR Motores, 2021).

Dentro do tema de motores de corrente alternada (CA), o motor síncrono é um dos dois tipos de motores mais usados, segundo RR Motores (2021). O motor síncrono opera com velocidade constante, utilizando um induzido que possui um campo constante pré-definido. Esse campo constante permite uma resposta eficiente ao processo de arraste criado pelo campo girante. Ele é comumente utilizado em aplicações onde é necessária uma velocidade estável, mesmo sob a ação de cargas variáveis. Além disso, o motor síncrono também é empregado quando há a necessidade de grande potência, mantendo torque constante durante sua operação.

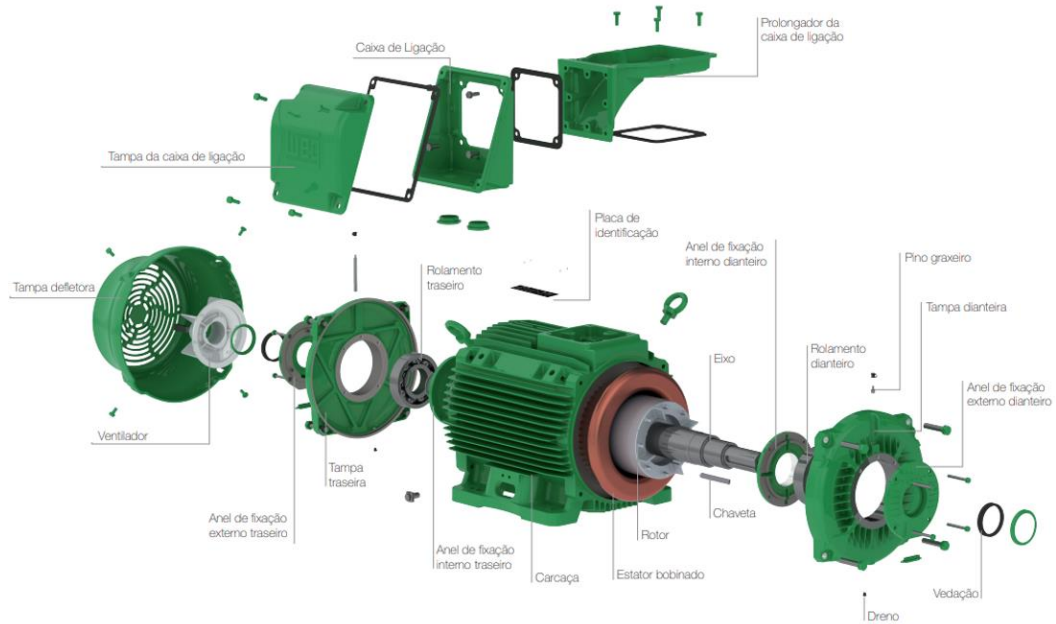
O motor de indução funciona normalmente com velocidade estável, que sofre uma leve variação conforme a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido à sua grande simplicidade, robustez e baixo custo, é o motor mais utilizado em diversas aplicações, sendo adequado para a maioria dos tipos de máquinas acionadas na prática. Sua versatilidade e eficiência o tornam a escolha preferida para uma ampla gama de indústrias e equipamentos.

Atualmente é possível controlarmos a velocidade dos motores de indução com o auxílio de inversores de frequência (RR Motores, 2021). Na Figura 53 é ilustrado a vista explodida de um motor de indução trifásico Weg linha W22 de alta eficiência.

Sendo assim bem exposto o funcionamento e partes do motor vamos a partir deste ponto tratar do assunto de isolamento destes equipamentos que são de extrema importância dentro das indústrias.

O isolamento de motores elétricos é fundamental para o funcionamento do motor em condições para o seu funcionamento, sendo está uma parte da manutenção preditiva de motores elétricos muito técnica, pois é preciso entender bem a situação do problema, isto somente com uma análise de isolamento que tende para o processo de resistência de isolamento destes equipamentos rotativos elétricos.

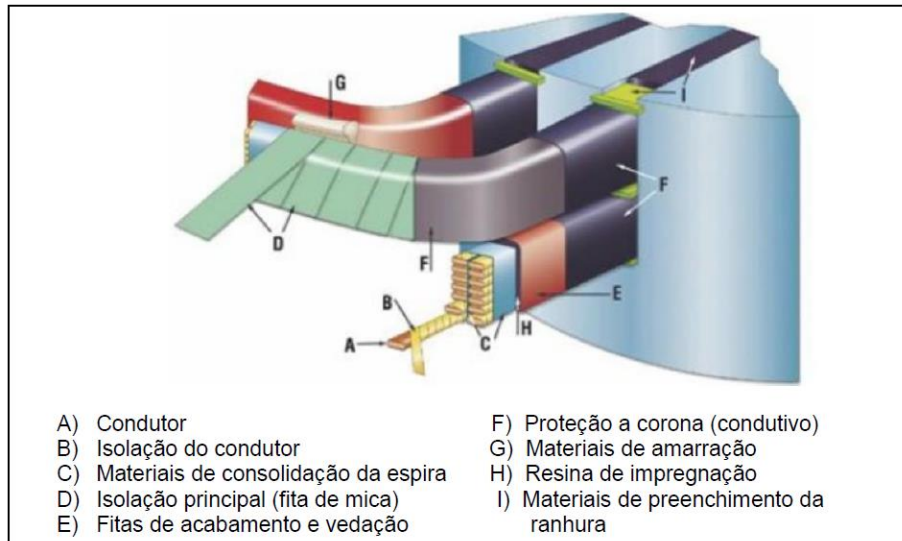
Figura 53 – Vista explodida do motor de indução trifásico W22



Fonte: Weg (2024).

"Nos motores, existem dois sistemas de isolamento. Um sistema é o isolamento da parede do solo que separa as bobinas da moldura ou do invólucro do motor. O segundo sistema de isolamento é o sistema de isolamento do enrolamento que separa os condutores que são enrolados para criar os enrolamentos do motor." (Koch, 2024). Na Figura 54 é mostrado um sistema de isolamento completo de uma bobina do tipo pré-formada para máquinas elétricas de média e alta tensão.

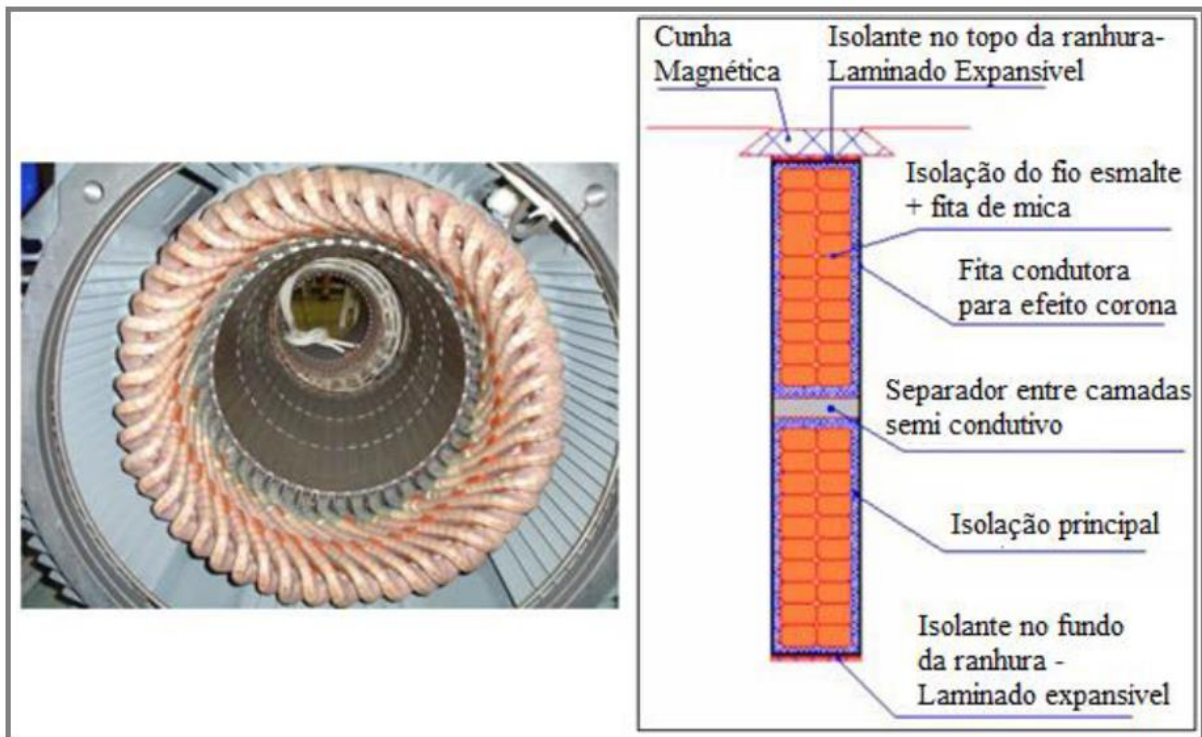
Figura 54 - Sistema de isolamento para máquinas de média tensão



Fonte: Weg (2024).

De acordo com Weg (2024), os fatores que determinam o sistema de isolamento de uma máquina elétrica incluem as temperaturas de operação quando a máquina está em regime, a tensão nominal, o tipo de resina utilizada na impregnação, o ambiente em que a máquina irá operar e a sua aplicação. Os enrolamentos com bobinas pré-formadas são geralmente utilizados em máquinas elétricas com potência superior a 1000 kW e tensão de linha acima de 690V. A Figura 55 ilustra um estator com bobinas pré-formadas, devidamente espaçadas, destacando a disposição dos fios retangulares nas ranhuras.

Figura 55 - Estator com bobinas pré-formadas e ranhura com disposição dos condutores



Fonte: Weg (2024).

Conforme citado por Weg (2024), após a conclusão do processo de isolamento e formatação das bobinas, elas são inseridas nas ranhuras do núcleo de chapas magnéticas e travadas por cunhas de fechamento da ranhura. Com o núcleo ferromagnético bobinado, as ligações das bobinas feitas e os cabos de saída interligados, o núcleo bobinado é submetido ao sistema de impregnação a vácuo e pressão (VPI – Vacuum and Pressure Impregnation). Esse processo envolve submergir os enrolamentos em resina isolante sob pressão, a fim de eliminar qualquer bolha de ar presente. A cura da resina é realizada em uma estufa aquecida, com a

temperatura dos enrolamentos sendo monitorada. Quando os enrolamentos atingem a temperatura desejada, a máquina permanece na estufa por cerca de 12 horas para completar a cura. Após esse período, o processo de impregnação é considerado concluído.

3.1.3.1.3.2 Testes nos sistemas de isolamento

As principais avaliações realizadas incluem: resistência de isolamento, índice de absorção, índice de polarização, teste de surto de tensão, tensão aplicada, corona visual, perdas dielétricas (tangente delta) e descargas parciais. O ensaio de medição da resistência de isolamento nas máquinas elétricas é utilizado para identificar danos no sistema de isolamento que podem causar curto-circuitos ou uma redução na resistência de isolamento, quando comparada à resistência de máquinas do mesmo tipo em boas condições ou com medições anteriores. Os índices de absorção e polarização estão relacionados às leituras feitas após 30 segundos e 10 minutos de avaliação da isolamento (Weg, 2024).

3.1.3.1.3.2.1 Resistência de isolamento

A resistência de isolamento é a medida da dificuldade oferecida à passagem de corrente pelos materiais isolantes. Os valores desses índices podem ser alterados pela umidade e sujeira, que afetam a capacitância do isolamento, a resistência total, as perdas superficiais e a temperatura do material. Essas variações representam uma boa indicação da deterioração dos equipamentos elétricos, provocada por essas condições ambientais. Tais alterações podem comprometer a eficiência e a segurança do sistema elétrico, tornando essencial o monitoramento desses parâmetros para avaliar o estado do isolamento e prevenir falhas. O ensaio consiste em aplicar no isolamento uma tensão em corrente contínua, com valores entre 500 V e 10.000 V. Isso provocará a circulação de um fluxo pequeno de corrente (Paulino, 2024).

Para a medição da resistência de isolamento conforme mencionado por Paulino (2024), utiliza-se um instrumento denominado megômetro ou, popularmente, megger (o que, na realidade, é a marca de um fabricante). Os megômetros atuais são analógicos ou digitais (motorizados ou eletrônicos), mas, também, podem ser manuais (ou seja, com um "cambito" ou "manivela"). Na Figura 56 é ilustrado um exemplar do megômetro digital.

Figura 56 - Megômetro digital



Fonte: Paulino (2024).

De acordo com o guia de procedimentos da ABNT NBR 16929/2021, o ensaio de resistência de isolamento é essencial para verificar se não há fuga de corrente entre o condutor e as partes do motor, permitindo avaliar a qualidade do verniz de isolamento dos fios do enrolamento. Para realizar esse teste, é necessário utilizar um equipamento de medição específico, o megôhmetro. Mais detalhes sobre esse ensaio podem ser encontrados na ABNT NBR 17094-3:2018, que inclui uma tabela com valores de referência para determinar se os resultados obtidos estão dentro dos limites aceitáveis.

Segundo a ABNT NBR 17094-3:2018, em seu item 6.2.1, a resistência de isolamento é definida como o quociente entre a tensão contínua aplicada e a corrente medida em função do tempo, a partir da aplicação dessa tensão. A norma faz referência à resistência de isolamento medida após 1 minuto ou 10 minutos de aplicação da tensão, como uma forma de avaliar a qualidade do isolamento, considerando os efeitos da capacitância e da resistência do material ao longo do tempo.

De acordo com a ABNT NBR 17094-3:2018, em seu item 6.2.1.1, a corrente resultante da aplicação da tensão contínua é composta por duas partes: uma que circula sobre a superfície da isolação e outra que circula no interior da isolação. Esta última pode ser subdividida como a seguir:

- corrente de carga capacitiva, de valor relativamente elevado e curta duração, que geralmente desaparece durante o tempo em que os primeiros dados são tomados e que não afeta as medições;

- corrente de absorção que diminui em uma taxa decrescente desde o valor inicial relativamente elevado a quase zero. A relação resistência versus tempo é uma função exponencial que pode ser colocada em um gráfico log-log como uma linha reta. Geralmente a resistência medida nos primeiros minutos do ensaio é determinada principalmente pela corrente de absorção;
- corrente de condução acrescida da corrente de fuga na superfície é praticamente constante.

Estas correntes predominam após a corrente de absorção tornar-se insignificante.

Segundo Paulino (2024), a corrente de deslocamento ou corrente de carga capacitiva (IC) surge no momento inicial da energização e desempenha a mesma função que a corrente de carga de um capacitor, devido ao efeito capacitivo existente entre os condutores ou entre o condutor e a terra. O comportamento e a intensidade dessa corrente variam conforme o tipo e a forma do material isolante, influenciando a resposta da isolação durante os primeiros instantes após a aplicação da tensão.

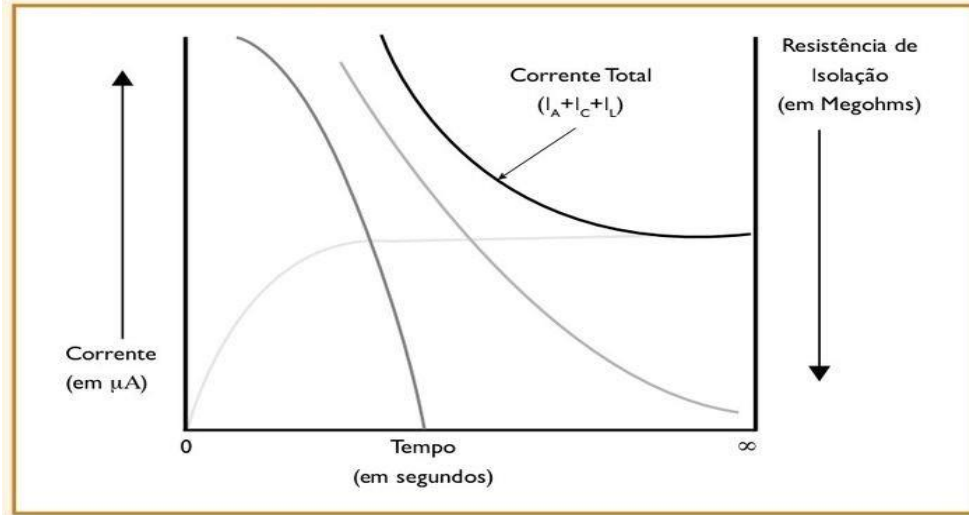
Note-se que ela assume o valor máximo quando da energização decresce rapidamente a um valor desprezível depois que a isolação foi carregada eletricamente por completo.

A corrente de absorção (IA) é responsável pela polarização dos dipolos elétricos presentes no material dielétrico. Em equipamentos de baixa capacitância, a corrente de absorção é alta nos primeiros segundos e diminui lentamente até quase zero. No entanto, em equipamentos com alta capacitância ou aqueles com isolamento comprometido por umidade ou contaminação, essa corrente de absorção pode não apresentar decréscimo significativo por um longo período. Um exemplo prático desse fenômeno ocorre quando, após a remoção do curto de um capacitor, há um ressurgimento de tensão nos terminais. Em função desse comportamento, é importante observar que a corrente de absorção atinge seu valor máximo próximo à energização e, em seguida, diminui para um valor desprezível em um intervalo que pode variar de dez minutos a várias horas.

Segundo Paulino (2024), a corrente de dispersão ou de fuga (IL), por meio do dielétrico, flui pela superfície e pelo interior da massa do dielétrico, entre condutores ou de um condutor para a terra e é de caráter irreversível. Constitui-se no componente mais importante na medição do ensaio de isolamento em corrente contínua quando

se deseja avaliar o estado em que se encontra o isolamento. A Figura 57 mostra a corrente total de ensaio com seus três componentes definidas anteriormente.

Figura 57 - Componentes de corrente no ensaio de resistência do isolamento DC



Fonte: Paulino (2024).

Tal corrente não varia com o tempo de aplicação de tensão e, nestas condições, se houver alguma elevação de seu nível é indicativo que o isolamento pode vir a falhar (PAULINO, 2024).

O valor de resistência de isolamento é medido em 1 minuto e corrigido para a temperatura de referência (40°C) pela equação 1 ilustrada na Figura 58, conforme IEEE43.

Figura 58 - Equação 1: correção temperatura de referência

$$R_{\text{Isol}40^{\circ}\text{C}} = K_{40^{\circ}\text{C}} \cdot R_{\text{Medida}}$$

$$K_{40^{\circ}\text{C}} = (0,50)^{\frac{(40 - T_{\text{Medida}})}{10}}$$

Fonte: Weg (2020).

3.1.3.1.3.2.1.1 Índice de absorção e índice de polarização

De acordo com Merlin (2024), a absorção dielétrica é um fenômeno físico no qual o isolamento aparenta “absorver” e reter uma carga elétrica lentamente ao longo do tempo. Isso é demonstrado aplicando-se uma tensão a um capacitor por um longo

período de tempo e depois descarregá-lo rapidamente para tensão zero. Se o capacitor for deixado em circuito aberto por um longo período e depois for conectado a um voltímetro, o medidor exibirá uma pequena tensão. Essa tensão residual é causada pela “absorção dielétrica”. Esse fenômeno é comumente associado a capacitores eletrolíticos.

Conforme Koch (2024), o teste do índice de polarização (PI) é um método padrão de teste de motores elétricos desenvolvido nos anos 1800 que tenta determinar a saúde do isolamento do enrolamento de um motor.

Embora o teste PI forneça informações sobre sistemas de isolamento de paredes de terra (GWI) tipicamente instalados antes da década de 1970, não consegue fornecer uma condição exata do isolamento do enrolamento em motores modernos.

Os valores dos índices I_P e I_{Abs} são determinados pelas equações 2 e 3 ilustradas na Figura 59 e, se faz necessária, a medição de isolação em 30 segundos e 10 minutos

Figura 59 - Equação 2 e 3: valores dos índices I_P e I_{Abs}

$$I_P = \frac{R_{10\text{Minutos}}}{R_{1\text{Minuto}}} \quad [2]$$

$$I_{Abs} = \frac{R_{1\text{Minuto}}}{R_{30\text{Segundos}}} \quad [3]$$

Fonte: WEG (2020).

A Figura 60 mostra a tabela de critérios de avaliação para a medição de resistência de isolamento, conforme norma *IEEE43*.

Figura 60 - Critérios de avaliação para medição de resistência de isolamento (*IEEE43*)

Índice de absorção	Índice de polarização	Avaliação do isolamento
----	1 ou menor	Ruim
Abaixo de 1,1	<1,5	Perigoso
1,1 a 1,25	1,5 a 2,0	Regular
1,25 a 1,4	2,0 a 3,0	Bom
1,4 a 1,6	3,0 a 4,0	Muito bom
Acima de 1,6 (1)	>4,0	Ótimo

Fonte: WEG (2020).

O ensaio de medição da resistência isolamento não possui restrições, respeitando os valores de tensão nominal de trabalho do motor elétrico. Além disso, os instrumentos disponíveis no mercado têm tensão CC limitada em 15kV e, principalmente, potência insuficiente para manter uma fuga de corrente prejudicial ao enrolamento, reduzindo automaticamente a tensão aplicada (Weg, 2024).

3.1.3.1.3.2.1.2 Perdas dielétricas

O medidor de tangente de perda dielétrica (*tan delta meter*) é o instrumento utilizado para testar o estado de impregnação de verniz em motores elétricos (Figura 61).

A tangente de perda dielétrica é um indicador numérico da condição dos materiais isolantes elétricos. Quando uma tensão CA é aplicada ao isolador de um motor, ocorre perda dielétrica, que é expressa pela tangente de perda dielétrica. (Hioki, 2024).

Figura 61 - Medidor Tangente Delta



Fonte: Hioki (2024).

Os medidores de tangente de perda dielétrica fazem medições aplicando uma tensão comparativamente alta de 50 Hz ou 60 Hz. A perda dielétrica, ou a tangente de perda pode ser expressa da seguinte forma: $\tan \delta = 1/2\pi fCR_p$. Nesta fórmula, tan

δ aumenta à medida que a frequência f diminui. Em outras palavras, a diferença entre dois valores de $\tan \delta$ medidos em baixa frequência será maior do que os valores correspondentes obtidos por medições em 50 Hz/60 Hz, tornando mais fácil discernir as diferenças no estado de impregnação. Os medidores LCR podem medir $\tan \delta$ em frequências inferiores a 50 Hz/60 Hz (Hioki, 2024).

3.1.3.1.3.2.1.3 Teste

Os testes realizados por Hioki (2024) em que, Amostras de teste (quatro amostras de estator): peças defeituosas (volume insuficiente de verniz) e não defeituosas preparadas com impregnação por gotejamento, e peças defeituosas (resistência a vácuo insuficiente) e não defeituosas preparadas com impregnação a vácuo.

- Método de medição: A perda dielétrica, ou tangente de perda ($\tan \delta$) foi medida entre a bobina e o núcleo usando um medidor LCR. Como se trata de medir um isolador, uma caixa blindada foi preparada e as medições foram feitas após conectar a caixa blindada ao terminal blindado do medidor LCR.

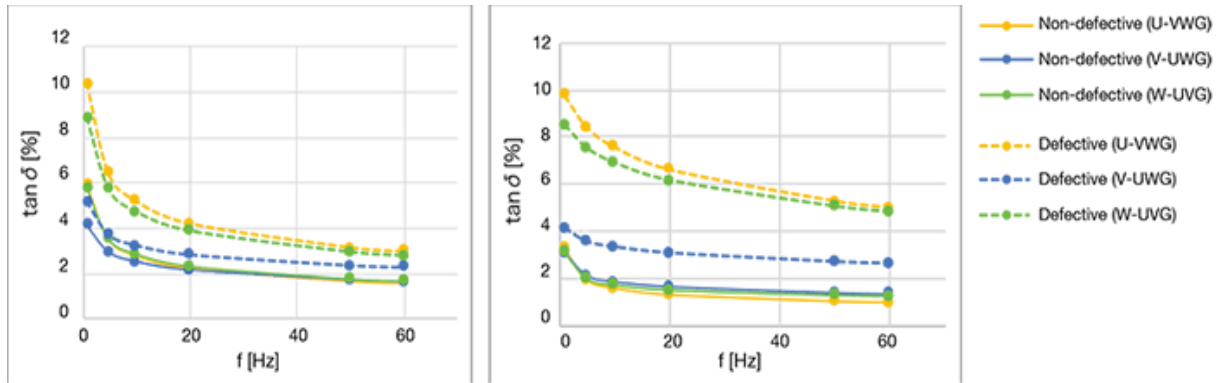
- Frequências de medição: 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 50 Hz, 60 Hz.

Seguindo assim para os resultados do teste aonde podemos ver os resultados pré-analisados.

3.1.3.1.3.2.1.4 Resultado do Teste

Os gráficos a seguir mostram as características f - $\tan \delta$ de amostras defeituosas/não defeituosas. A Figura 62 mostra a esquerda: impregnação por gotejamento, e a direita: impregnação a vácuo.

Figura 62 - Características f - $\tan \delta$ de amostras defeituosas/não defeituosas



Fonte: Hioki (2024).

Diferentes valores foram obtidos para as peças defeituosas e não defeituosas em todas as frequências de medição. A diferença entre peças defeituosas e não defeituosas foi mais pronunciada em frequências de medição mais baixas (Hioki, 2024).

3.1.3.1.3.2.2 Ensaio de Resistência Ôhmica de enrolamentos

Um ensaio de resistência ôhmica entre as fases de cada enrolamento pode identificar espiras em curto-circuito, mau contato, conexões incorretas e circuitos abertos.

Os procedimentos para a determinação de resistências ôhmicas estão entre os mais usuais. Consistem geralmente na determinação da resistência elétrica utilizando corrente contínua a uma determinada temperatura.

Para se ter precisão na medição do valor de resistência ôhmica entre enrolamentos, é utilizado um aparelho chamado Micro ohmímetro (Ponte Kelvin).

A medição da resistência ôhmica deverá ser feita com o motor frio, com temperatura estabilizada.

Deve se medir as resistências de fase, e verificar o equilíbrio. O desequilíbrio de resistências não deve ser superior a 5%, conforme equação abaixo:

$$DR = \frac{R_M}{R_m} - 1 (\times 100) = < 5\%$$

Onde:

DR = Desequilíbrio de Resistência

RM = Resistencia Maior

Rm = Resistencia menor

Caso esse valor calculado, apresente resultados acima de 5%, significa que o enrolamento está desequilibrado e necessita de uma manutenção corretiva,

geralmente esse erro é resultado de más conexões, que podem ser gerados por parafusos frouxos, terminais mal prensados, cabos e barras quebradas. Na maioria dos casos, consegue resolver sem a necessidade de desmontagem do motor.

Se o motor continuar trabalhando com esse desequilíbrio acima dos 5%, poderá acarretar em problemas maiores, podendo levar até a queima do bobinado.

3.1.3.1.4 Análise de óleo

Nos rolamentos podem ser usados dois tipos de lubrificantes: óleo e massa consistente. Os óleos são fluidos lubrificantes em que a sua fluidez é definida pela sua viscosidade. As massas são lubrificantes consistentes sendo que estas são definidas principalmente pela sua penetração (Melo, 2017). A massa consistente mais utilizada para lubrificação dos rolamentos dos motores elétricos é a graxa, devido sua simplicidade de aplicação e características únicas. As funções primárias de aplicação de uma graxa de rolamento nos motores elétricos são (Mobil, 2024): diminuição do gotejamento ou salpicos de óleo, diminuição da frequência de lubrificação, diminuir entrada de contaminantes, operações intermitentes, proteger os rolamentos contra corrosão e reduzir o atrito e evitar o desgaste.

A lubrificação por óleo é adequada para todos os tipos de rolamentos. No entanto, é amplamente recomendada em aplicações que envolvem máquinas de grande porte e/ou operação em altas rotações. Para garantir a eficiência do processo, é essencial implementar um sistema de resfriamento que auxilie na circulação do óleo, além de um filtro de partículas que contribua na remoção de contaminantes. Isso assegura a manutenção ideal das condições de lubrificação.

Sua função é criar uma película fluida entre as superfícies de contato, dissipando o calor gerado na zona de carga. Em certas condições, a lubrificação oleosa é a opção preferencial, especialmente em rolamentos axiais autocompensadores de rolos, comumente empregados em motores verticais com mancal de escora submetidos a altas cargas axiais. Nestes casos, o projeto do rolamento facilita o bombeamento do óleo, otimizando o fluxo e a capacidade de lubrificação e resfriamento (Weg, 2024). A adequação do óleo é crucial para minimizar desvantagens, como o risco de vazamento e o aumento das perdas decorrentes do cisalhamento do fluido, causado pela agitação do lubrificante dentro do reservatório do mancal.

Para rolamentos operando em alta velocidade, a lubrificação a óleo também é recomendada. Assim como em mancais hidrodinâmicos, métodos auxiliares podem ser implementados, incluindo banho de óleo, lubrificação forçada e sistemas de injeção por jato ou névoa de óleo.

A análise de óleo em sistemas lubrificadas possui dois objetivos principais. Inicialmente, visa otimizar o intervalo entre trocas de óleo, contribuindo para a redução de custos. Posteriormente, sua aplicação estendeu-se ao monitoramento da condição do sistema, permitindo a detecção precoce de defeitos e a implementação de manutenção preditiva.

A metodologia empregada consiste na quantificação da taxa de contaminação do óleo e na análise da natureza dessa contaminação. O princípio fundamental é que, durante a operação, as peças lubrificadas liberam partículas provenientes do desgaste, contaminando o fluido lubrificante. A análise da concentração de partículas sólidas, sua composição e tamanho permite identificar problemas operacionais e determinar suas causas (Adyles Junior, 2004).

Conforme citado por Weg (2020), segundo os dados do IEEE, mais de 40 % das falhas nos motores elétricos são causadas por falhas nos rolamentos e, por sua vez, a grande maioria das falhas de rolamentos devem-se aos processos de lubrificação. Portanto, a lubrificação adequada de motores elétricos é uma parte essencial para mantê-los em condições ideais de operação e, conseqüentemente, também para reduzir interrupções desnecessárias de produção.

Segundo Engfaz (2024), a análise de óleo na manutenção preditiva desempenha um papel fundamental na garantia do desempenho confiável de máquinas e equipamentos.

A análise de óleo permite estender a troca de óleo, o que ocasiona um aumento da vida útil do motor, dos componentes como engrenagens rolamentos, isso ajuda na redução de custo de material de reposição, identificar problemas menores antes que se tornem falhas maiores, oferecer maior disponibilidade dos equipamentos, o que leva a otimização da produção, realizar interferências com elevado grau de precisão, maximizar a confiabilidade (LAboroil, 2024).

3.1.3.1.4.1 Viscosidade

A viscosidade é uma propriedade física crucial para a lubrificação, e suas variações indicam potenciais falhas.

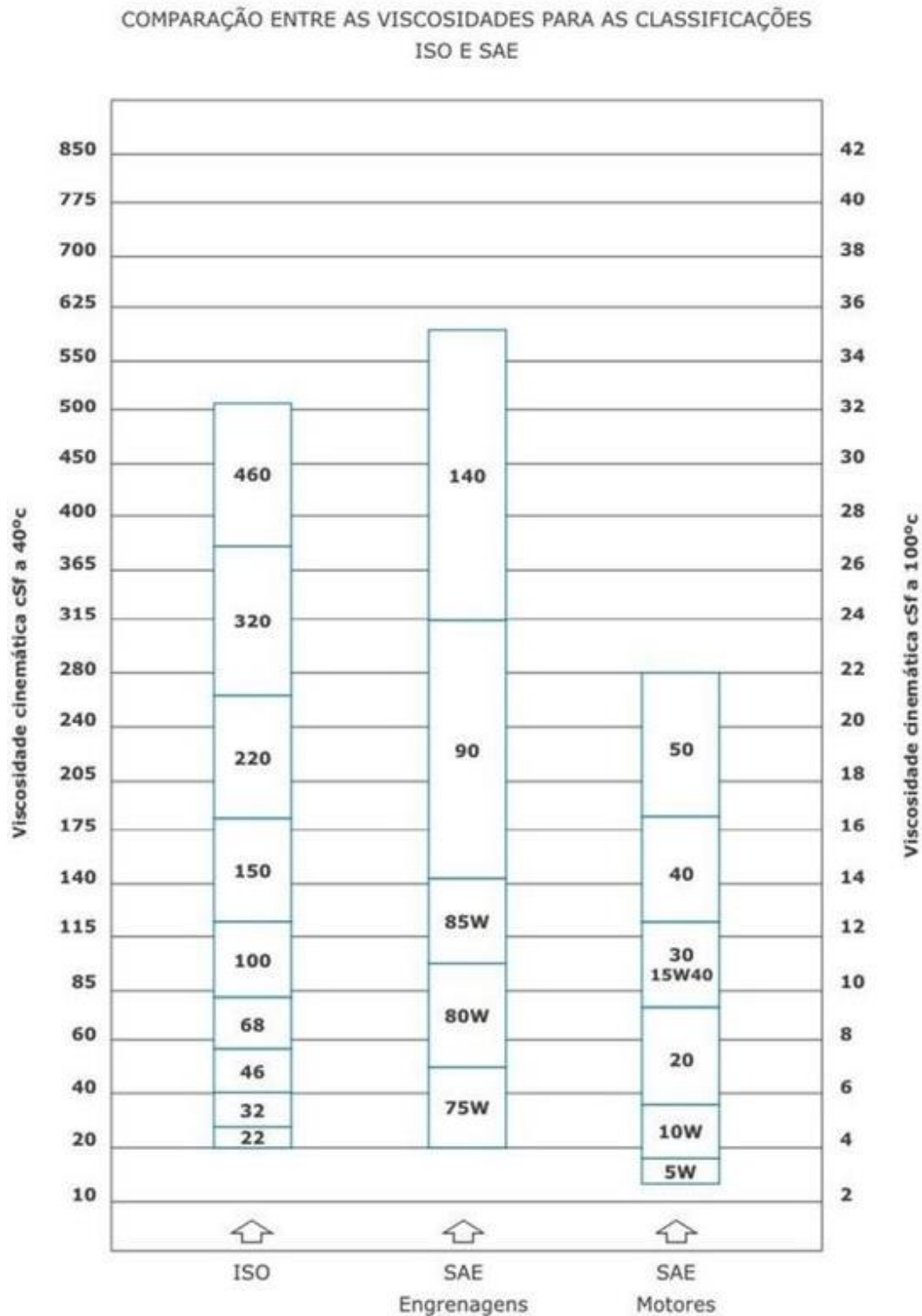
De acordo com Móbil (2024), a lubrificação adequada de motores elétricos é uma parte essencial para mantê-los em condições ideais de operação e, conseqüentemente, também para reduzir interrupções desnecessárias de produção. O conceito básico de viscosidade é resistência ao escoamento.

Conforme citado por Servilub (2024), os motores que trabalham com uma velocidade de rotação entre 1200 e 3600 rpm podem ser lubrificados com um óleo de 90 cSt (grau de viscosidade) até 120 cSt, em uma temperatura de 40°C. Essas são as condições ideais para motores desse tipo.

O objetivo do ensaio de verificação da viscosidade é conhecer o seu valor para analisar eventuais desvios de valor típico referenciado pelas tabelas de referência, e ficha técnica do lubrificante, com os valores das características do produto, definidos pelo fabricante (Laboroil, 2024).

A viscosidade é essencial no fornecimento da folga necessária entre as superfícies em movimento e deslizantes. A viscosidade imprópria é um indicador de falha geral de lubrificação. Mudanças nos níveis de viscosidade podem ser um indicativo de muitas condições de falhas potenciais. Uma redução na viscosidade do lubrificante pode ser causada por aumento de temperatura, excessivo desgaste devido a lubrificação pobre e controle reduzido e precisão. Um aumento pode causar aumento de temperatura e redução da eficiência mecânica e de energia da máquina (Moubray, 2000). A Figura 63 ilustra uma tabela comparativa de viscosidade nas temperaturas de 40°C e 100°C.

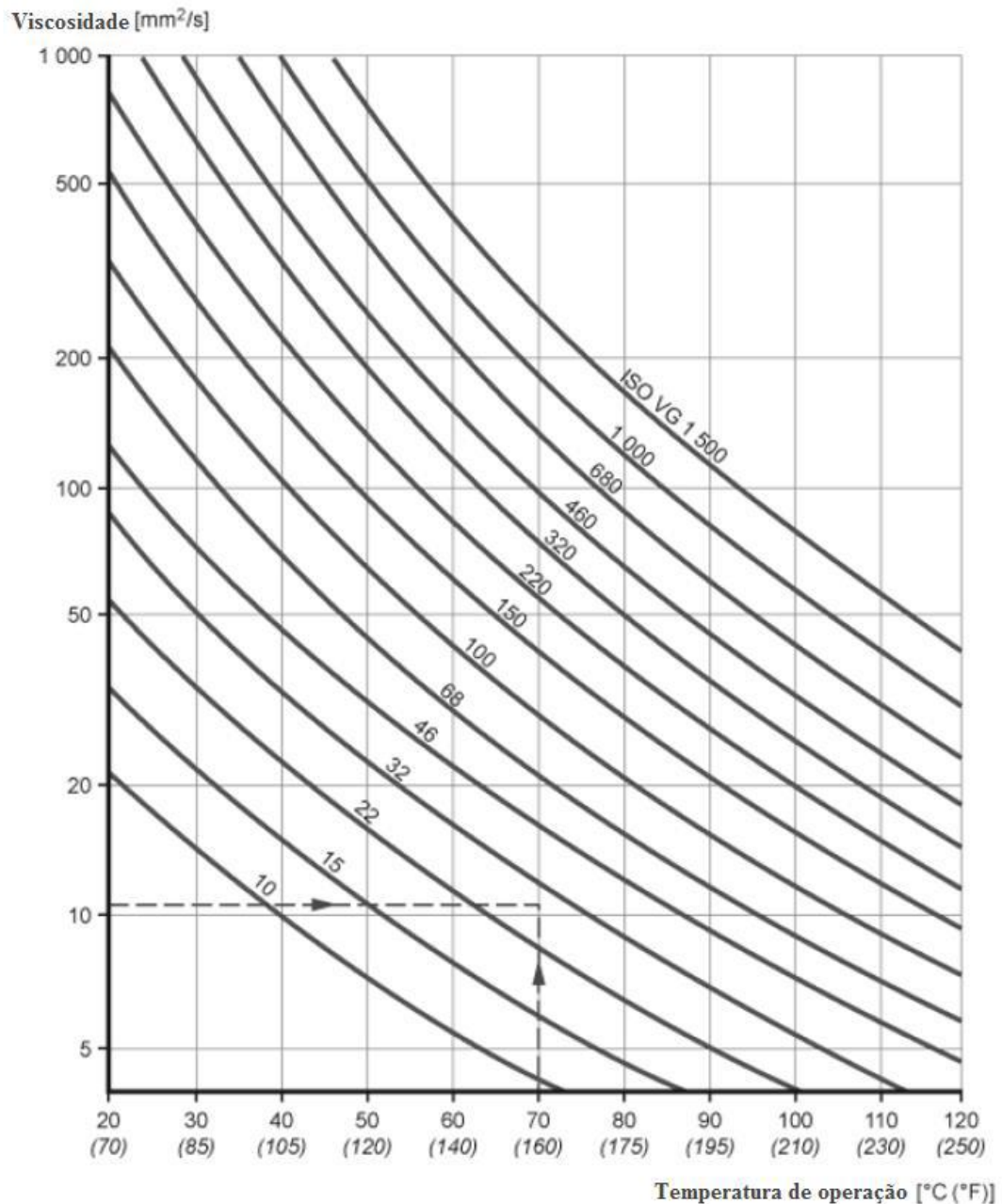
Figura 63 - Comparação entre viscosidade para classificações ISO e SAE



Fonte: Laboroil (2024).

A fim de alcançar um fator $kappa > 1$, a viscosidade cinemática do fluido lubrificante deve ser maior que 11 cSt. A Figura 64 indica que o grau de viscosidade ISO do lubrificante precisar ser ISO VG 32 ou maior (Weg, 2020).

Figura 64 - Diagrama viscosidade-temperatura para óleo ISO VG (Óleo mineral com índice de viscosidade 95)



Fonte: Weg (2020).

De acordo com a norma ISO 281:2007 Rolamentos - Classificação de carga dinâmica e vida nominal, o fator de vida ajustado aumenta a resistência à fadiga em rolamentos devido à melhoria da lubrificação EHD proporcionada por maior viscosidade. No entanto, observa-se um limite nos benefícios decorrentes do aumento da viscosidade (Weg, 2020). Recomenda-se, geralmente, um fator kappa inferior a 4,0. Este limite é válido para ambos os tipos de lubrificação (graxa e óleo). O aumento do fator kappa implica um incremento nas tensões de cisalhamento do lubrificante,

resultando em maior perda por atrito e, conseqüentemente, aumento da temperatura do mancal. Em algumas aplicações, o fator kappa pode ultrapassar os limites recomendados. Nesses casos, para equipamentos similares, sugere-se a utilização de lubrificantes com aditivos ou a avaliação da combinação de espessantes e óleos base para otimizar as condições de lubrificação.

3.1.3.1.4.2 Umidade

A presença de água em óleos lubrificantes acarreta redução significativa na vida útil dos equipamentos e componentes. Em rolamentos e mancais de bucha, por exemplo, a diminuição pode chegar a 100 vezes. Além disso, a água compromete as propriedades lubrificantes, como demonstrado pela degradação completa de aditivos anticorrosivos em um teste com apenas uma gota de água em 5 litros de óleo a 85°C. Os efeitos nocivos da água no óleo podem ser assim categorizados:

- Oxidação acelerada: com formação de borra e resinas.
- Aumento da condutividade: especialmente prejudicial em transformadores.
- Reação com antioxidantes: gerando ácidos e precipitando sais.
- Reação com aditivos antidesgaste a base de zinco e fosfato (ZDDP): produzindo sulfeto de hidrogênio e ácido sulfúrico.
- Proliferação microbiana: favorecida pela presença de água.
- Alteração da viscosidade do óleo

Conforme Laboroil (2024), inicialmente, usa-se um método qualitativo, simples que é a Crepitação (Figura 65), quando o óleo é jogado em chapa com temperatura controlada (Figura 66); casos positivos de presença de água são levados para a realização de testes. E os métodos quantitativos que são obtidos pelos ensaios através do método Karl Fischer.

O ideal é que a presença de água esteja abaixo de 0,1 %. Quando reportamos resultado = 0,0 %, significa que, em teste qualitativo de Crepitação (na chapa quente), não foi detectada presença de água.

Figura 65 - Teste de crepitação



Fonte: Mundo als (2024).

Figura 66 - Chapa de crepitação Aquecedora Digital



Fonte: Eximport (2024).

A chapa aquecedora de crepitação para laboratório consiste em uma chapa, cuja temperatura pode ser regulada conforme as necessidades do analista técnico.

O teste de crepitação é prático e rápido para detectar presença de água livre e emulsionada no óleo lubrificante.

Para realizar o teste, as seguintes etapas devem ser seguidas:

- Ligar a chapa quente e aumentar a temperatura para 160°C (320°F). Utilizar sempre a mesma temperatura.
- Agitar a amostra de óleo para obter uma mistura homogênea de água no óleo. Usando um conta-gotas limpo, colocar uma gota de óleo na placa quente.

Observar como ficará o óleo seguindo as imagens orientativas das figuras 67,68,69,70 abaixo:

Se não são produzidas bolhas de ar ou barulho após alguns segundos, não há presença de água livre ou emulsionada (Figura 67), (Eximport, 2024).

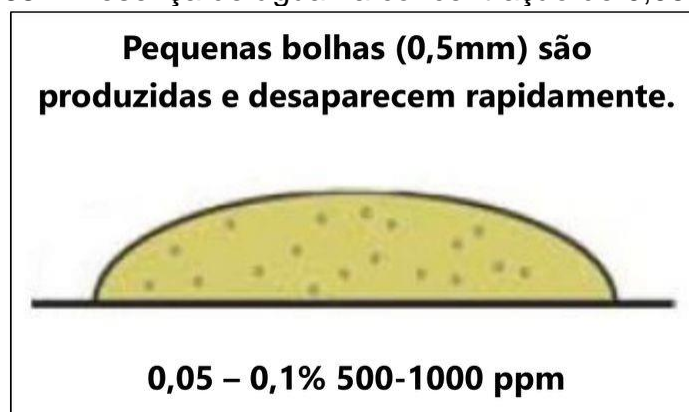
Figura 67 - Nenhuma presença de água livre ou emulsionada



Fonte: Eximport (2024).

Se forem produzidas bolhas muito pequenas (0,5 mm), mas que desaparecem rapidamente, existe presença de aproximadamente 0,05 a 0,10 por cento de água (Figura 68).

Figura 68 - Presença de água na concentração de 0,05 a 0,10%



Fonte: Eximport (2024).

São produzidas bolhas de aproximadamente 2 mm, se juntam ao centro da gota de óleo, aumentando para cerca de 4 mm, desaparecendo em seguida, presença de aproximadamente 0,1 a 0,2% de água (Figura 69).

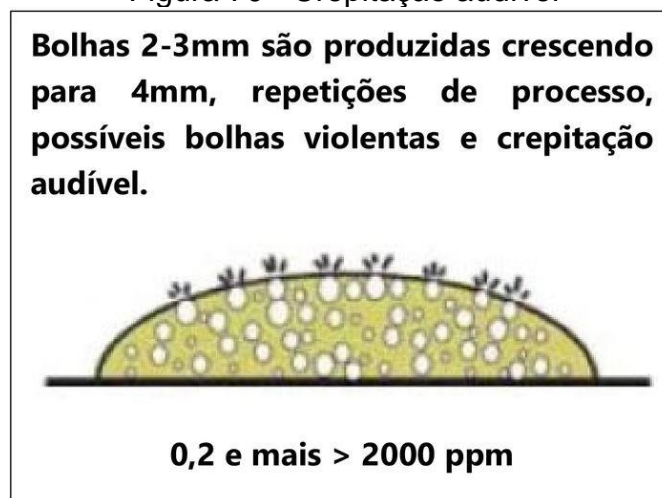
Figura 69 - Presença de água na concentração de 0,1 a 0,2%



Fonte: Eximport (2024).

Para níveis de umidade acima de 0,2 %, as bolhas podem iniciar em cerca de 2 a 3 mm e crescem até 4 mm, com o processo repetindo uma ou duas vezes. Para níveis de umidade ainda maiores, (Figura 70) podem resultar em bolhas violentas e crepitação audível.

Figura 70 - Crepitação audível



Fonte: Eximport (2024).

Os métodos quantitativos são obtidos pelos ensaios através do método Karl Fischer que é subdividido em dois modos de ensaios que são o Karl Fisher Volumétrico e o Coulométrico.

O método Karl Fisher Volumétrico oferece resultados em ppm (partes por milhão), quando se tem resultados até 1000 (1000 ppm). A partir dessa quantidade, os resultados são expressos em percentuais, sendo 1000 ppm = 0,1%.

Há, ainda, o método Karl Fischer Coulométrico, usado em situações específicas.

3.1.3.1.4.3 TAN – Número de Acidez Total

De acordo com Móbil (2024), o principal objetivo deste ensaio é avaliar a oxidação provocada pela reação do oxigênio presente no ar com o lubrificante.

Os lubrificantes contam com aditivos antioxidantes que, inicialmente, inibem este processo; porém, chega um momento em que o oxigênio começa a reagir com o lubrificante, provocando alterações no óleo como aumento do TAN, surgimento de produtos de oxidação e/ou de borras - identificados na Particografia ou Morfologia de Partículas. Essas substâncias provocam escurecimento do produto e aumento da viscosidade (Móbil, 2024).

Conforme Móbil (2024), na maioria dos óleos, o TAN apresenta resultados abaixo de 1 e alguns produtos de bases sintéticas ou com pacotes de aditivos mais concentrados podem apresentar valores entre 2 e 3, quando novos.

Por isso, o ideal para este ensaio é monitorar a progressão desse indicador, admitindo que, os aumentos significativos/abruptos apontam para início de problema e se combinados com alterações na viscosidade ou o surgimento de produtos de oxidação e de borras podem indicar problemas mais graves (Móbil, 2024).

3.1.3.1.4.4 Contagem de Partículas

De acordo com Móbil (2024), a Contagem de Partículas é um ensaio que foi desenvolvido para quantificar e classificar o nível de contaminação em lubrificantes e em outros produtos. Trata-se de um dos principais ensaios realizados em sistemas hidráulicos e em outros sistemas mais críticos e atualmente algumas empresas tem utilizado este ensaio em sistemas onde inicialmente não recomendamos este ensaio como, por exemplo, sistemas de engrenagens.

E conforme SKF (2024), a contagem de partículas é considerada por muitos como o teste mais crítico para análise de óleo usado. A contagem de partículas mede e informa o tamanho e o escopo das partículas encontradas no óleo lubrificante e é especialmente útil para equipamentos hidráulicos. Seja por meio de uma contagem de partículas no local ou do envio de uma amostra a um laboratório comercial para

testes, os dados de contagem de partículas podem fornecer informações valiosas sobre a saúde de equipamentos e lubrificantes.

A Figura 71 ilustra a Tabela AS4059 de referência que mostra a quantidade de partículas que foram encontradas em 100ml, e dentro de contagem ou microscópio eletrônico.

Figura 71 - Tabela AS4059

Tabela AS 4059							
Limite de Contaminação Máxima - (partículas/ 100ml)							
Tamanho ISO 4402 Calibração ou Contagem opcional	>1 μ	>5 μ	>15 μ	>25 μ	> 50 μ	>100 μ	
Tamanho ISO 11171 Calibração ou Microscópio Eletrônico	>4 μ (c)	>6 μ (c)	>14 μ (c)	>21 μ (c)	>38 μ (c)	>70 μ (c)	
Classes	AS 4059	A	B	C	D	E	F
	000	195	76	14	3	1	0
	00	390	152	27	5	1	0
	0	780	304	54	10	2	0
	1	1.560	609	109	20	4	1
	2	3.120	1.220	217	39	7	1
	3	6.250	2.430	432	76	13	2
	4	12.500	4.860	864	152	26	4
	5	25.000	9.730	1.730	306	52	8
	6	50000	19.500	3.460	612	106	16
	7	100.000	38.900	6.920	1.220	212	32
	8	200.000	77.900	13.900	2.450	424	64
	9	400.000	156.000	27.700	4.900	848	128
	10	800.000	311.000	55.400	9.800	1.700	256
11	1.600.000	623.000	111.000	19.600	3.390	512	
12	3.200.000	1.250.000	222.000	39.200	6.780	1.024	

Fonte: Mobil (2024).

Conforme citado por Laboroil (2024), existem vários aparelhos e vários métodos para fazer este ensaio. O mais utilizado é o que utiliza a técnica do laser que tem um ótimo custo /benefício, mas em amostras contaminadas por água em nível mais elevado, pode ocorrer interferência e termos resultados elevados, neste

caso, recomenda-se a Contagem Ótica que também é recomendada para produtos mais escuros e à base de água.

A Figura 72 refere-se ao Contador de Partículas de óleo hidráulico que foi desenvolvido para diagnosticar os contaminantes de Sistemas Hidráulicos, e para que seja manuseado é necessário que seu operador tenha conhecimentos técnicos e específicos sobre o equipamento (Global Hidráulica e Pneumática, 2023).

Figura 72 - Contador de Partículas Portátil



Fonte: Global Hidráulica e pneumática (2024).

De acordo com a Global Hidráulica e Pneumática (2023), o equipamento em questão oferece um monitoramento avançado da qualidade do fluido, utilizando um controlador digital microprocessado de alta tecnologia. Esse sistema conta com sensores que realizam a contagem das partículas com extrema precisão, sendo capazes de detectar partículas com tamanhos a partir de $4\ \mu\text{m}$, ou seja, partículas que não são visíveis a olho nu. Além disso, os painéis digitais fornecem informações sobre o tamanho e a quantidade dessas partículas, enquanto os sensores também monitoram a temperatura e a viscosidade do fluido, garantindo um controle completo da qualidade.

3.1.3.1.4.5 Espectrometria.

"A Espectrometria é um ensaio utilizado para identificar e quantificar os elementos químicos presentes no lubrificante. Com esses resultados, podemos concluir sobre situações de falhas do equipamento e aditivação dos lubrificantes" (Laboroil, 2024).

De acordo com Laboroil (2024), O tamanho das partículas analisadas neste ensaio não passa de 5 micra. Para se ter uma ideia, o olho humano não consegue enxergar partículas de tamanho inferior a 40 micra, ou seja, estas partículas são tão pequenas que são dissolvidas nos lubrificantes e o resultado dos ensaios é dado em ppm ou partículas por milhão.

Existem diferentes tecnologias de medição para análise, tais como a emissão óptica e a emissão por plasma acoplado. Ao se compararem resultados de um produto analisado em aparelhos diferentes, deve-se ficar atento, pois os resultados podem variar (Laboroil, 2024).

De acordo com Laboroil (2024), a Particografia ou Microscopia Ótica ou Morfologia de Partículas é um ensaio utilizado para identificar partículas de desgaste e de contaminação nos lubrificantes.

Conforme citado por Laboroil (2024) são usados diferentes tipos de microscópios, todos com softwares ou equipamentos para registro das imagens das partículas. Estes equipamentos conseguem identificar os principais elementos presentes nas amostras analisadas.

3.1.3.1.4.6 Ferrografia

Considerando que o lubrificante atua como vetor das partículas de desgaste geradas por uma máquina, o estudo da evolução da concentração de partículas em suspensão, de sua natureza, constituição, dimensões e morfologia configura um procedimento eficaz para identificar e sanar anomalias (Adyles Junior, 2004).

A análise da natureza da partícula permite identificar sua origem e é fundamental para definir qual componente da máquina está sendo monitorado. O estudo das dimensões das diferentes partículas possibilita a identificação dos diferentes níveis de desgaste. Uma classificação relativa do nível de desgaste em função da distribuição das dimensões das partículas pode ser categorizada em: desgaste normal (0,1 a 1,0 μm , com partículas maiores não ultrapassando 10 μm);

desgaste acentuado (0,1 a 10 μm , com partículas maiores atingindo 100 μm); desgaste avançado (aumento da concentração de partículas na faixa de 100 μm); e desgaste catastrófico (maior concentração entre 100 e 1000 μm , indicando defeito por atrito) (Adyles Junior, 2024).

A morfologia da partícula auxilia na identificação do modo de desgaste. As principais técnicas utilizadas na análise do resíduo sólido dos óleos para estabelecer uma classificação das partículas em um diagnóstico por desgaste são: ferrografia por leitura direta, realizada com base na extração das partículas contaminantes magnetizáveis presentes no lubrificante, por meio da ação de um campo magnético. O equipamento distribui as partículas segundo o tamanho, em que partículas menores percorrem menor distância no campo magnético, enquanto as não magnéticas permanecem "fixadas", espectrometria de emissão, tem por finalidade determinar a natureza e a concentração dos elementos presentes em uma amostra através da análise da faixa e intensidade da radiação luminosa emitida pela amostra quando submetida a uma excitação e a ferrografia analítica que é usada para fazer um estudo profundo das partículas (contaminantes) cujo tamanho esteja entre 1 e 250 μm . Ela consiste em construir um ferrograma, que é uma chapa de vidro sobre a qual são distribuídos os contaminantes em função do seu tamanho. A análise é complementada utilizando microscopia óptica (Moubray, 2000).

A ferrografia é uma técnica laboratorial de manutenção preditiva para o monitoramento e diagnose de condições de máquinas. A partir da quantificação e análise da morfologia das partículas de desgaste (limalhas), encontradas em amostras de lubrificantes, determinam-se os tipos de desgaste, contaminantes, desempenho do lubrificante, etc. A ferrografia é classificada como uma técnica de manutenção preditiva, embora possua inúmeras outras aplicações, tais como desenvolvimento de materiais e lubrificantes (MM Tec, 2024).

Conforme citado por grupo Filtroil (2024), a ferrografia se divide em dois tipos: quantitativa e analítica. Aqui, vamos focar no segundo tipo. No entanto, vamos diferenciá-los brevemente. Na quantitativa, o enfoque é a quantificação de partículas, observando a quantidade e tamanho encontrado na amostra.

Já na ferrografia analítica, as partículas são analisadas a fim de definir o desgaste. Esse método é mais completo, pois estabelece os tipos de desgaste, forma das partículas e sua natureza. Na Figura 73 é ilustrado alguns exemplos de análise ferrografia de tipos de desgaste e forma das partículas vista pela microscopia.

Figura 73 - exemplos de partículas vistas na análise de ferrografia



Fonte: Filtroil (2024).

A ferrografia analítica se compara a uma biópsia, quando já há um problema identificado, mas é preciso saber o nível do desgaste e em qual componente ele ocorre. (Filtroil, 2024).

De acordo com Filtroil (2024), a análise consiste em colocar uma amostra de óleo do equipamento num frasco, posteriormente passar o óleo em um separador de partículas e, através de um campo magnético, as partículas serão atraídas em uma lâmina de vidro, a partir de então, as partículas são quantificadas e observadas durante o tempo necessário para analisar suas principais características.

Por ser uma estratégia de manutenção preditiva, a ferrografia deve ser uma atividade prevista no Plano de Manutenção da empresa. A frequência vai depender do tipo, idade, histórico e situação do ativo, além de recomendações do fabricante. (de Cássia, 2024).

Foi dado grande ênfase as análises tribológicas ao presente tópico, devido ao fato da grande maioria das falhas de rolamentos e mancais das grandes máquinas serem produzidas por processos de lubrificação. Nestes casos, os testes podem ser usados para ajustar o plano de lubrificação dos motores em função dos resultados das análises aos lubrificantes (Melo, 2017). No entanto, isto só é possível se for

garantido a limpeza dos locais onde são retiradas as amostras do lubrificante, senão estas facilmente serão contaminadas.

A condição da lubrificação exerce influência direta na performance dos mancais, impactando significativamente aspectos críticos como a vida útil, a temperatura de operação, a vibração e o desgaste. A lubrificação adequada é fundamental para a confiabilidade operacional de máquinas elétricas rotativas.

3.1.4 Gestão da Manutenção

3.1.4.1 Importância do controle da manutenção

Para todo processo de produção, paradas é algo que diminui a entrada de receita, por isso, paradas não programadas causam prejuízos que se não controlados, podem inviabilizar qualquer negócio. Grandes empreendimentos possuem controle de custo detalhado, tendo uma divisão entre custos previstos de manutenção, investimentos e também há os custos com manutenção corretiva, que acontecerá em qualquer negócio, mas de forma limitada.

O controle de manutenção aplicado para os motores elétricos em uma indústria desse porte é bastante amplo, sendo necessário obter controle de planos de manutenção, controle do custo e monitoramento das condições dos equipamentos, para efetuar as devidas manutenções de forma programada, conforme a condição de cada equipamento, tendo também a importância de se obedecer aos manuais de operação de cada máquina. O controle esperado, dependerá de pessoas para execução da manutenção, mas também dependerá de um sistema de gerenciamento atualizado, para facilitar as interações entre as partes.

Tornou se necessário medir os custos e controla-los através do planejamento da manutenção. Através desse planejamento, também consegue-se definir alguns itens importantes como: o que fazer, quando fazer, quem deve fazer, como fazer, onde fazer.

O controle de manutenção adotado para os motores elétricos deve seguir um conceito geral, e assim definir os tipos de manutenção a ser aplicado em cada um dos ativos.

Segundo Slack et al. (2007), a manutenção consiste no conjunto de ações empregadas pelas organizações para preservar a integridade de seus ativos,

prevenido danos e considerando as implicações de eventuais problemas para o funcionamento do sistema.

Mesmo trabalhando fortemente para evitar falhas, elas ainda poderão e vão ocorrer, por isso é muito importante, controlar o nível de ocorrências não programadas.

De acordo com a NBR 5462 (ABNT, 1994), falha é um evento que faz com que o equipamento não tenha a capacidade de desempenhar as funções preestabelecidas, enquanto defeito representa uma irregularidade de uma característica de um componente em relação aos seus requisitos.

Evidentemente, o tipo de instalação ou equipamento pode determinar variações desses valores para mais ou menos. De modo geral, o gestor de manutenção deve manter as práticas corretivas não planejadas em até 20%, sendo sempre bom restringi-las ao máximo. As outras práticas não possuem um limite próximo: no Brasil, a manutenção preventiva costuma oscilar entre 30% e 40%. Em padrões de confiabilidade global, as empresas sempre mantêm a manutenção preditiva com a maior porcentagem na distribuição. (Tractian,2024).

Conforme já apresentado nos tópicos anteriores, cada tipo de manutenção tem seu papel de importância na indústria e, nos próximos tópicos, é mostrado a forma de medir e controlar todas elas, de acordo com os estudos apresentados, para se ter um resultado positivo de eficiência e conseqüentemente, obter vantagem financeira, o processo de manutenção de cada unidade fabril deve ser configurado de forma personalizada.

A Figura 74, demonstra a ilustração de um CMMS (Computerized Maintenance Management System) ou Software de Manutenção é capaz de harmonizar as operações na indústria como: planejamento, controle, desempenho operacional e produtividade.

Figura 74 – CMMS



Fonte: Tractian (2024)

3.1.4.2 Responsabilidades da Manutenção

A manutenção passou por transformações a partir de 1930 e, conseqüentemente, suas responsabilidades sofreram alterações. Na primeira geração, a manutenção era basicamente corretiva, uma vez que os equipamentos eram de baixa complexidade e superdimensionados. A segunda geração foi marcada por manutenções preventivas, pois começou a se processar a visão de disponibilidade e confiabilidade. A terceira geração reforçou a necessidade de manutenção preditiva devido à maior automatização dos processos e à tendência mundial de utilização do just-in-time (Pinto; Xavier, 2002).

Os processos de manutenção, vem sendo atualizado conforme as gerações mudam, há pouco tempo considerava-se que a manutenção preventiva necessitava de uma previsibilidade e, isso é possível, através da manutenção preditiva. Hoje estamos numa era em que somente essa previsão dos acontecimentos não é satisfatória, por isso os processos preditivos ganharam força e trouxeram para o mercado, ferramentas capazes de coletar e analisar dados importantes dos sintomas de maquinas, assim as tomadas de decisão são mais assertivas e os prejuízos são menores. A gestão da manutenção é definida como um conjunto coordenado de ações, decisões e definições estratégicas, que visa utilizar recursos fornecidos para manter e fornecer serviços especializados dentro do escopo da manutenção. É um processo que começa com um objetivo e se desenvolve em sua concepção, abrangendo todos os aspectos da manutenção. Na Figura 75 é ilustrado o quadro resumido das funções da manutenção.

Figura 75 - Responsabilidades da manutenção



Fonte: Gregório; Santos; Prata (2018).

Para que o processo funcione bem, é necessário dividir as responsabilidades da manutenção:

- planejamento
- Controle
- Execução
- Organização

3.1.4.2.1 Planejamento de Manutenção

O planejamento de manutenção, é o setor estratégico, que deve garantir que os ativos da empresa tenham uma manutenção adequada conforme a determinação de fabricante, conforme a realidade de cada empresa e também pelo histórico de cada equipamento. Segue abaixo algumas das reponsabilidades desse setor:

- Definição do tipo de manutenção adequada;
- Definição dos procedimentos para trocas e reparos;
- Definição da periodicidade de cada manutenção;
- Suprimento dos recursos materiais necessários para as manutenções;
- Interface entre o sistema de gerenciamento e os demais envolvidos;
- Monitoramento dos níveis de execução, conforme programação;
- Controle dos custos da manutenção (CAPEX e OPEX)

As manutenções determinadas para cada equipamento, são estruturadas e organizadas por planos de manutenção. De acordo com o manual técnico, os planos são montados, seus intervalos, tipos de consumíveis, ferramentas necessárias, entre outras informações importantes.

Os planos de manutenção criados no sistema de gestão da manutenção (SAP). São configurados para gerar ordens sistemáticas conforme o período escolhido de intervalo, também é possível gerar uma ordem de manutenção manualmente, devido a uma situação apontada pelos inspetores, mas esse caso será comentado no tópico do tema da “Execução”.

Para o caso dos motores, dividimos os planos por tipos de motores, e nesse caso, possuímos nessa unidade fabril, dois tipos de motores de indução: Motores de baixa tensão (abaixo de 1000V) e Motores de média tensão (acima de 1000V).

O motivo da diferenciação dos planos para os motores são as suas particularidades e suas complexidades.

Nos motores de baixa tensão, que trabalham com a tensão de 440v, podem receber manutenções preventivas sistemáticas, para:

- Abrir caixa de ligação, checar conexões, verificar estado de vedações;
- Conferir estado de limpeza geral da carcaça, estado da ventoinha, e outros acessórios como encoder, tampas, parafusos;
- Medir isolamento das bobinas do estator, medir as resistências ôhmicas entre as bobinas.

Para alguns casos mais específicos, de motores que operam em regimes especiais ou condições de risco de paradas incidentais, existem planos específicos, que recomendam a troca de componentes por número de horas atingido de operação (exemplo: troca de rolamentos).

A frequência para o plano sistemático citado acima para os motores considerados de pequeno porte, tem um intervalo de três meses, podendo ser também de seis meses, dependendo da cadeia de produção em que ele se encontra. A Figura 76 exemplifica um roteiro de tarefas de manutenção utilizado para motores de baixa tensão.

Figura 76 - Itens de verificação de uma ordem de manutenção motores de baixa tensão

DdsCabeç.											
Operações											
Componentes											
Custos											
Parceiro											
Objetos											
Dados adic.											
Localiz.											
Planej.											
Cc											
Oper	SOp	CenTrab	Cen...	Cha...	ChvMode	C..	Txt.breve operação			Te...	Tral
<input type="checkbox"/>	0010	ELE	B108	PM01	0		INSPECIONAR CARCAÇA DO MOTOR.				
<input type="checkbox"/>	0020	ELE	B108	PM01	0		VERIFICAR VISUALMENTE OS PARAFUSOS DA BA				
<input type="checkbox"/>	0030	ELE	B108	PM01	0		VERIFICAÇÃO DA VENTONHA DO MOTOR				
<input type="checkbox"/>	0040	ELE	B108	PM01	0		VERIFICAR O ESTADO DA CAIXA DE LIGAÇÕES.				
<input type="checkbox"/>	0050	ELE	B108	PM01	0		VERIFICAR PROTEÇÃO DO ACOPLAMENTO.				
<input type="checkbox"/>	0060	ELE	B108	PM01	0		INSPEÇÃO BOTOEIRA.				
<input type="checkbox"/>	0070	ELE	B108	PM01	0		VERIFICAR APERTO DO CONECTOR TERRA.				
<input type="checkbox"/>	0080	ELE	B108	PM01	0		MEDIR RESISTENCIA OHMICA.				
<input type="checkbox"/>	0090	ELE	B108	PM01	0		INSPEÇÃO PAINEL DE COMANDO GAVETA CCM.				
<input type="checkbox"/>	0100	ELE	B108	PM01	0		MEDIR RESISTENCIA ISOLAÇÃO.				

Fonte: Autoria própria (2024).

Já os motores de média tensão, que trabalham geralmente com tensão de 4160v ou 6600v, temos uma manutenção específica, diferenciada dos demais.

Mesmo sendo ambos considerados de média tensão, os dois tipos de motores de media tensão citados aqui, podem se diferenciar em dois tipos também: Motores com rotor bobinado ou Motores com rotor curto-circuitados.

Os motores com rotor bobinado, possuem um dispositivo de partida, chamado de hidro-reostato. Que também estará incluído no plano de manutenção desse motor.

Os motores de rotor bobinado, possuem 3 planos de manutenção diferentes, que se diferenciam por intervalo de tempo e também atividades diferentes:







3.1.4.2.1.1 Plano quinzenal

Esse plano visa checar os itens pertencentes ao rotor desse motor, segue as tarefas a serem realizadas nesse plano:

- Limpeza do compartimento do anel coletor;
- Medir isolamento entre as fases do anel coletor e a terra;
- Medir o tamanho das escovas.

Através da medição da isolamento do motor em três tempos diferentes (1min, 5 min, 10 min) determinamos alguns índices importantes para saber da saúde do motor. IA e IP. A Figura 77 ilustra o roteiro de manutenção com as respectivas tarefas para os motores de rotor bobinado.

Figura 77 - itens de verificação de uma ordem de manutenção de motores de rotor bobinado

Oper	SOp	CenTrab	Cen...	Cha...	ChvMode	C...	Txt.breve operação	Te...	Traba
<input type="checkbox"/>	0010	ELE	B108	PM01		0	INSPECIONAR TROCADOR DE CALOR .		
<input type="checkbox"/>	0020	ELE	B108	PM01	EEM0300	0	REALIZAR CONTROLE DE DESGASTE DAS ESCOVA		
<input type="checkbox"/>	0030	ELE	B108	PM01		0	VERIFICAR PATINA SUPERFÍCIE ANÉIS.		
<input type="checkbox"/>	0040	ELE	B108	PM01	EEM0230	0	VERIFICAR VISUALMENTE OS PARAFUSOS DA BA		
<input type="checkbox"/>	0050	ELE	B108	PM01	EEM0290	0	CONTROLAR VISUALMENTE O ESTADO ESCOVAS.		
<input type="checkbox"/>	0060	ELE	B108	PM01	EEM0320	0	REALIZAR LIMPEZA SISTEMA ROTÓRICO.		

Fonte: Autoria própria (2024)

Dentro da checagem mencionada na imagem acima, temos algumas medições a serem feitas.

Detalhando essas medições, veremos na Figura 78, que são solicitadas as medidas das escovas, conforme pode ser observado, elas são identificadas por sua posição e por anel.

Essas medidas são enviadas para o sistema de gerenciamento da manutenção, e são identificadas como pontos de medição, e alimentam uma base de dados que é gerenciada e os valores encontrados nessas medições serão confrontados com os valores de padrão de cada máquina.

Figura 78 - Pontos de medição de escovas do rotor

REALIZAR CONTROLE DE DESGASTE DAS ESCOVAS.
 REALIZAR CONTROLE DE TODAS AS ESCOVAS, SE O DESGASTE CHEGAR A 30 MM DO COMPRIMENTO TOTAL (COMP. NOVA É DE 60MM) PROCEDER A SUBSTITUIÇÃO (NÃO SUBSTITUIR TODAS AS ESCOVAS DO MESMO ANEL PARA EVITAR PROBLEMAS NO ASSENTAMENTO. FAZER ASSENTAMENTO DAS NOVAS ESCOVAS).
 NO CASO DE TROCA DE FORNECEDOR, NÃO INSTALAR ESCOVAS DE FORNECEDORES DIFERENTES NO MESMO ANEL. (SÓ EM CASOS ESPECIAIS).

ESCOVAS	ANEL 1	ANEL 2	ANEL 3
1 -	_____	_____	_____
2 -	_____	_____	_____
3 -	_____	_____	_____
4 -	_____	_____	_____
5 -	_____	_____	_____
6 -	_____	_____	_____
7 -	_____	_____	_____
8 -	_____	_____	_____
9 -	_____	_____	_____

Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.4.2.1.2 Plano trimestral

No plano trimestral, (Figura 79) realizamos algumas medições adicionais, que são:

- Resistencia ôhmica entre as fases do rotor e Estator;
- Resistencia de isolamento do estator e rotor;
- Estado geral das conexões e vedações.

Figura 79 - Itens de verificação de uma ordem de manutenção de motores de rotor bobinado, frequência trimestral

OdsCabeç.		Operações	Componentes	Custos	Parceiro	Objetos	Dados adic.	Localiz.	Planej.	C
Oper	SOp	CenTrab	Cen...	Cha...	ChvMode	C...	Txt.breve operação		Te...	Tr
<input type="checkbox"/>	0001	ELE	B108	PM01			PROCEDIMENTO SEGURANÇA INTERCEMENT,,			
<input type="checkbox"/>	0010	ELE	B108	PM01		0	VERIFICAR ESTADO CAIXA DE LIGAÇÕES.			
<input type="checkbox"/>	0020	ELE	B108	PM01		0	REAPERTAR OS PARAFUSOS DAS BORNEIRAS.			
<input type="checkbox"/>	0030	ELE	B108	PM01		0	VERIFICAR APERTO DO CONECTOR TERRA.			
<input type="checkbox"/>	0040	ELE	B108	PM01		0	MEDIR RESISTÊNCIA BOBINAS ESTATOR/ROTOR.			
<input type="checkbox"/>	0050	ELE	B108	PM01		0	INSPEÇÃR BOTOEIRA.			
<input type="checkbox"/>	0060	ELE	B108	PM01		0	VERIFICAR PRESSÃO MOLAS DOS PORTA			

Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.4.2.1.3 Plano semestral

No plano semestral, estão configuradas duas situações:

Para os motores que tem a possibilidade de parada a cada quinze dias, ele receberá a manutenção quinzenal, trimestral e semestral. Nessa manutenção a cada seis meses, é realizada a aplicação de surg-test no rotor e estator.

Para os motores instalados nas cadeias de maior criticidade, que tem uma programação de manutenção semestral, ou seja, só para a cada seis meses. Efetuamos a manutenção preventiva completa, somando todas as atividades existentes nos planos quinzenal, trimestral e semestral. A Figura 80 mostra os itens adicionais de verificação constantes no plano semestral.

Figura 80 - Texto de uma ordem de manutenção de motores de rotor bobinado, plano semestral

- OUTRAS ANÁLISES: ANÁLISE DE COMPONENTES SÍMETRICAS PARA VERIFICAÇÃO DE DESEQUILÍBRIO; VERIFICAÇÃO DE ÂNGULOS DE FASE DE CORRENTE E TENSÃO E IMPEDÂNCIA DO MOTOR; REPRESENTAÇÃO FASORIAL DAS MEDIDAS.

SUGESTÃO DE EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA A ANÁLISE: SKF BAKER EXPLORER 4000.

SOLICITAR ENVIO DO RELATÓRIO PARA QUE ENTÃO SEJÃO ABERTAS AS | NOTAS M3 PARA PROGRAMAÇÃO DE MANUTENÇÃO, SE NECESSÁRIO.

Fonte: Autoria própria (2024).

As coletas efetuadas, são chamadas de pontos de medição. Os dados coletados são lançados no sistema de manutenção, através de um dispositivo móvel

(celular) que envia os dados coletados para uma plataforma de gestão gráfica, que nos mostrara as reais condições do motor, para tomadas de decisão.

3.1.4.2.2 Controle

Numa grande Industria, um dos maiores riscos para saúde do negócio, é o custo. A manutenção é um dos maiores contribuidores desse pilar, então para que se tenha um balanço favorável, deve-se um controle detalhado do custo de manutenção, e uma forma de se controlar custos, é medir a eficácia da manutenção, através dos indicadores.

Esses indicadores, nos mostram a real situação de um ativo em operação, e através dos resultados obtidos confrontados com os valores esperados de desempenho, encontraremos bons desempenhos e também oportunidades de melhoria.

As ferramentas utilizadas para medir a eficácia da manutenção, determinará o tempo médio que esse equipamento está apto para produzir e assim o planejamento da produção poderá estimar a capacidade da produção.

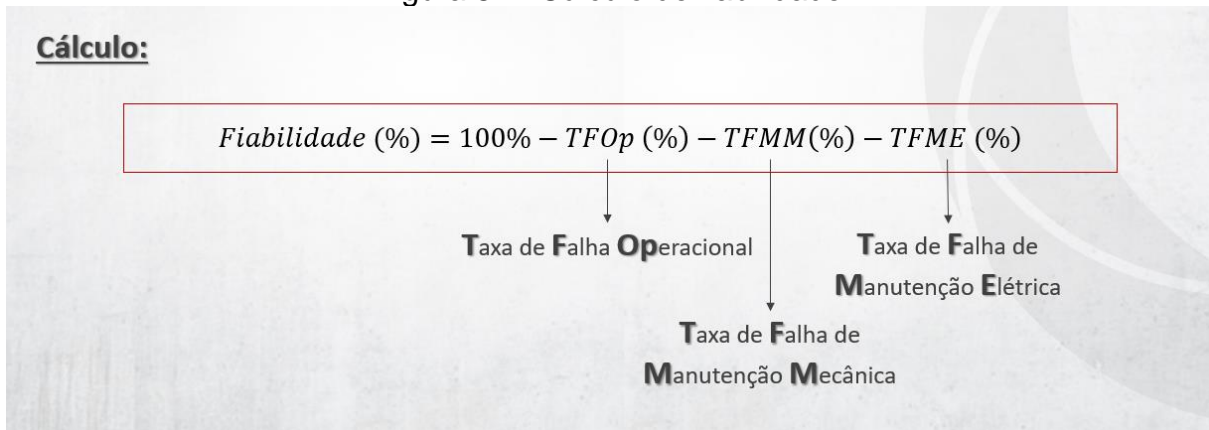
Cada empresa determina quais indicadores deseja utilizar para controle de seus processos, nesse caso apresentaremos aqui alguns desses indicadores utilizados:

3.1.4.2.2.1 Fator de Fiabilidade

Esse indicador nos indicará o resultado obtido na relação entre, o quanto esse equipamento estava programado para operar e quanto ele realmente rodou.

O número ideal para esse indicador é 100%, quando atingido esse valor máximo, indica que o equipamento cumpriu o seu papel perfeitamente, operando todo o tempo em que estava programado. A Figura 81 ilustra o cálculo de fiabilidade.

Figura 81 - Cálculo de fiabilidade



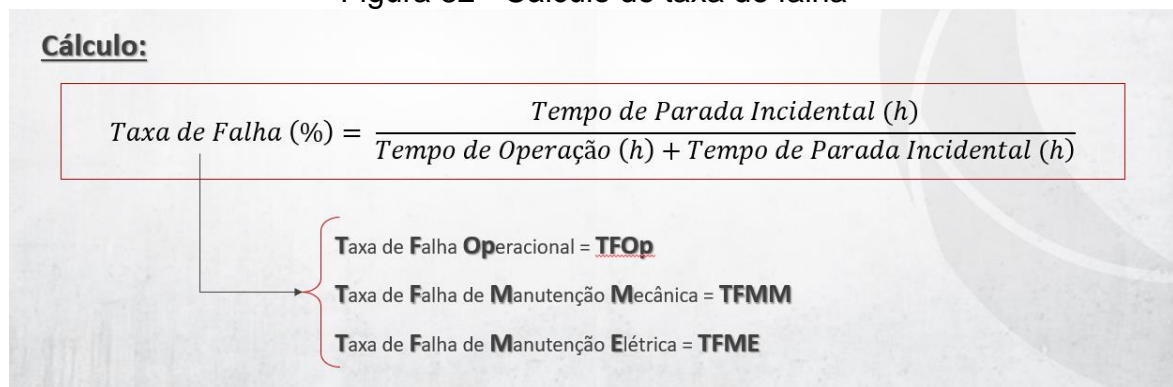
Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.4.2.2.2 Taxa de falha

Esse indicador apontará o percentual a ser diminuído do fator de fiabilidade, quando o equipamento falhar. Seu valor ideal é zero.

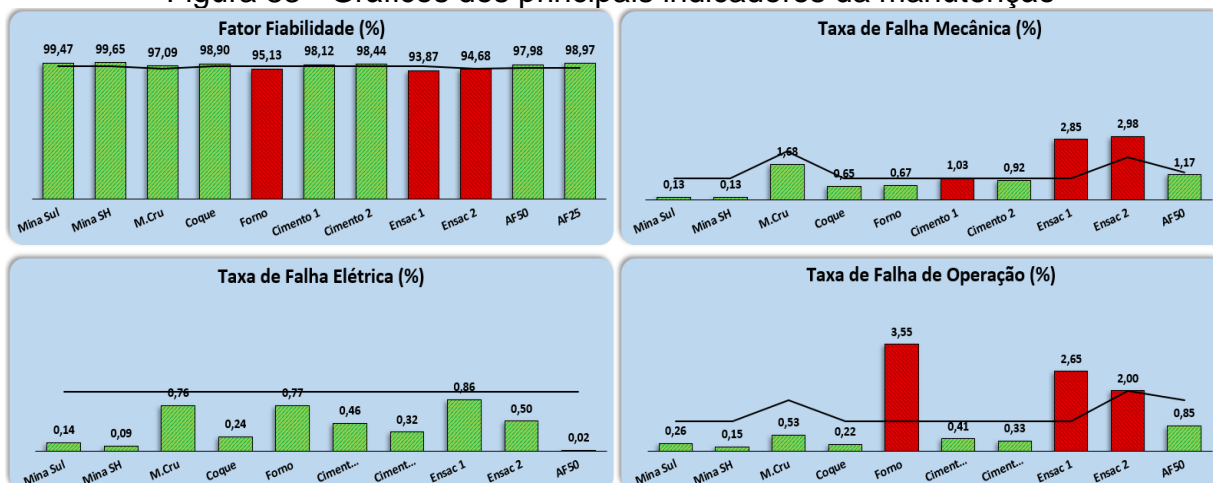
Diante do conhecimento histórico dos equipamentos, as metas a serem atingidas nesses indicadores são traçadas em comum acordo com a alta Gestão da empresa. Por isso a taxa de Fiabilidade traçada como meta na maioria dos equipamentos é de 97%, ficando os outros 3% taxados como limite máximo de falha, e esses 3% são divididos em três grupos (Operação, Manutenção Mecânica, Manutenção Elétrica) cada um desses grupos tem como meta, atingir um número menor que 1% na taxa de falha. A Figura 82 ilustra a equação do cálculo de taxa de falha e as Figuras 83 e 84 mostram, respectivamente, os gráficos e a tabela dos principais indicadores de manutenção que são adotados pela alta gestão de manutenção das organizações.

Figura 82 - Cálculo de taxa de falha



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 83 - Gráficos dos principais indicadores da manutenção



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 84 - Tabela de Indicadores

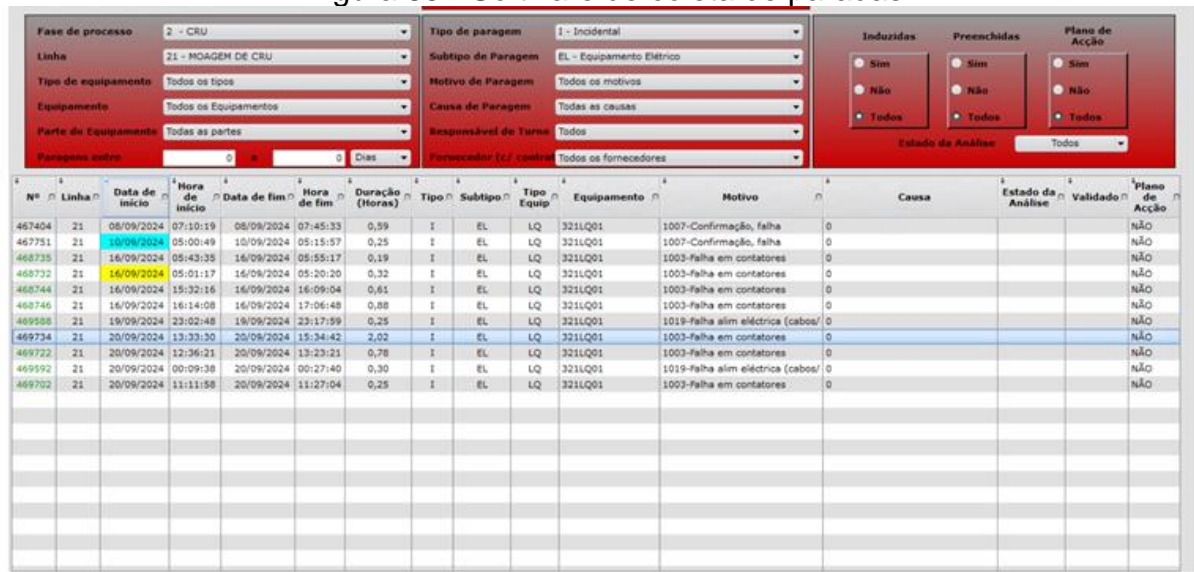
Indicadores	Tipo	JAN 2024	FEV 2024	MAR 2024	ABR 2024	MAI 2024	JUN 2024	JUL 2024	AGO 2024	SET 2024
Fator de Utilização (%)	REAL	75,86	72,73	73,74	66,01	17,08	69,14	80,78	77,88	78,44
Tempo Paradas Programadas <0001-0999> (min.)	REAL	5.382,38	6.237,08	4.757,99	4.684,05	35.082,44	5.274,54	4.952,18	4.853,11	4.201,94
OEE Operacional (%)	PO	80,08	80,08	80,08	80,08	80,08	80,08	80,08	80,08	80,08
	REAL	84,80	83,00	78,66	70,43	79,43	75,96	86,12	80,69	85,89
IPO (%)	PO	80,08	80,08	80,08	80,08	80,08	80,08	80,08	80,08	80,08
	REAL	84,80	83,00	78,66	70,43	79,43	75,96	86,12	80,69	85,89
Disponibilidade (%)	PO	81,70	81,70	81,70	81,70	81,70	81,70	81,70	81,70	81,70
	REAL	86,27	85,50	82,54	74,03	79,79	78,76	90,86	87,38	89,83
Taxa de Falha Circunstancial (%)	PO	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
	REAL	12,59	12,02	15,01	22,07	16,91	17,50	5,90	11,35	8,75
Fator de Fiabilidade (%)	PO	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00
	REAL	98,69	97,18	97,12	95,00	96,03	95,46	96,56	98,57	98,45
Taxa de Falha da Operação (%)	PO	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70
	REAL	0,84	0,06	0,88	0,22	1,45	0,07	1,36	0,24	0,02
Taxa de Falha de Manutenção (%)	PO	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30
	REAL	0,47	2,75	2,00	4,78	2,51	4,46	2,08	1,19	1,53
Taxa de Falha Mecânica (%)	PO	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30
	REAL	0,26	1,74	1,65	4,76	1,33	3,30	0,34	1,19	0,07
Taxa de Falha Elétrica (%)	PO	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	REAL	0,21	1,01	0,35	0,02	1,18	1,16	1,74	0,00	1,47

Fonte: Autoria própria (2024).

Para medir esses indicadores, é necessário coletar dados sobre os momentos de paradas dos equipamentos e para realizar essas coletas de forma organizada e real, um software é responsável de coletar e registrar automaticamente as paradas dos equipamentos.

O *software* responsável por coletar essas paradas é chamado de “STOP”, depois de coletadas as paradas ocorridas nos equipamentos, os operadores de comando central, acessam e registram os motivos das paradas dos equipamentos. A Figura 85 mostra a tela de classificação das paradas do software de coleta de paradas “STOP”.

Figura 85 - Software de coleta de paradas



The software interface includes the following filters and options:

- Fase de processo:** 2 - CRU
- Linha:** 21 - MOAGEM DE CRU
- Tipo de equipamento:** Todos os tipos
- Equipamento:** Todos os Equipamentos
- Parte do Equipamento:** Todas as partes
- Paradas entre:** 0 a 0 Dias
- Tipo de paragem:** I - Incidental
- Subtipo de Paragem:** EL - Equipamento Elétrico
- Motivo de Paragem:** Todos os motivos
- Causa de Paragem:** Todas as causas
- Responsável de Turno:** Todos
- Percebeção (1/2 contos):** Todos os fornecedores
- Induzidas:** Sim, Não, Todos
- Preenchidas:** Sim, Não, Todos
- Plano de Acção:** Sim, Não, Todos
- Estado de Análise:** Todos

Nº	Linha	Data de início	Hora de início	Data de fim	Hora de fim	Duração (Horas)	Tipo	Subtipo	Tipo Equip	Equipamento	Motivo	Causa	Estado da Análise	Validado	Plano de Acção
467404	21	08/09/2024	07:10:19	08/09/2024	07:45:33	0,59	I	EL	LQ	321LQ01	1007-Confirmação, falha	0			Não
467751	21	10/09/2024	05:00:49	10/09/2024	05:15:57	0,25	I	EL	LQ	321LQ01	1007-Confirmação, falha	0			Não
468735	21	16/09/2024	05:43:38	16/09/2024	05:55:17	0,19	I	EL	LQ	321LQ01	1003-falha em contadores	0			Não
468732	21	16/09/2024	05:01:17	16/09/2024	05:20:20	0,32	I	EL	LQ	321LQ01	1003-falha em contadores	0			Não
468744	21	16/09/2024	15:32:16	16/09/2024	16:09:04	0,61	I	EL	LQ	321LQ01	1003-falha em contadores	0			Não
468746	21	16/09/2024	16:14:08	16/09/2024	17:06:48	0,88	I	EL	LQ	321LQ01	1003-falha em contadores	0			Não
469258	21	19/09/2024	23:02:48	19/09/2024	23:17:59	0,25	I	EL	LQ	321LQ01	1019-falha sim eléctrica (cabos)	0			Não
469734	21	20/09/2024	13:33:30	20/09/2024	15:24:42	2,02	I	EL	LQ	321LQ01	1003-falha em contadores	0			Não
469732	21	20/09/2024	12:36:21	20/09/2024	13:23:21	0,78	I	EL	LQ	321LQ01	1003-falha em contadores	0			Não
469592	21	20/09/2024	00:09:38	20/09/2024	00:27:40	0,30	I	EL	LQ	321LQ01	1019-falha sim eléctrica (cabos)	0			Não
469702	21	20/09/2024	11:11:58	20/09/2024	11:27:04	0,25	I	EL	LQ	321LQ01	1003-falha em contadores	0			Não

Fonte: Autoria própria (2024).

Depois de lançados, os motivos das paradas, o software envia diariamente os eventos ao SAP (software principal de gerenciamento) e partir desses dados o SAP calcula os valores alcançados dos indicadores em cada cadeia

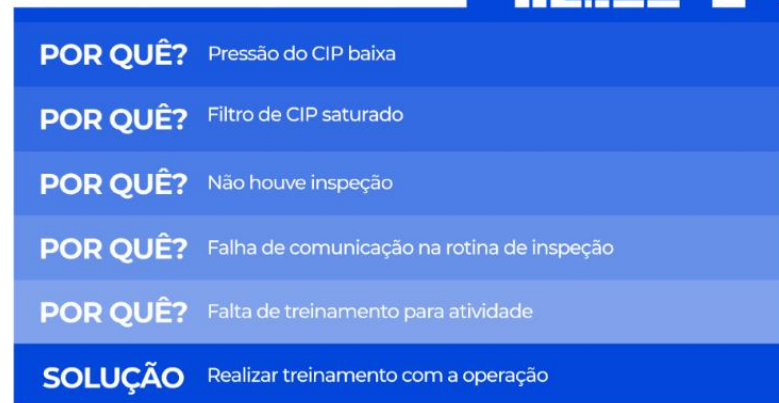
De acordo com as regras do sistema de gestão, essas paradas são monitoradas e se o tempo da parada for maior que o valor determinado como limite, será elaborado uma análise de falha, que apontará as causas raízes que originaram as falhas. As causas raízes dos problemas são analisadas pela aplicação da ferramenta dos 5 porquês, conforme ilustrado na Figura 86.

Depois de encontradas as causas raízes, ações serão geradas para tratamento das falhas. Essas ações podem ser corretivas, preventivas, Melhorias ou abrangência. Análise de falhas: exame sistemático e lógico que busca analisar a probabilidade de causa ou consequência de uma falha (Branco Filho, 2008).

Figura 86 - Análise de falha, baseada nos 5 porquês

Os 5 Porquês

Exemplo: sujidade do tanque após realização do CIP



Fonte: TRACTIAN (2024)

O modelo escolhido de manutenção por condição, pode-se obter ótimos resultados, obtendo baixo índice de manutenção corretiva, desde que a empresa tenha um rigoroso controle de seus indicadores.

As ferramentas de auxílio ao controle dos indicadores já foram apresentadas

Para que se consiga realizar inspeção e outras funções, as áreas são divididas em blocos, assim cada inspetor é responsável por uma parte da unidade fabril.

Segue abaixo as funções exercidas pelos inspetores:

- Realizar o monitoramento do estado dos equipamentos;
- Abrir notas de manutenção quando identificar situações necessárias de manutenção preventiva ou corretiva;
- Monitorar a qualidade e eficiência das manutenções efetuadas em campo;
- Identificar as necessidades materiais para execução da manutenção;
- Identificar pontos de melhoria;
- Realizar análises de falhas, quando essas ocorrerem;
- Monitorar a qualidade e eficiência dos materiais consumíveis utilizados.

3.1.4.2.3 Execução

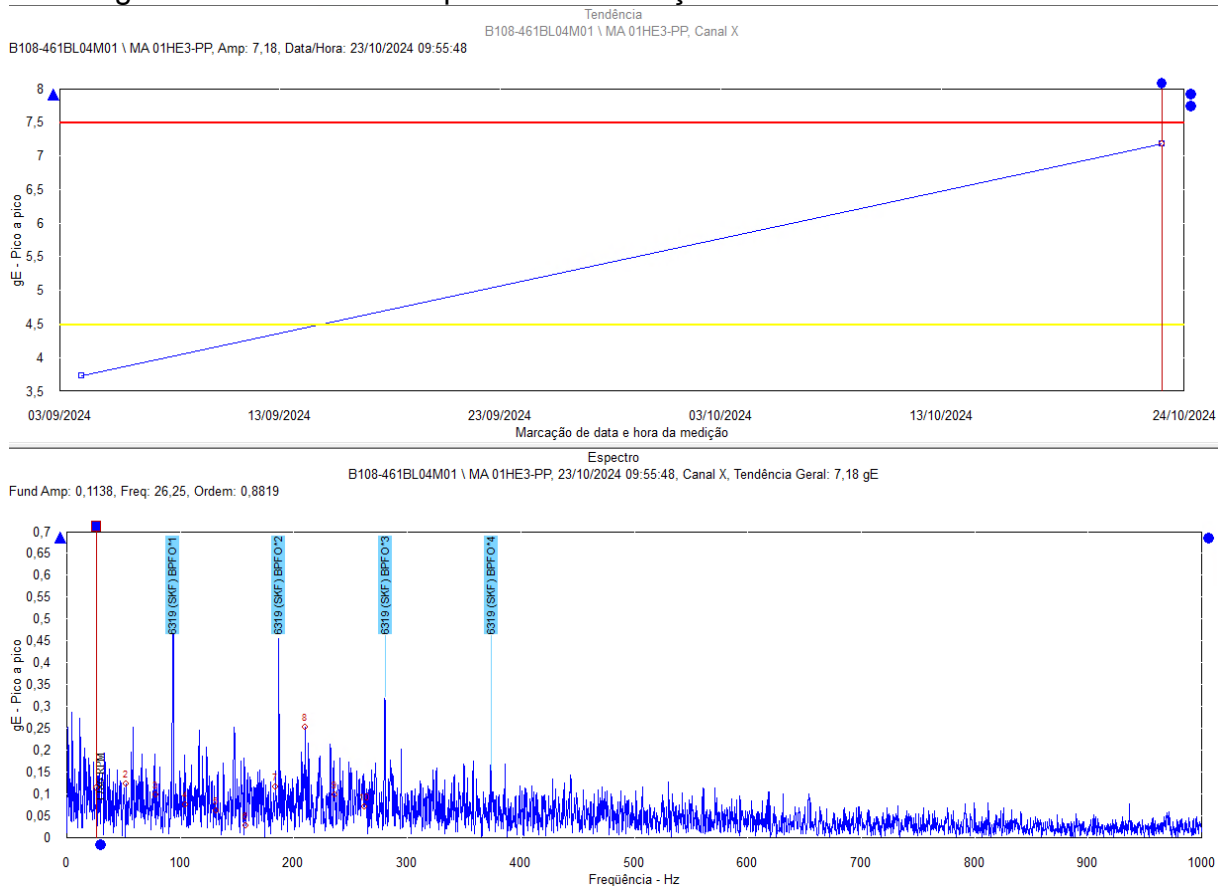
Para que o setor de execução atue bem, ele necessita de ser bem gerido e suprido, assim dois pontos de apoio são extremamente importantes, a gestão imediata e o planejamento.

A execução pode ser dividida entre corretiva, preventiva e preditiva. O ideal seria que não tivesse a corretiva, mas sabemos que isso é algo difícil.

Dentre as execuções mencionadas, para todas essas atividades, independentemente de sua categoria e de sua origem, é necessário registrar a execução para criar um histórico de ocorrência e se necessário algum recurso para tal realização, será necessário vincular o material ou serviço utilizado a essa ordem de manutenção.

Nas Figuras 87 e 88 segue um exemplo de notificação de uma necessidade de manutenção corretiva para um motor, que teve uma inspeção detectiva que apontou a necessidade de substituição de seus rolamentos.

Figura 87 - Análise de espectros de vibração dos rolamentos de um motor



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 88 - Nota aberta pela preditiva para manutenção do Motor

SITUAÇÃO OBSERVADA:

MANCAIS DO MOTOR APRESENTAM EVOLUÇÃO NOS NÍVEIS DE VELOCIDADE E ACELERAÇÃO, ONDE PODEMOS VERIFICAR CARACTERÍSTICAS DE DESGASTE PRINCIPALMENTE NO ROLAMENTO LOA, ALÉM DE DESVIO NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DO CONJUNTO.

RECOMENDAÇÃO:

PROVIDENCIAR A TROCA DOS ROLAMENTOS DO MOTOR BEM COMO INSPEÇÃO NO CONJUNTO DE TRANSMISSÃO DO SOPRADOR (POLIAS E CORREIAS REFERENTE A FOLGA E DESGASTE).

Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.4.2.4 Organização

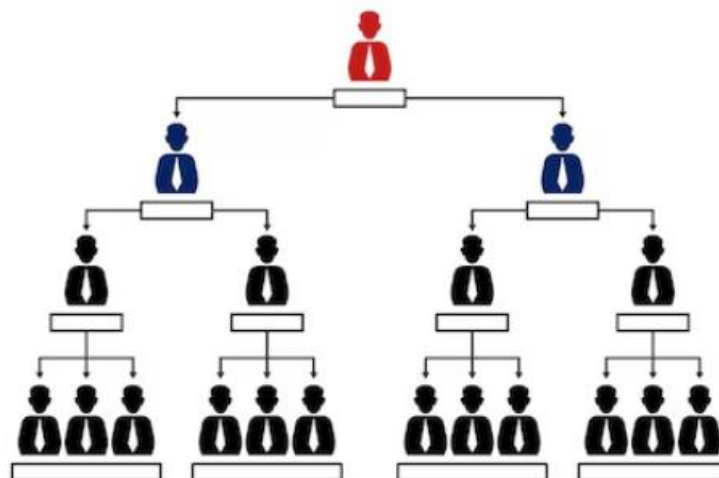
A responsabilidade da organização, é fornecer recursos necessários para que a manutenção aconteça, esses recursos podem ser materiais e humanos.

Esse papel de gerar e administrar os recursos, fica sob responsabilidade do time de gestão.

Para alcançar os objetivos determinados, é importante estruturar a organização tanto em tamanho de equipe, mas também na estrutura hierárquica, distribuindo mão de obra nos setores necessários e também inserindo níveis de gestão capazes de tornar o objetivo mais claro e alcançável.

Não existe estrutura melhor ou pior, todas apresentarão vantagens e desvantagens e serão desenhadas no modelo ideal para cada estratégia. Na Figura 89 é ilustrado modelo de estrutura organizacional conforme citado por Freepik (2024).

Figura 89 - Modelos de estrutura organizacional



Fonte: Freepik (2024)

A estrutura escolhida para a manutenção, depende de alguns fatores: Quantidade de equipamentos da unidade, Tempos de estoque, ramo de atividade, entre outros.

Esse tipo de estrutura centralizada, conforme a figura mostra, é um modelo que possui níveis de hierarquia, por isso as tomadas de decisões existem em todos os patamares, e conforme o nível de cargo vai subindo, também sobem as alçadas de responsabilidades e nível estratégico de cada decisão.

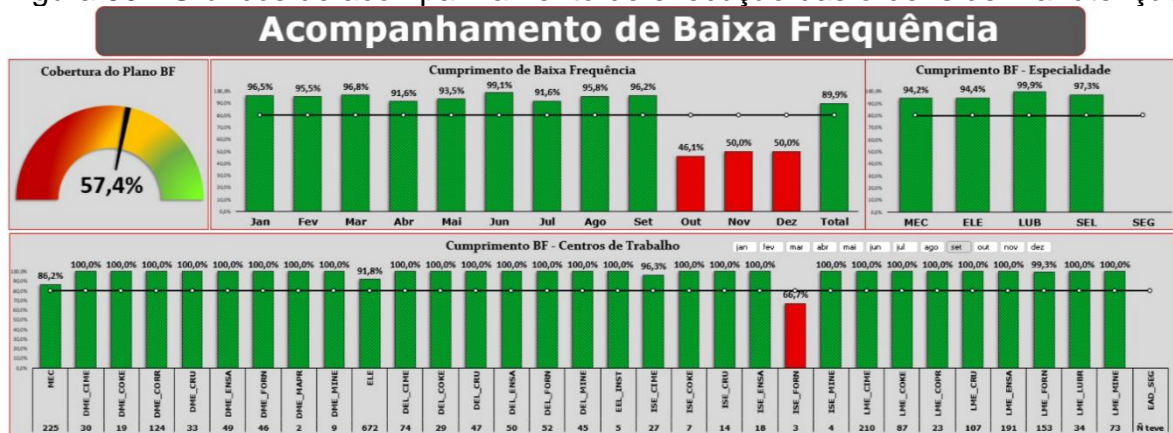
A gestão imediata tem o papel de medir a qualidade da mão de obra, juntamente com o planejamento, assim tende-se a diminuir os erros. Geralmente, a avaliação dessa eficiência, começa pela definição da quantidade de executores, depois passamos para definição das pessoas. A definição de quem faz cada tarefa, pode contribuir para que o equipamento tenha a correta manutenção e também pode contribuir no tempo gasto para cada tarefa.

Os planos sistemáticos geram ordens de manutenção e existem também ordens manuais geradas pelos inspetores.

A gestão da unidade fabril é cobrada pelos resultados atingidos das cadeias de produção, analisando a fiabilidade e taxas de falhas.

Uma outra meta de responsabilidade da gestão, é o nível de atingimento da operatória de manutenção, onde é analisado o nível de ordens executadas conforme programação, isso nos auxilia a enxergar se a manutenção está executando aquilo que foi determinado, conforme ilustrado na Figura 90.

Figura 90 - Gráficos de acompanhamento de execução das ordens de manutenção



Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.4.2.4.1 Terceirização da Manutenção

A terceirização, segundo Giosa (1999 apud Paiva; Souza, 2012, p. 796), “[...] é um processo de gestão em que se decide repassar algumas atividades para terceiros, e com os quais se deve estabelecer relações de parceria, devendo a empresa focar nas demais atividades de produção propriamente ditas”.

As empresas de grande porte, optam por esse processo, quando:

- O número de atividades de manutenção preventiva sazonais não condiz com o tamanho do corpo técnico disponível (exemplo disso são os eventos de manutenção chamados de grandes paradas).
- Também há a necessidade de contratação de serviços terceiros por especialização, quando uma unidade fabril se dedica a fabricar algo, geralmente algumas especialidades necessitam de mão de obra especializada para realização de uma manutenção, seja ela corretiva ou preventiva (exemplo no caso dos motores, são as empresas especializadas em manutenção de motores, que consegue realizar manutenções preventivas, como rejuvenescimento, mas também realiza as corretivas, como o rebobinamento).

3.1.4.2.4.2 Política de grandes motores

Além do controle apresentado acima, sobre planos de manutenção, checagens de comportamentos, execuções, fornecimento de mão de obra e materiais, um grande empreendimento com diversos ativos de grande porte requer uma política interna como referência.

Tal referência serve para nivelar a gestão da manutenção dos ativos da empresa, assim, independente da cidade ou estado em que a unidade está localizada, os princípios de manutenção serão os mesmos e assim a cobrança por resultados e desempenho, também terão mesmo peso de cobrança.

Os dados técnicos de referência, existentes na política foram baseados em normas técnicas nacionais (NBR 17094) e internacionais (IEEE 112).

Os motores que se enquadram na política devem ter uma potência mínima de 200 KW, dependendo de sua aplicação, de modo geral os motores pertencentes a política, são equipamentos cruciais para a cadeias de produção, que podem gerar muitas horas de parada, podendo trazer grandes prejuízos.

A política exige que os motores tenham a manutenção recomendada pelo fabricante e mencionada nas normas técnicas.

Essa manutenção recomendada, deve estar formatada dentro do sistema de controle de manutenção, assim a execução dessas tarefas será controlada automaticamente por um sistema.

Exemplo de manutenção para motores da política:

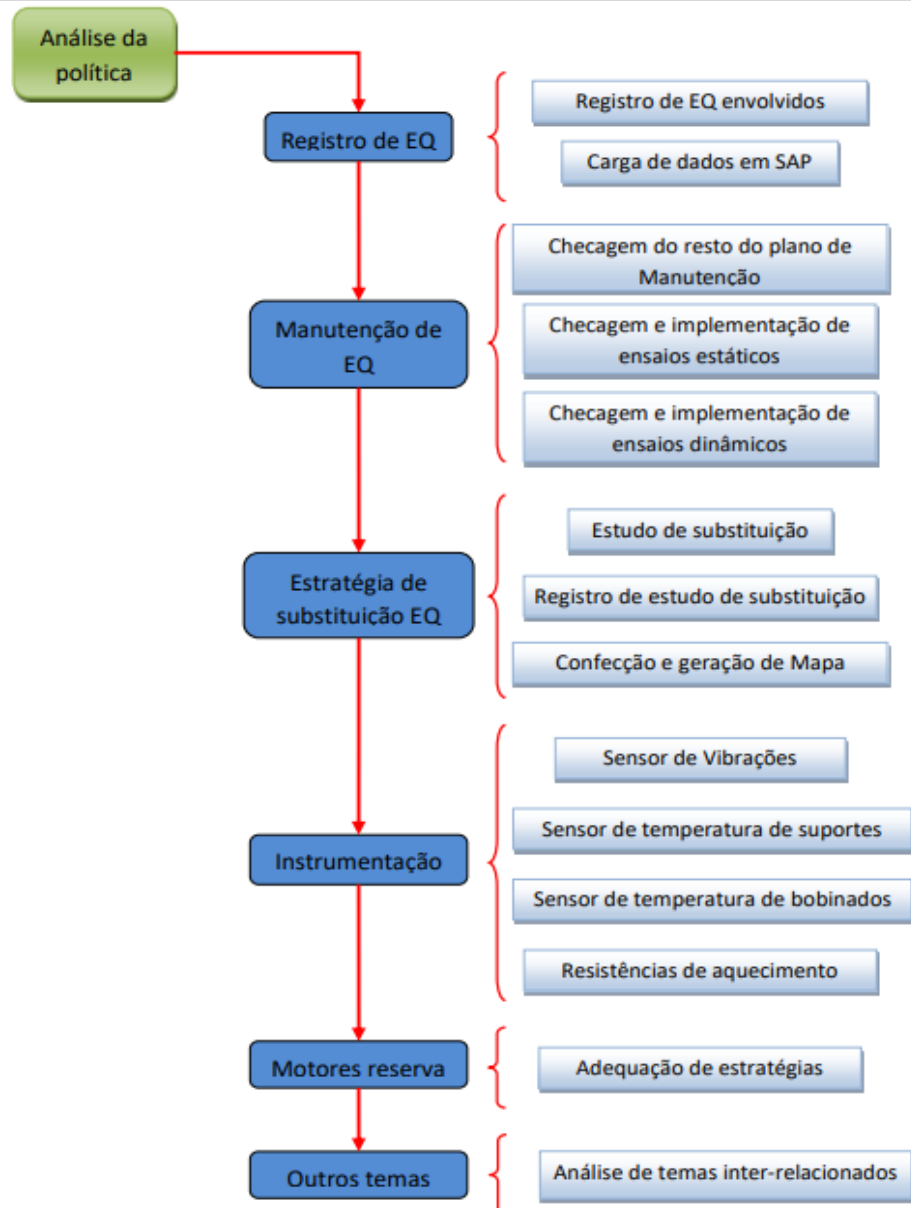
- lubrificação de rolamentos;
- Análise de vibração;
- Análise de óleo de mancais;
- medições da resistência de isolamento e ôhmica entre fases;
- Monitoramento de temperatura e vibração em tempo real (para situações especiais)

Além dos pontos citados acima, para o cuidado das máquinas, a política exige uma estratégia de substituição em caso de falha. Cada equipamento possui um histórico de falhas, mesmo com todos os monitoramentos das condições de saúde do ativo, é muito importante, obter uma boa estratégia de substituição, mesmo que momentânea para atender as cadeias de produção.

O ideal para essa estratégia de substituição, seria ter um motor reserva para cada motor instalado na planta, mas sabemos que isso é algo caro e difícil para qualquer empresa, por isso a estratégia deve ser pensada e aprovada, para que se tenha uma situação controlada para a equipe técnica e também para o proprietário. A Figura 91 ilustra o fluxograma de política de manutenção para grandes motores.

Figura 91 - Fluxograma da política de grandes motores

4. Fluxograma de implementação



Fonte: Autoria própria (2024).

A política requer um monitoramento das condições, para atender esse quesito, todas as informações coletadas nas manutenções abastecem a um banco de dados, assim todo o histórico de comportamento dos motores pode ser acompanhado, conforme ilustrado na Figura 92.

Figura 92 - Quadro geral do status momentâneo dos motores

<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">111HC01M02</th></tr> <tr><th colspan="2">Britador Calcário MS</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Último ensaio</td><td>27/09/24</td></tr> <tr><td>Isolação 30s</td><td>4790 MΩ</td></tr> <tr><td>Isolação 1 min</td><td>5987 MΩ</td></tr> <tr><td>Isol. 10 min</td><td>11975 MΩ</td></tr> <tr><td>Diagnóstico</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>PI 40 %c</td><td>Atenção</td></tr> <tr><td>DAI 40 %c</td><td>Bom</td></tr> </tbody> </table>	111HC01M02		Britador Calcário MS		Último ensaio	27/09/24	Isolação 30s	4790 MΩ	Isolação 1 min	5987 MΩ	Isol. 10 min	11975 MΩ	Diagnóstico	Ótimo	PI 40 %c	Atenção	DAI 40 %c	Bom	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">113HC01M01</th></tr> <tr><th colspan="2">Britador Calcário SH</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Último ensaio</td><td>18/09/24</td></tr> <tr><td>Isolação 30s</td><td>20357 MΩ</td></tr> <tr><td>Isolação 1 min</td><td>33529 MΩ</td></tr> <tr><td>Isol. 10 min</td><td>119748 MΩ</td></tr> <tr><td>Diagnóstico</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>PI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>DAI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> </tbody> </table>	113HC01M01		Britador Calcário SH		Último ensaio	18/09/24	Isolação 30s	20357 MΩ	Isolação 1 min	33529 MΩ	Isol. 10 min	119748 MΩ	Diagnóstico	Ótimo	PI 40 %c	Ótimo	DAI 40 %c	Ótimo	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">113HC01M02</th></tr> <tr><th colspan="2">Britador Calcário SH</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Último ensaio</td><td>18/09/24</td></tr> <tr><td>Isolação 30s</td><td>13172 MΩ</td></tr> <tr><td>Isolação 1 min</td><td>23950 MΩ</td></tr> <tr><td>Isol. 10 min</td><td>119748 MΩ</td></tr> <tr><td>Diagnóstico</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>PI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>DAI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> </tbody> </table>	113HC01M02		Britador Calcário SH		Último ensaio	18/09/24	Isolação 30s	13172 MΩ	Isolação 1 min	23950 MΩ	Isol. 10 min	119748 MΩ	Diagnóstico	Ótimo	PI 40 %c	Ótimo	DAI 40 %c	Ótimo	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">213HC01M01</th></tr> <tr><th colspan="2">Britador Aditivos</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Último ensaio</td><td>13/08/24</td></tr> <tr><td>Isolação 30s</td><td>47899 MΩ</td></tr> <tr><td>Isolação 1 min</td><td>95798 MΩ</td></tr> <tr><td>Isol. 10 min</td><td>598739 MΩ</td></tr> <tr><td>Diagnóstico</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>PI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>DAI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> </tbody> </table>	213HC01M01		Britador Aditivos		Último ensaio	13/08/24	Isolação 30s	47899 MΩ	Isolação 1 min	95798 MΩ	Isol. 10 min	598739 MΩ	Diagnóstico	Ótimo	PI 40 %c	Ótimo	DAI 40 %c	Ótimo	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">321FN02M01</th></tr> <tr><th colspan="2">Vent. Tiragem M. Cru</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Último ensaio</td><td>25/09/24</td></tr> <tr><td>Isolação 30s</td><td>383 MΩ</td></tr> <tr><td>Isolação 1 min</td><td>479 MΩ</td></tr> <tr><td>Isol. 10 min</td><td>599 MΩ</td></tr> <tr><td>Diagnóstico</td><td>Atenção</td></tr> <tr><td>PI 40 %c</td><td>Prog. manut.</td></tr> <tr><td>DAI 40 %c</td><td>Bom</td></tr> </tbody> </table>	321FN02M01		Vent. Tiragem M. Cru		Último ensaio	25/09/24	Isolação 30s	383 MΩ	Isolação 1 min	479 MΩ	Isol. 10 min	599 MΩ	Diagnóstico	Atenção	PI 40 %c	Prog. manut.	DAI 40 %c	Bom	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">321RM01M01</th></tr> <tr><th colspan="2">Motor Mesa M. Cru</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Último ensaio</td><td>19/09/24</td></tr> <tr><td>Isolação 30s</td><td>4082 MΩ</td></tr> <tr><td>Isolação 1 min</td><td>5795 MΩ</td></tr> <tr><td>Isol. 10 min</td><td>22453 MΩ</td></tr> <tr><td>Diagnóstico</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>PI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>DAI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> </tbody> </table>	321RM01M01		Motor Mesa M. Cru		Último ensaio	19/09/24	Isolação 30s	4082 MΩ	Isolação 1 min	5795 MΩ	Isol. 10 min	22453 MΩ	Diagnóstico	Ótimo	PI 40 %c	Ótimo	DAI 40 %c	Ótimo								
111HC01M02																																																																																																																									
Britador Calcário MS																																																																																																																									
Último ensaio	27/09/24																																																																																																																								
Isolação 30s	4790 MΩ																																																																																																																								
Isolação 1 min	5987 MΩ																																																																																																																								
Isol. 10 min	11975 MΩ																																																																																																																								
Diagnóstico	Ótimo																																																																																																																								
PI 40 %c	Atenção																																																																																																																								
DAI 40 %c	Bom																																																																																																																								
113HC01M01																																																																																																																									
Britador Calcário SH																																																																																																																									
Último ensaio	18/09/24																																																																																																																								
Isolação 30s	20357 MΩ																																																																																																																								
Isolação 1 min	33529 MΩ																																																																																																																								
Isol. 10 min	119748 MΩ																																																																																																																								
Diagnóstico	Ótimo																																																																																																																								
PI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
DAI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
113HC01M02																																																																																																																									
Britador Calcário SH																																																																																																																									
Último ensaio	18/09/24																																																																																																																								
Isolação 30s	13172 MΩ																																																																																																																								
Isolação 1 min	23950 MΩ																																																																																																																								
Isol. 10 min	119748 MΩ																																																																																																																								
Diagnóstico	Ótimo																																																																																																																								
PI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
DAI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
213HC01M01																																																																																																																									
Britador Aditivos																																																																																																																									
Último ensaio	13/08/24																																																																																																																								
Isolação 30s	47899 MΩ																																																																																																																								
Isolação 1 min	95798 MΩ																																																																																																																								
Isol. 10 min	598739 MΩ																																																																																																																								
Diagnóstico	Ótimo																																																																																																																								
PI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
DAI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
321FN02M01																																																																																																																									
Vent. Tiragem M. Cru																																																																																																																									
Último ensaio	25/09/24																																																																																																																								
Isolação 30s	383 MΩ																																																																																																																								
Isolação 1 min	479 MΩ																																																																																																																								
Isol. 10 min	599 MΩ																																																																																																																								
Diagnóstico	Atenção																																																																																																																								
PI 40 %c	Prog. manut.																																																																																																																								
DAI 40 %c	Bom																																																																																																																								
321RM01M01																																																																																																																									
Motor Mesa M. Cru																																																																																																																									
Último ensaio	19/09/24																																																																																																																								
Isolação 30s	4082 MΩ																																																																																																																								
Isolação 1 min	5795 MΩ																																																																																																																								
Isol. 10 min	22453 MΩ																																																																																																																								
Diagnóstico	Ótimo																																																																																																																								
PI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
DAI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">461FN02M01</th></tr> <tr><th colspan="2">Vent. Tiragem M. Coque</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Último ensaio</td><td>27/09/24</td></tr> <tr><td>Isolação 30s</td><td>5987 MΩ</td></tr> <tr><td>Isolação 1 min</td><td>11975 MΩ</td></tr> <tr><td>Isol. 10 min</td><td>77836 MΩ</td></tr> <tr><td>Diagnóstico</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>PI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>DAI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> </tbody> </table>	461FN02M01		Vent. Tiragem M. Coque		Último ensaio	27/09/24	Isolação 30s	5987 MΩ	Isolação 1 min	11975 MΩ	Isol. 10 min	77836 MΩ	Diagnóstico	Ótimo	PI 40 %c	Ótimo	DAI 40 %c	Ótimo	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">531BM01M01</th></tr> <tr><th colspan="2">Motor M. Cimento 1</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Último ensaio</td><td>24/09/24</td></tr> <tr><td>Isolação 30s</td><td>1197 MΩ</td></tr> <tr><td>Isolação 1 min</td><td>3592 MΩ</td></tr> <tr><td>Isol. 10 min</td><td>41912 MΩ</td></tr> <tr><td>Diagnóstico</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>PI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>DAI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> </tbody> </table>	531BM01M01		Motor M. Cimento 1		Último ensaio	24/09/24	Isolação 30s	1197 MΩ	Isolação 1 min	3592 MΩ	Isol. 10 min	41912 MΩ	Diagnóstico	Ótimo	PI 40 %c	Ótimo	DAI 40 %c	Ótimo	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">531FN02M01</th></tr> <tr><th colspan="2">Vent. Tiragem Cimento 1</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Último ensaio</td><td>24/09/24</td></tr> <tr><td>Isolação 30s</td><td>16765 MΩ</td></tr> <tr><td>Isolação 1 min</td><td>25147 MΩ</td></tr> <tr><td>Isol. 10 min</td><td>77836 MΩ</td></tr> <tr><td>Diagnóstico</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>PI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>DAI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> </tbody> </table>	531FN02M01		Vent. Tiragem Cimento 1		Último ensaio	24/09/24	Isolação 30s	16765 MΩ	Isolação 1 min	25147 MΩ	Isol. 10 min	77836 MΩ	Diagnóstico	Ótimo	PI 40 %c	Ótimo	DAI 40 %c	Ótimo	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">532BM01M01</th></tr> <tr><th colspan="2">Motor M. Cimento 2</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Último ensaio</td><td>17/09/24</td></tr> <tr><td>Isolação 30s</td><td>4191 MΩ</td></tr> <tr><td>Isolação 1 min</td><td>5987 MΩ</td></tr> <tr><td>Isol. 10 min</td><td>27542 MΩ</td></tr> <tr><td>Diagnóstico</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>PI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>DAI 40 %c</td><td>Ótimo</td></tr> </tbody> </table>	532BM01M01		Motor M. Cimento 2		Último ensaio	17/09/24	Isolação 30s	4191 MΩ	Isolação 1 min	5987 MΩ	Isol. 10 min	27542 MΩ	Diagnóstico	Ótimo	PI 40 %c	Ótimo	DAI 40 %c	Ótimo	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">532FN02M01</th></tr> <tr><th colspan="2">Vent. Tiragem Cimento 2</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Último ensaio</td><td>17/09/24</td></tr> <tr><td>Isolação 30s</td><td>20357 MΩ</td></tr> <tr><td>Isolação 1 min</td><td>25147 MΩ</td></tr> <tr><td>Isol. 10 min</td><td>35924 MΩ</td></tr> <tr><td>Diagnóstico</td><td>Ótimo</td></tr> <tr><td>PI 40 %c</td><td>Prog. manut.</td></tr> <tr><td>DAI 40 %c</td><td>Atenção</td></tr> </tbody> </table>	532FN02M01		Vent. Tiragem Cimento 2		Último ensaio	17/09/24	Isolação 30s	20357 MΩ	Isolação 1 min	25147 MΩ	Isol. 10 min	35924 MΩ	Diagnóstico	Ótimo	PI 40 %c	Prog. manut.	DAI 40 %c	Atenção	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">Avaliação</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>< 50 MΩ</td><td>Programa manutenção</td></tr> <tr><td>50 - 500 MΩ</td><td>Atenção</td></tr> <tr><td>> 500 MΩ</td><td>Bom</td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">PI</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td><+5</td><td>Programa manutenção</td></tr> <tr><td>+5 - 3</td><td>Atenção</td></tr> <tr><td>>3</td><td>Bom</td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">DAI</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td><1</td><td>Programa manutenção</td></tr> <tr><td>1 - 1,25</td><td>Atenção</td></tr> <tr><td>1,25 - 1,4</td><td>Bom</td></tr> <tr><td>> 1,4</td><td>Bom</td></tr> </tbody> </table>	Avaliação		< 50 MΩ	Programa manutenção	50 - 500 MΩ	Atenção	> 500 MΩ	Bom	PI		<+5	Programa manutenção	+5 - 3	Atenção	>3	Bom	DAI		<1	Programa manutenção	1 - 1,25	Atenção	1,25 - 1,4	Bom	> 1,4	Bom
461FN02M01																																																																																																																									
Vent. Tiragem M. Coque																																																																																																																									
Último ensaio	27/09/24																																																																																																																								
Isolação 30s	5987 MΩ																																																																																																																								
Isolação 1 min	11975 MΩ																																																																																																																								
Isol. 10 min	77836 MΩ																																																																																																																								
Diagnóstico	Ótimo																																																																																																																								
PI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
DAI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
531BM01M01																																																																																																																									
Motor M. Cimento 1																																																																																																																									
Último ensaio	24/09/24																																																																																																																								
Isolação 30s	1197 MΩ																																																																																																																								
Isolação 1 min	3592 MΩ																																																																																																																								
Isol. 10 min	41912 MΩ																																																																																																																								
Diagnóstico	Ótimo																																																																																																																								
PI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
DAI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
531FN02M01																																																																																																																									
Vent. Tiragem Cimento 1																																																																																																																									
Último ensaio	24/09/24																																																																																																																								
Isolação 30s	16765 MΩ																																																																																																																								
Isolação 1 min	25147 MΩ																																																																																																																								
Isol. 10 min	77836 MΩ																																																																																																																								
Diagnóstico	Ótimo																																																																																																																								
PI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
DAI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
532BM01M01																																																																																																																									
Motor M. Cimento 2																																																																																																																									
Último ensaio	17/09/24																																																																																																																								
Isolação 30s	4191 MΩ																																																																																																																								
Isolação 1 min	5987 MΩ																																																																																																																								
Isol. 10 min	27542 MΩ																																																																																																																								
Diagnóstico	Ótimo																																																																																																																								
PI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
DAI 40 %c	Ótimo																																																																																																																								
532FN02M01																																																																																																																									
Vent. Tiragem Cimento 2																																																																																																																									
Último ensaio	17/09/24																																																																																																																								
Isolação 30s	20357 MΩ																																																																																																																								
Isolação 1 min	25147 MΩ																																																																																																																								
Isol. 10 min	35924 MΩ																																																																																																																								
Diagnóstico	Ótimo																																																																																																																								
PI 40 %c	Prog. manut.																																																																																																																								
DAI 40 %c	Atenção																																																																																																																								
Avaliação																																																																																																																									
< 50 MΩ	Programa manutenção																																																																																																																								
50 - 500 MΩ	Atenção																																																																																																																								
> 500 MΩ	Bom																																																																																																																								
PI																																																																																																																									
<+5	Programa manutenção																																																																																																																								
+5 - 3	Atenção																																																																																																																								
>3	Bom																																																																																																																								
DAI																																																																																																																									
<1	Programa manutenção																																																																																																																								
1 - 1,25	Atenção																																																																																																																								
1,25 - 1,4	Bom																																																																																																																								
> 1,4	Bom																																																																																																																								

Fonte: Autoria própria (2024).

As situações apresentadas na figura acima, relatam a situação atual de cada motor em operação, através das medições efetuadas conforme o plano de manutenção de cada um desses ativos.

Conforme os valores encontrados das isolações, os indicadores podem nos orientar a algumas tomadas de decisão.

Exemplo:

no parâmetro de resistência de isolação, temos:

- Verde para valores satisfatórios, considerado ótimo para valor maior que um giga ohms;
- Amarelo valores aceitáveis, mas com atenção. resistência de isolação entre 100 mega ohms e 1000 mega ohms;
- Vermelho para valores críticos, que requer intervenção o mais rápido possível, resistência de isolação menor que 100 mega ohms.

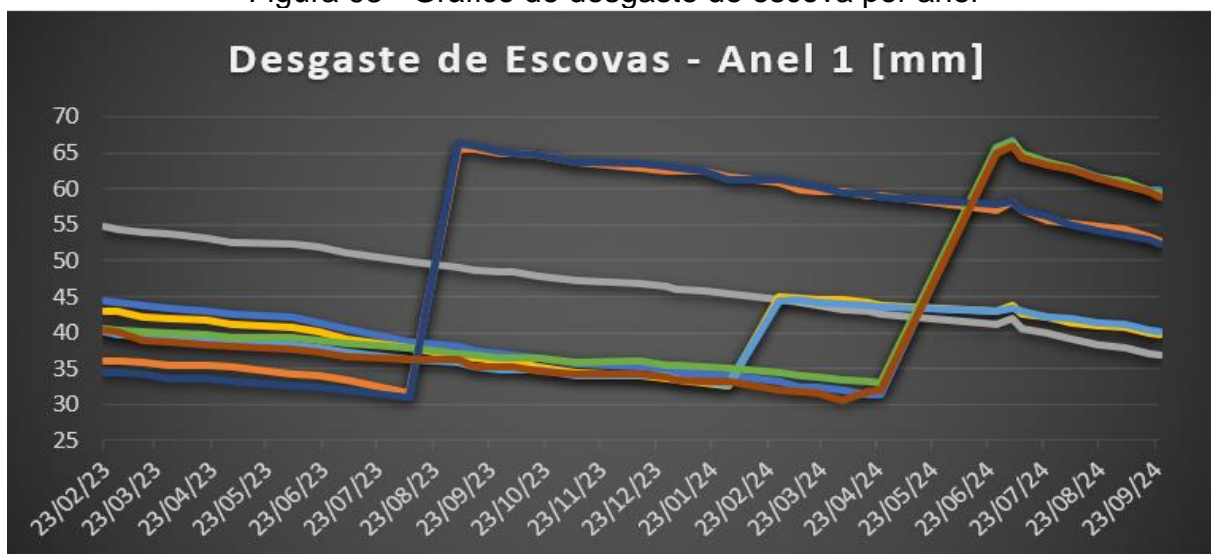
Para os parâmetros de IP e IA, que nos apontaram os índices de contaminação da máquina, também temos uma diferenciação de cor para os parâmetros escolhidos.

O painel geral, também consegue nos mostrar o histórico de desgaste das escovas dos motores, como pode ser visto na imagem da Figura 93, uma escova nova inicia seu trabalho com um tamanho de aproximadamente 65 mm de comprimento e o sistema está configurado para alertar a chegada dessa escova a um valor mínimo de 30 mm. Mas o alerta também pode ser disparado quando o desgaste estiver acentuado, por isso é importante coletar as medidas das escovas, mas também coletar o horímetro a cada coleta, assim checamos o desgaste em mm/h. O parâmetro

a ser seguido como referência nesse caso, é um desgaste máximo de 3mm a cada 1000 horas de operação.

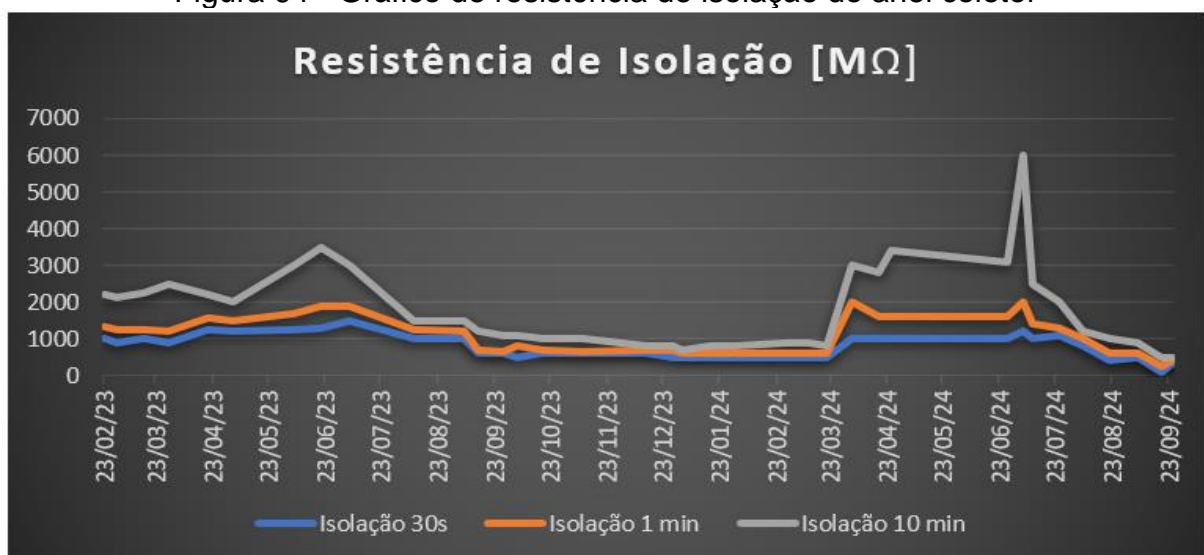
Esse desgaste ideal, dependerá de algumas condições do motor como: temperatura dos anéis coletores, rugosidade da superfície do anel, material da escova e do anel. Na Figura 94 é ilustrado o gráfico de acompanhamento da isolação do anel coletor de um motor de grande e, este gráfico, permite avaliar o grau de contaminação da isolação da máquina.

Figura 93 - Gráfico de desgaste de escova por anel



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 94 - Gráfico de resistência de isolação do anel coletor



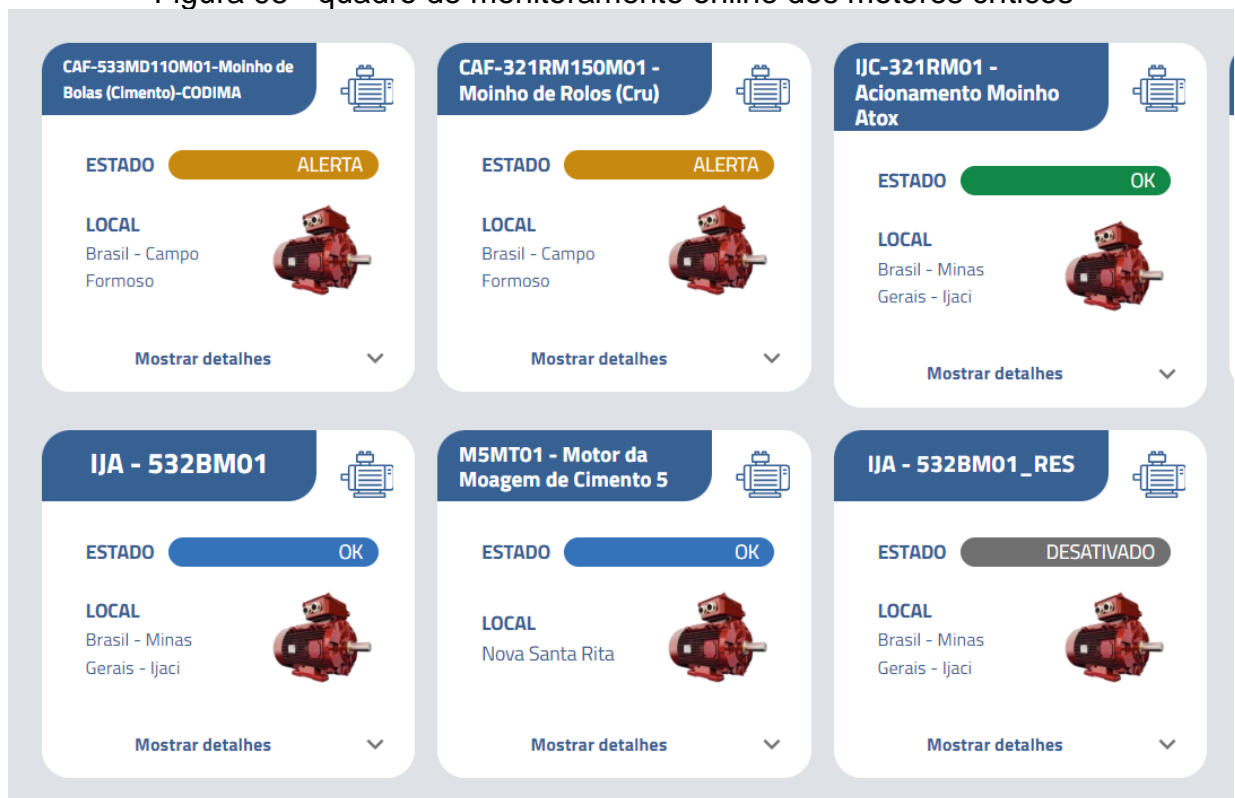
Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.4.2.4.3 Monitoramento online

Ainda dentro da exigência da política para monitoramento dos ativos, existem os softwares de monitoramento dinâmico das máquinas elétricas rotativas que possuem grande aplicabilidade no monitoramento das variáveis das máquinas consideradas críticas para o processo produtivo. As Figuras 95 e 96 mostram uma aplicação da ferramenta no gerenciamento das variáveis dos motores elétricos considerados críticos de uma usina de cimento.

Para esse monitoramento, é instalado um equipamento que monitora tensão e correntes do motor por fase, e através de algoritmos avançados consegue-se analisar a situação comportamental de cada máquina e apontar a condição em tempo real.

Figura 95 - quadro de monitoramento online dos motores críticos



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 96 - Gráficos de variáveis monitoradas do motor



Fonte: Autoria própria (2024).

Além de apontar a situação em tempo real, a ferramenta faz um histórico de cada motor podendo gerar histórico de cada uma delas para futuras análises.

Essas análises podem apontar o problema de forma direcionada, separando o estator e rotor em análises diferentes.

O software chama cada uma das variáveis de "fator de severidade" e assim temos uma análise do rotor e uma resultante chamada de "Fator de severidade do rotor". E no Estator temos o outro parâmetro chamado de "fator de severidade do Estator".

4 CONCLUSÃO

Concluimos que a adoção de um plano de manutenção sistemático e estratégico para motores elétricos industriais é fundamental para assegurar a continuidade e eficiência dos processos produtivos. A revisão bibliográfica destaca que, ao longo do tempo, as empresas têm avançado desde a manutenção corretiva até metodologias preditivas, cada uma com suas particularidades e vantagens. A implementação de planos bem definidos permite não apenas minimizar falhas e paradas, mas também otimizar o uso de recursos e prolongar a vida útil dos equipamentos.

No ambiente industrial, a elaboração de planos de manutenção eficazes depende da compreensão dos diferentes tipos de manutenção – corretiva, preventiva e preditiva – e de como aplicá-los de maneira a maximizar a segurança e a confiabilidade. Embora a manutenção corretiva ainda seja essencial para atender a situações emergenciais, ela representa um custo elevado a longo prazo devido às paradas inesperadas. Já a manutenção preventiva, com intervenções programadas em componentes críticos, reduz significativamente a ocorrência de falhas e permite um planejamento organizado das paradas de produção.

A manutenção preditiva, com o uso de tecnologias como termografia, análise de vibração e monitoramento de isolamento, agrega um valor inestimável ao possibilitar a antecipação de falhas baseando-se em dados operacionais e indicadores de desempenho. Esse enfoque permite a criação de cronogramas de manutenção mais inteligentes e específicos, que consideram a condição real dos ativos, reduzindo intervenções desnecessárias e maximizando a alocação de recursos.

Por fim, ressaltamos que os planos de manutenção devem ser constantemente revisados e adaptados conforme o histórico de falhas, o desempenho dos motores e as novas tecnologias disponíveis. Um plano de manutenção equilibrado, que integre ações corretivas, preventivas e preditivas, representa um diferencial competitivo em um setor que exige alta disponibilidade e eficiência energética. Assim, a aplicação de um plano de manutenção robusto e adaptável contribui diretamente para a sustentabilidade e competitividade da empresa, permitindo que ela maximize o desempenho de seus ativos e atenda às crescentes demandas por eficiência e responsabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.M.S, Anlagenbau. **Sistemas de Secagem a Vácuo**. Disponível em:
<<https://www.ams-anlagenbau.de/ams/ptL/secagem.html>>. Acesso em: 26 out. 2024.

ABB. **Limpeza de máquinas com CO2 e rejuvenescimento**. Ijaci, MG, 07 out. 2002. Apresentação em Slide Share. 10 slides. color, Treinamento manutenção em máquinas elétricas rotativas ministrado na Intercement Brasil S.A, Acesso restrito, Drive rede interna Intercement. Acesso em: 22 out. 2024.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17094-3 Máquinas elétricas girantes Parte 3: Motores de indução trifásicos — Métodos de ensaio

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462/1994 - Confiabilidade e Manutenibilidade.

ANÁLISE de vibrações em motores elétricos. DCM engenharia e sistemas ibéricos Ltda. Disponível em: <https://www.dmc.pt/analise-de-vibracoes-em-motores-eletricos/>. Acesso em: 27 out. 2024.

ANELK. Placa isolante de TVE. Disponível em: <https://www.anelk.com.br/placa-isolante-tve>. Acesso em: 27 out. 2024.

AROEIRA, Carlos. Análise de vibrações em motores elétricos. DCM engenharia e sistemas ibéricos Ltda. 2024. Disponível em: <https://www.dmc.pt/analise-de-vibracoes-em-motores-eletricos/>. Acesso em: 26 out. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5383: **Motores elétricos rotativos** - Requisitos para ensaios e aceitação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5392: **Escovas para motores elétricos** - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

AZEVEDO. M. E. **Análise da Manutenção em Motores de Indução Trifásicos Considerando a Conservação de Energia**. Tese (Mestrado) – Universidade

Federal de Itajubá, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Itajubá, BR-MG, 2000. 119 f. Disponível em :
<<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3021>> Acesso em: 24 set. 2024

BORGES, Maurício. Manutenção preditiva: analisando a vibração de máquinas. Venturus. 2024. Disponível em:<<https://www.venturus.org.br/insights/blog/manutencao-preditiva-analisando-a-vibracao-de-maquinas#:~:text=Uma%20das%20principais%20t%C3%A9cnicas%20utilizadas,prevenir%20falhas%20em%20m%C3%A1quinas%20rotativas.>>. Acesso em: 27 out. 2024.

BRUTSCH, R.; ALLISON, J.; THALER, T.; “**Factors determining cost and quality of the electrical insulation in VPI process**”, 1996.

CAMPOS. R. C. **Predição de Falhas em Rolamentos de Motores Elétricos com a Utilização de Técnicas de Deep Learning**. Dissertação (mestrado) - Instituto Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Controle de Automação, Espírito Santo, BR-ES, 2023. 84 f. Disponível em:
<<https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/3728>>. Acesso em: 24 set. 2024.

CARVALHO. D. **Desenvolvimento de um sistema de baixo custo para detecção precoce de desgaste em rolamentos de motores de indução trifásicos usando análise de vibrações**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Porto Alegre, BR-RS, 2019. 150 f. Disponível em:
<<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/197197>>. Acesso em:24 set. 2024.

CEZÁRIO, C. A. **Transient Thermal Analysis Of An Induction Electric Motor**. 18º Congresso Internacional de Engenharia Mecânica, Ouro Preto, 2005.

COELHO, Beatriz. Conclusão de trabalho: um guia completo de como fazer em 5 passos. Blog Mettzer. Florianópolis, 2020. Disponível em:
<https://blog.mettzer.com/conclusao-de-trabalho/>. Acesso em: 10 mai. 2021.

COELHO, Beatriz. Introdução: aprenda como fazer para seu trabalho acadêmico. Blog Mettzer. Florianópolis, 2021. Disponível em: <<https://blog.mettzer.com/introducao-tcc/>>. Acesso em: 10 mai. 2021.

Como o cimento é fabricado, disponível em: <<https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/cimentos-avancados/o-processo-de-fabricacao-do-cimento>> Acesso em: 24 out. 2024.

COTESA. A importância de realizar ensaio de resistência ôhmica de enrolamentos. Cotesa.com. Disponível em: <<https://cotesa.com.br/en/2023/07/17/a-importancia-de-realizar-ensaio-de-resistencia-ohmica-de-enrolamentos/#:~:text=Isso%20indica%20que%20a%20corrente,com%20os%20padr%C3%B5es%20do%20mercado.>>. Acesso em: 3 nov. 2024.

CRESPIM, Marcos. Análise da deformação dinâmica de um estator de um motor de indução trifásico empregando sensores de rede de Bragg em fibra óptica. Pato branco, 2018. 48 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato branco, 2018.

CRITÉRIOS para avaliação do sistema de isolamento de máquinas elétricas girantes. Weg. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h1e/h9a/WEG-crit-rios-para-avalia-o-do-sistema-de-isola-o-de-m-quinas-el-tricas-girantes-para-a-realiza-o-de-servi-os-artigo-tecnico-portugues.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2024.

CRTI. Espectrometria de emissão ótica (ICP - OES). Centro Regional para o Desenvolvimento tecnológico e inovação. Disponível em: <<https://crti.ufg.br/p/43617-espectrometria-de-emissao-otica-icp-oes>>. Acesso em: 26 out. 2024.

DA LUZ. F. J. **Relatório Técnico de análise Termográfica**. Ijaci, MG, 21 out. 2022. Relatório técnico de inspeção termográfica realizada nas instalações da Intercement Brasil S.A, Acesso restrito, Drive rede interna Intercement. Acesso em: 22 out. 2024.

DA SILVA, Heloiza. inspeção termografia. Produtivo. 2023. 1 p. Disponível em: <<https://www.produttivo.com.br/blog/inspecao-termografica/>>. Acesso em: 19 out. 2024.

DATA ENGENHARIA. **Daimer: Diagnose avançada do isolamento de máquinas elétricas rotativas.** Ijaci, MG, 14 jun. 2019. Apresentação em Slide Share. 61 slides. color, Treinamento de Diagnose Avançada do Isolamento de Máquinas Elétricas Rotativas ministrado na Intercement Brasil S.A., Acesso restrito, Drive rede interna Intercement. Acesso em: 22 out. 2024.

Data Engenharia. **Relatório técnico final, MOTOR DE INDUÇÃO GEVISA 415 KW – 440 V – 1489 RPM.**

DE CÁSSIA, Luiza. Ferrografia: o que é quando usar cada tipo?. Produtivo . 2024. Disponível em: <<https://www.produttivo.com.br/blog/ferrografia/>>. Acesso em: 28 out. 2024.

DMITRUK, Hilda Beatriz (Org.). Cadernos metodológicos: diretrizes da metodologia científica. 5 ed. Chapecó: Argos, 2001. 123 p.

DUARTE, Wilson . Como elaborar um relatório de termografia elétrica. SEP- soluções em engenharia e preditiva . Disponível em: <<https://blog.engenhariasep.com.br/termografia/relatorio-de-termografia-eletrica.>> Acesso em: 28 out. 2024.

DUPONT. Isolamento de motores. Dupont. Disponível em: <<https://www.dupont.com.br/electrical-insulation/motors.>> Acesso em: 26 out. 2024.

ENGEFAZ . Análise de Óleo na Manutenção Preditiva. Engefaz. Disponível em: <<https://www.engefaz.com/analise-de-oleo-na-manutencao-preditiva/>>. Acesso em: 29 out. 2024.

ENC. Papel isolante de aramida. Disponível em: <https://www.tj-generaltrade.com/pt/product/aramid-insulation-paper/>. Acesso em: 3 nov. 2024.

ENGEFAZ. Inspeção termográficas em motores industriais. Engefaz. Jaguariúna-SP. Disponível em: <www.engefaz.com/inpecao-termografica-em-motores-industriais/>. Acesso em: 26 out. 2024.

EXIMPORT . Chapa de crepitação Aquecedora Digita. Disponível em: www.eximport.com.br. Acesso em: 3 nov. 2024.

FILHO, Gil Branco. **Dicionário de Termos de Manutenção, Confiabilidade e Qualidade**. ABRAMAN. 1996.

Gabriela Fonseca Parreira Gregório, Danielle Freitas Santos, Auricélio Barros Prata - **Engenharia de manutenção** 1ª edição. Sagah, 2018, 184 p. disponível em: Biblioteca virtual do Unilavras (<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/>). Acesso em: 26 out. 2024.

GILIO, A. S. **Máquinas de Indução Trifásicas** 9ª edição. Érica, 2003.

GLOBAL HIDRÁULICA E PNEUMÁTICA. Contador de Partículas Portátil: Tecnologia e Precisão para Sistemas Óleo Hidráulicos. Global Hidráulica e pneumática . 2023. Disponível em: <<https://www.globalhp.com.br/contador-de-particulas-portatil-tecnologia-e-precisao-para-sistemas-oleo-hidraulicos/>>. Acesso em: 26 out. 2024.

GONGORA, W. S. **Uma abordagem neural no diagnóstico de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio - PR, 2013. Disponível em: <<https://portaldeinformacao.utfpr.edu.br/Record/riut-1-782>>. Acesso em: 27 out. 2024

GRUPO FILTROIL. Ferrografia: quando é necessário realizar uma análise?. Grupo filtroil. Disponível em: <<https://grupofiltroil.com.br/oleos-industriais/ferrografia-quando-e-necessario-realizar-uma-analise/>>. Acesso em: 3 nov. 2024.

GUEDES, A. S. **Estudo e proposição de técnicas para a avaliação do isolamento em motores de indução trifásicos de baixa e média tensão**. Tese de doutorado da Universidade Federal de Minas Gerais, 2018. 210 f. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-AYTLCJ>>. Acesso em: 24 set. 2024.

GUIA ABNT NBR 16929/2021. Introdução ao Guia Digital da norma. Guia profissional de motores. Disponível em: <<https://www.guiademotores.com/>>. Acesso em: 25 out. 2024.

HERNANDES, Pedro. Análise de óleo: tudo o que você precisa saber sobre o assunto. Als-global. 2018. Disponível em: <<https://www.alsglobal.com/pt/news-and-publications/2022/06/anlise-de-leo-tudo-o-que-voc-precisa-saber-sobre-o-assunto>>. Acesso em: 29 out. 2024.

HERNANDEZ, J. et al. **Impact of Preventive Maintenance on Motor Failures**. Journal of Industrial Maintenance, v. 22, n. 4, p. 45-52, 2015.

HIOKI. Verificando o estado de impregnação. Hioki. Disponível em: <https://www.hioki.com/br-pt/learning/applications/detail/id_n1265552>. Acesso em: 3 nov. 2024.

Indicadores de manutenção, disponível em: <<https://traction.com/blog/indicadores-de-manutencao>>. Acesso em: 24 out. 2024.

JUNIOR. A. A. **Manutenção Preditiva Usando Análise de Vibrações**. Manole, 2004, 190 p.

KARDEC, Alan. **Gestão estratégica e técnicas preditivas**. Qualitymark, 2002, v.2. 160 p. (Manutenção).

KARDEC. A; NASCIF. J. **Manutenção Função Estratégica**. Qualitymark, 2012, v.4. 440 p.

KLECKERS, Thomas. Sensores piezoelétricos: qual é o ideal para minha aplicação?. hbm.com. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/6810/sensores-piezoeltricos-qual-o-ideal-para-minha-aplicacao/?utm_term=&utm_campaign=COUNTRY_BR_Phrase&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=7789390417&hsa_cam=8305022305&hsa_grp=87107519444&hsa_ad=455588348353&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-529947775636&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwj4K5BhDYARIsAD1Ly2rX3qshzBU0NvFmfKodPXPJlddictE0ladvK7u5LlhA0PgXgh23LolwaAnL2EALw_wcB>. Acesso em: 29 out. 2024.

KOCH, Mark. Falha de Isolamento Eléctrico. ALL -teste pro . 2024. Disponível em: <<https://alltestpro.com/pt-br/a-atp-da-as-boas-vindas-a-mark-koch-como-engenheiro-de-desenvolvimento-comercial/>>. Acesso em: 29 out. 2024.

Laboroil . Por quanto tempo o óleo lubrificante pode ser usado em uma máquina, com segurança?. Laboroil . Belo Horizonte MG . Disponível em: <<http://www.laboroil.com.br>>. Acesso em: 3 nov. 2024.

MELO, C. H. **Plano de Manutenção Preditiva para Motores Elétricos – Definição e Implementação numa Indústria de Pasta de Papel.** Relatório de estágio

(Mestrado), Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2017. 118 f.

Disponível em: < <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/25461>>. Acesso em: 06 set. 2024.

MERLIN, Victor. Ensaio de resistência ôhmica de isolação. Manutenção de cabine .

Disponível em: <[https://manutencaodecabine.com.br/ensaio-de-resistencia-ohmica-de-](https://manutencaodecabine.com.br/ensaio-de-resistencia-ohmica-de-isolacao/#:~:text=O%20%C3%ADndice%20de%20polariza%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9,no%20material%20isolante%20do%20componente.>)

[isolacao/#:~:text=O%20%C3%ADndice%20de%20polariza%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9,no%20material%20isolante%20do%20componente.>](https://manutencaodecabine.com.br/ensaio-de-resistencia-ohmica-de-isolacao/#:~:text=O%20%C3%ADndice%20de%20polariza%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9,no%20material%20isolante%20do%20componente.>). Acesso em: 3 nov. 2024.

MM TEC. Ferrografia . MMtec inspeções industriais . Disponível em:

<<https://www.mmtec.com.br/ferrografia/>>. Acesso em: 3 nov. 2024.

MÓBIL . Guia para Lubrificação de Rolamentos de Motores Elétricos. Disponível em:

<<http://www.mobilindustrial.com.br>. Acesso em: 26 out. 2024.

MOBLEY, R. K. **An Introduction to Predictive Maintenance.** Elsevier, 2002.

MOTORES Elétricos – Tudo Sobre o Assunto. Disponível em: . Acesso em: 3 nov.

2024.

MOTUL. Qual é a viscosidade do óleo do motor do meu carro?. Motul . Disponível

em: <https://www.motul.com/pt-BR/carros/qual-e-a-viscosidade-do-oleo-do-motor-do-meu-carro>. Acesso em: 3 nov. 2024.

MOUBRAY, John. **Manutenção centrada em confiabilidade.** Tradução: Kleber

Siqueira, Robert Lockhart. 2000. 426 p. Título original: Reliability-centred maintenance.

MUNDO ALS. O que é o teste de teor de água por crepitação?. Disponível em:

<<https://mundoals.com/o-que-e-o-teste-de-teor-de-agua-por-crepitacao/>>. Acesso em: 3 nov. 2024.

Museu da WEG Motores, disponível em: (<https://museuweg.net/educacao>)

NAÍNA, Tumelero. TCC pronto em apenas 5 passos: do início à defesa. 2019. Disponível em: <https://blog.mettzer.com/tcc-pronto/>>. Acesso em: 11 mai. 2021.

OLIVEIRA DOS SANTOS, João Lázaro. termografia em motores elétricos. portal spda. 2016. Disponível em:< <https://portalspda.com.br>>termografia>. Acesso em: 19 out. 2024.

OLIVEIRA, J. G. S. M. **Materiais usados na construção de motores elétricos**, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

Pacífico. Sensor de vibração para máquinas industriais. Pacífico.com. 2024. Disponível em: <<https://pacifco.com/sensor-de-vibracao-para-maquinas-industriais/>>. Acesso em: 29 out. 2024.

PAULINO , Marcelo . Capítulo VII Ensaaios de resistência de isolamento e de rigidez dielétrica. O setor elétrico.com. Disponível em: <https://www.osetoeletrico.com.br/wp-content/uploads/2014/08/ed-102_Fasciculo_Cap-VII-Manutencao-de-transformadores.pdf>. Acesso em: 28 out. 2024.

PINTELON, L.; VAN PUYVELDE, F. Maintenance Decision Making. International Journal of Production Economics, v. 105, n. 1, p. 150-165, 2006.

RODRIGUES , Rogério . Causas de Vibrações Mecânicas em Motores Industriais: quais as principais?. Loja Abacom.co..br. Disponível em: <<https://www.abecom.com.br/vibracoes-mecanicas-em-motores-industriais/>>. Acesso em: 27 out. 2024.

RODRIGUES, A. L. M. **Estudo Comparativo de Sistemas de Isolação em Motores de MT**, Dissertação (mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Junho, 2010. 80 f. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/60193/1/000146287>>. Acesso em: 20 out. 2024.

RR MOTORES . Saiba mais sobre os tipos de Motores Elétricos. RR motores . 2021. Disponível em: <https://www.rrmotores.com.br/post/saiba-mais-sobre-os-tipos-de-motores-el%C3%A9tricos>. Acesso em: 27 out. 2025.

SENMA. <https://st.senmatape.com/>. Acesso em: 24 out. 2024.

SERVILUB . Lubrificação de Motores Elétricos – Tudo Sobre o Assunto. Disponível em: . Acesso em: 3 nov. 2024.

SERVILUB . Lubrificação de Motores Elétricos – Tudo Sobre o Assunto. Disponível em: <https://www.servilub.com.br/lubrificacao-de-motores-eletricos/>. Acesso em: 3 nov. 2024.

SÍDEROS. Fita de papel de mica. Disponível em: <https://sideros.com.br/fita-papel-mica/>. Acesso em: 20 out. 2024

SKF . Contagem de partículas e integridade hidráulica do óleo. Skf . Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/lubrication-management/recondoil/knowledge-hub/recondoil-articles/oil-particle-counting-and-hydraulic-health>. Acesso em: 3 nov. 2024.

SOTOFILHOS. **Rejuvenescimento da parte elétrica de máquina e motores elétricos**. Disponível em:

<<https://www.sotofilhos.com.br/biblioteca/Noticias/Rejuvenescimento%20da%20parte%20eletrica%20de%20maquina%20e%20motores%20Eletricos.html>>. Acesso em: 21 out. 2024.

SOUZA, V. C. **Organização e Gerência da Manutenção**. São Paulo, SP. Ed. All Print, 2009.

TARGET . NBR 16358: determinação de água por crepitação em óleos lubrificantes. Target Normas. 2015. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/artigo-tecnico/2479/nbr-16358-determinacao-de-agua-por-crepitacao-em-oleos-lubrificantes>. Acesso em: 27 out. 2024.

TELEDYNE FLIR. Disponível em: <<https://www.flir.com.br/browse/professional-tools/thermography-cameras/>> Acesso em: 01 nov. 2024.

TESTO. Disponível em: <https://www.testo.com/pt-BR/testo-868/p/0560-8681>. Acesso em: 3 nov. 2024.

VON ROLL **Sistemas isolantes para maquinas rotativas, motores e geradores.**
Disponível em: <<https://www.vonroll.com/en/electrical/>>. Acesso em: 26 out. 2024.

WEG, G. W. U. **Motores, Guia de Especificação de Motores Elétricos WEG.,**
Acessado em: 22/10/2024. URL <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-pdf>.

WEG. **Weg-critérios para avaliação do sistema de isolamento de máquinas elétricas girantes.** Disponível em:<

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h1e/h9a/WEG-crit-rios-para-avalia-o-do-sistema-de-isola-o-de-m-quinas-el-tricas-girantes-para-a-realiza-o-de-servi-os-artigo-tecnico-portugues.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2024.

WEG. **Avaliação do Lubrificante para Operação de Mancais em Máquinas Elétricas Girantes.** <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hce/hdf/WEG-avalia-o-do-lubrificante-para-opera-o-de-mancais-em-m-quinas-el-tricas-girantes-artigo-t-cnico-portugues.pdf>>. Acesso em: 01. Nov. 2024