

Manutenção preditiva: criação de plano de manutenção para motores elétricos

Henrique Guilherme da Nóbrega e Ronaldo Aleixo Alves
Universidade UNA de Catalão – Campus Santo Antônio
Mariana Nalesso Gonçalves; Professor Orientador, Curso de Engenharia Elétrica
e-mails: nobregahenriqueg@gmail.com e alvesronaldoa93@gmail.com

Resumo

Este trabalho trata sobre manutenção preditiva em motores elétricos. Sabendo da grande importância e utilização deste equipamento dentro das indústrias do mundo todo, foi oportuno criar este documento que aborda métodos para prolongar a vida útil dos motores elétricos, evitando quebras inesperadas, paradas não programadas de produção, custos adicionais, perda de tempo e perda de dinheiro. Foram relatados os principais problemas dos motores elétricos, e os métodos que a manutenção preditiva utiliza para detectar de maneira precoce estes defeitos. Por fim, foi criado um plano de manutenção preditiva que, de maneira geral, pode ser aplicado nesses equipamentos.

Palavra-chave: Motor Elétrico. Manutenção. Preditiva. Redução de custo.

Abstract

This work deals with predictive maintenance in electric motors. Knowing the great importance and use of this equipment within industries around the world, it was opportune to create this document that addresses methods to extend the useful life of electric motors, avoiding unexpected breakdowns, unscheduled production shutdowns, additional costs, loss of time and loss of money. The main problems of electric motors were reported, as well as the methods that predictive maintenance uses to detect these defects early. Finally, a predictive maintenance plan was created that, in general, can be applied to these equipments.

Keyword: Electric Motor. Maintenance. Predictive. Cost reduction.

1. INTRODUÇÃO

Após a revolução industrial que teve início na Europa nos séculos XVIII e XIX, principalmente depois da sua terceira etapa (que aconteceu entre os séculos XX e XXI) foi introduzido o uso de máquinas e tecnologia nos processos de fabricação das indústrias.

Com a mecanização da produção, as fábricas se depararam com um problema: os defeitos e quebras que aconteciam com os novos equipamentos utilizados, e conseqüentemente, as paradas não programadas nas linhas de produção. Essas quebras e defeitos não são previstas e podem acontecer a qualquer instante, o que pode gerar grandes atrasos no processo, alto custo com reparos emergenciais e perda pela não produção de itens, gerando assim grandes prejuízos. Diante deste fato, a indústria enxergou a necessidade de se criar planos de manutenção para evitar paradas e minimizar os atrasos e prejuízos.

Desde a revolução industrial até os dias atuais, esses planos de manutenção passaram por grande evolução até chegar no que se conhece hoje, onde se destaca a manutenção preditiva.

Este trabalho apresenta um plano de manutenção preditiva para ser aplicado em motores elétricos, que foram escolhidos para ser o foco deste trabalho devido a sua grande utilização dentro das indústrias.

O objetivo deste artigo é propor um plano de manutenção para prolongar a vida útil dos motores, assim reduzindo custos e evitando paradas de máquina inesperadas que causam prejuízos com perda de produção. O trabalho foi realizado com base em literaturas já publicadas no mundo acadêmico e apresenta as técnicas de manutenção preditiva que podem ser aplicadas nos motores.

No decorrer do trabalho será abordado sobre história dos motores elétricos, história da manutenção, definições de tipos de manutenção, principais problemas dos motores elétricos e técnicas de manutenção preditivas que se aplicam nestes equipamentos.

Dentre os principais problemas dos motores se destacam o mal dimensionamento, aquecimentos e sobrecargas, vibrações e desalinhamento, e problemas na qualidade da energia elétrica que chega ao motor.

As técnicas utilizadas neste trabalho para identificar tais problemas são a análise termográfica, que é capaz de identificar problemas que geram aquecimento, como a sobrecarga; análise de vibração, que identifica os problemas estruturais como mal fixação do motor ou da carga acoplada e também possíveis problemas nos rolamentos ou empenamento do eixo; e monitoramento das grandezas elétricas, como tensão e corrente, que são capazes de identificar possíveis situações prejudiciais que podem levar à queima do motor.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para construir esse artigo, foi seguido a linha de pensamento de alguns autores que serviram como base. Os autores WOLFF (2004) e CABRAL (1988) foram citados no tópico “uma breve história dos motores elétricos” e seus trabalhos contribuíram com informações sobre a história dos motores desde o descobrimento da relação entre eletricidade e magnetismo até se chegar aos primeiros motores elétricos.

Os autores KARDEC (2009) e NASCIF (2009) estão citados no tópico “história da manutenção” e seus trabalhos colaboraram para o entendimento da evolução da manutenção e suas gerações. A NBR 5462 também foi citada neste trabalho e forneceu informações sobre as definições dos tipos de manutenção.

Na construção do tópico “principais problemas dos motores” os autores FILHO (2010), SPAMER (2009), KARDEC (2009), NASCIF (2009), ANTONIOLLI (1999), BALDISSARELLI (2019) e FERREIRA (2019) foram citados e proveram referências com relação a problemas como mal dimensionamento dos motores; aquecimento; vibrações e desalinhamento.

Para elaborar o tópico “técnicas de manutenção preditiva” os autores CARNEIRO (2015), SPAMER (2009), MELO (2017), OKADA (2020), DIEGOLI (2018), GAVLAKI (2018), CYRINO (2015), WANG (1995) e WILLIANG (1995) foram citados e seus trabalhos forneçam informações sobre termografia, análise de vibração e monitoramento de grandezas elétricas.

2.1 UMA BREVE HISTÓRIA DOS MOTORES ELÉTRICOS

Para se chegar à construção de um motor elétrico houve uma série de descobertas científicas que precederam a invenção do mesmo. No ano de 1663, Otto Guiricke construiu o que foi a primeira máquina eletrostática. Em 1820, Oersted conseguiu relacionar eletricidade e magnetismo quando aproximou um fio que conduzia corrente elétrica a uma agulha magnética e constatou um desvio na agulha.

Dois anos depois, Dominique Jean Arago observou que um condutor que esteja conduzindo corrente elétrica é capaz de atrair partículas de ferro. Em seguida, o físico André Ampère, através de um fio enrolado em uma espira, conseguiu demonstrar o comportamento de um ímã, quando nesse condutor envolto em uma espira foi aplicada uma corrente elétrica, tendo assim a idealização do eletroímã.

Em 1831, Faraday apresentou a indução eletromagnética constatando que ao movimentar um fio conduzindo corrente elétrica em um campo magnético, surge uma tensão elétrica nas extremidades deste fio. (WOLFF, 2004).

O italiano Dal Negro, em 1832, conseguiu construir o que foi a primeira máquina com movimentos de vai e vem, que funcionava com corrente alternada. Em 1833, W.

Ritchie constrói o comutador, constituído por um pequeno motor elétrico em que o núcleo de ferro roda em torno de um ímã.

No ano de 1883, Marcel Deprez evidenciou a possibilidade de conduzir eletricidade em longas distancias, aumentando a tensão elétrica. (CABRAL, 1998).

Em 1885, um motor de duas fases com rendimento de 50% foi construído pelo engenheiro eletricista Galileu Ferraris. Dois anos mais tarde, Nikola Tesla apresentou um motor de indução bifásico, porém, com baixo rendimento.

Passados quatro anos, em 1889, o engenheiro russo Dobrowolsky entra com pedido de patente de um motor trifásico com rotor em gaiola. A potência desse motor era de até 80% de sua potência de 80 watts. (WOLFF, 2004).

A Figura 1 apresenta uma tabela, construída pelos autores deste trabalho, com base em WOLFF (2004), que descreve brevemente a linha do tempo da história dos motores elétricos.

ANO	CIENTISTA	A CONTECIMENTO
1663	Otto Guericke	Primeira máquina eletrostática.
1820	Hans Christian Oersted	Descobre a relação de magnetismo e eletricidade.
1822	Dominique Jean Arago	Obeserva que um fio que conduz corrente eletrica atrai particulas metálicas.
1822	André Amperè	Obeserva que um fio em espira conduzindo corrente eletrica tem comportamento de um ímã.
1833	W. Ritchie	Constrói o comutador .
1883	Marcel Deprez	Desmostra a condução de eletricidade em longas distancias.
1885	Galileu Ferraris	Motor de duas fases.
1887	Nikola Tesla	Motor de indução bifasico.
1889	Dobrowolsky	Motor trifásico com rotor em gaiola.
1891	Dobrowolsky	Primeira fabrica em série de motores assincronos.

Figura 1 – História dos motores elétricos. (Produção própria).

De 1891 até os dias atuais o motor elétrico passou por diversas melhorias aumentando sua potência e principalmente o seu rendimento.

2.2 HISTÓRIA DA MANUTENÇÃO

Para KARDEC e NASCIF (2009) a evolução da manutenção pode ser dividida em 4 gerações. A primeira geração da manutenção aconteceu no período que antecedeu a segunda guerra mundial. A manutenção daquele período era caracterizada por atuações corretivas em equipamentos pouco mecanizados e na sua grande maioria super dimensionados.

Ainda de acordo com KARDEC e NASCIF (2009), a segunda geração da manutenção é caracterizada por forte aumento da mecanização, além do aumento da

complexidade das instalações. Seu período ocorreu após a segunda guerra mundial e perdurou até os anos 60. Nessa época, com o aumento da produtividade e a maior necessidade de disponibilidade de máquinas para a produção, surge a manutenção preventiva, que consistia em intervenções com intervalo fixo de tempo, com o objetivo de evitar quebras de máquinas e conseqüentemente paradas de produção. Os custos de manutenção se elevaram neste período.

Ainda para os mesmos autores, a terceira geração iniciou-se a partir da década de 70, com a evolução dos processos indústrias. Os grandes prejuízos causados pelas interrupções de produção devido a máquinas paradas. Isso passou a indicar que a confiabilidade e a disponibilidade eram fundamentais para se evitar perdas. Dessa forma surge a manutenção preditiva, que é capaz de indicar as reais condições dos equipamentos através de técnicas de monitoramento.

Para KARDEC e NASCIF (2009) a quarta geração da manutenção se inicia em 1999 com o envolvimento de toda a organização, com o propósito de melhorar o gerenciamento de ativos da empresa, objetivando a redução de custos e eliminação de toda e qualquer tipo de perda. Nela, a manutenção corretiva aponta ineficiência no processo.

2.3 DEFINIÇÕES BASICAS DOS PRINCIPAIS TIPOS DE MANUTENÇÃO

Conforme a NBR 5462, há três tipos de manutenção:

- Corretiva
- Preventiva
- Preditiva

A mesma norma as define da seguinte forma:

Manutenção corretiva:

“Manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.” (NBR 5462, item 2.8.8 p.7)

Manutenção preventiva:

“Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.” (NBR 5462, item 2.8.7 p.7)

Manutenção preditiva:

“Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.” (NBR 5462, item 2.8.9 p.7)

3. METODOLOGIA

Esse trabalho foi construído a partir de uma pesquisa bibliográfica, baseada em artigos e livros que tratam sobre manutenção preditiva, com o intuito de reunir informações de cunho científico que mostram a importância e as vantagens que esse tipo de manutenção pode proporcionar as indústrias, e em específico, aos motores elétricos.

O presente artigo aborda temas como os principais problemas dos motores elétricos e técnicas de manutenção preditiva. Além disso, este trabalho apresenta uma sugestão, elaborada a partir de todo o conhecimento anteriormente adquirido, de um plano de manutenção para os motores.

3.1 FLUXOGRAMA DE CONSTRUÇÃO DO TRABALHO

Para melhor entendimento das etapas deste trabalho, foi elaborado um fluxograma representado na Figura 2. Nesta, é possível observar as etapas que foram percorridas para o desenvolvimento deste artigo.

Primeiramente foi escolhido o tema do trabalho, que é a manutenção preditiva. Em seguida tem-se o tipo de pesquisa que foi realizado e a ideia da criação do plano de manutenção. Na sequência, apresenta-se a máquina escolhida para a aplicação do plano de manutenção. Por fim, na segunda linha são listadas as etapas de construção do trabalho.

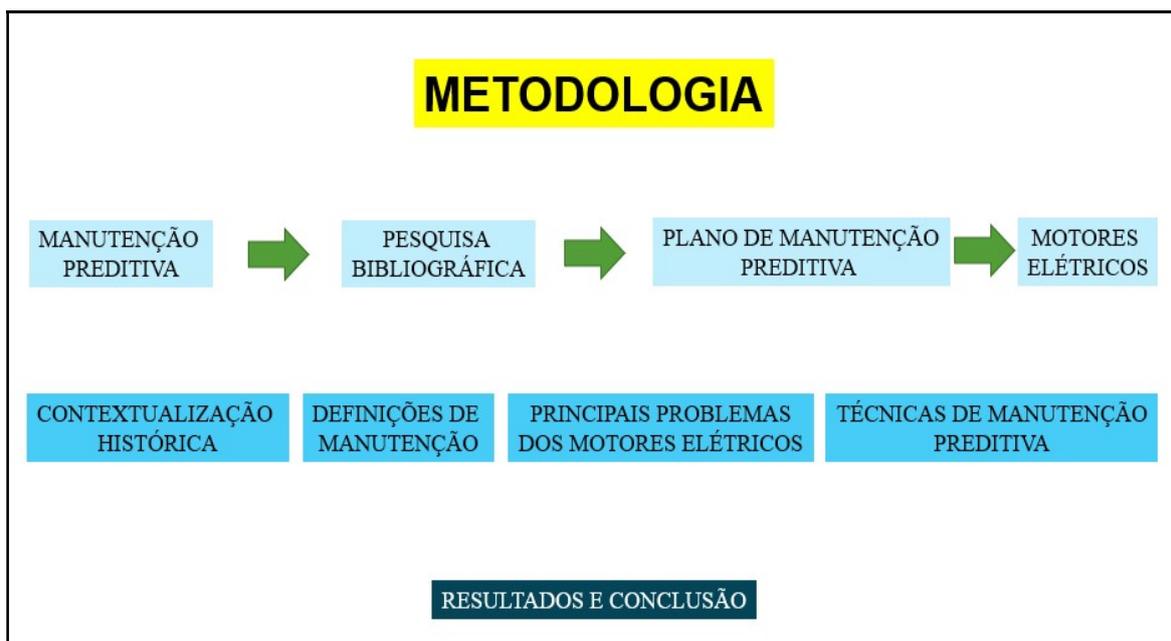


Figura 2: Fluxograma de construção do trabalho. (Produção própria).

3.2 PRINCIPAIS PROBLEMAS DOS MOTORES ELÉTRICOS

Nos próximos tópicos serão abordados os principais problemas que ocorrem com os motores elétricos dentro da indústria. Dentre eles estão: mal dimensionamento do motor; aquecimentos e suas possíveis causas; vibrações e desalinhamentos, entre outros.

Na Figura 3 é representado um motor com vista em corte e também detalhes referentes a alguns problemas que serão abordados nos próximos tópicos. Em seguida tem-se, como uma legenda da imagem, comentários que descrevem e explicam brevemente cada item do motor elétrico trifásico.

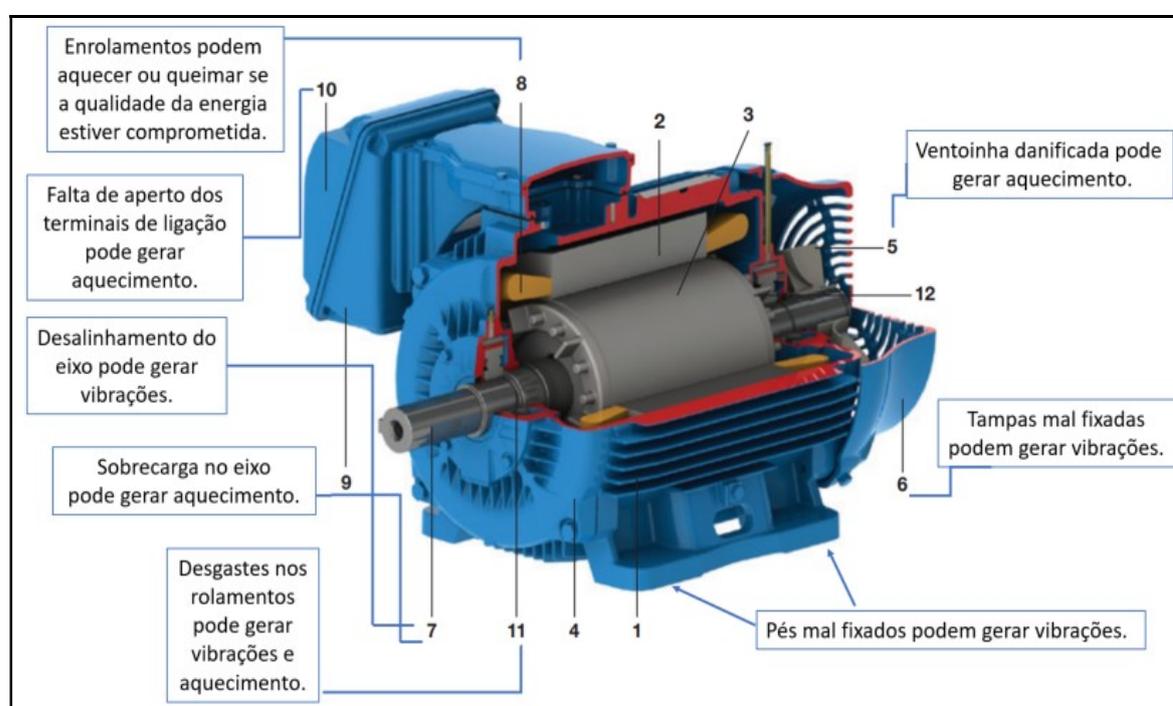


Figura 3: Vista em corte de um motor elétrico. (Adaptado do Guia de especificação Weg. Acesso em 23/06/2021).

A respeito da Figura 3, destacam-se os pontos:

- **Carcaça**

1 - A Carcaça é a estrutura suporte do motor elétrico e geralmente é construída em ferro fundido ou aço.

- **Estator**

2 – Núcleo de chapas

8 – Enrolamento trifásico, que é constituído de três conjuntos de bobinas, formando um sistema trifásico equilibrado.

- **Rotor**

7 – Eixo, que faz a transmissão da energia mecânica do motor.

3 – Núcleo de chapas.

12 – Barras e anéis de curto-circuito - são de alumínio injetado sob pressão numa única peça.

- **Outras componentes do motor:**

4 – Tampa.

5 – Ventilador.

6 – Tampa defletora.

9 – Caixa de ligação.

10 – Terminais.

11 – Rolamentos.

3.2.1 Mal dimensionamento do motor

Ao inserir um motor elétrico no processo fabril é necessário garantir que a máquina adequada para aquela atividade foi escolhida corretamente. Para dimensionar bem esse equipamento é necessário levar em consideração fatores como potência, torque e rpm exigidos pelo processo, mas também é indispensável se atentar as condições ambientes ao qual este equipamento ficara exposto para que seja selecionada a categoria ideal de motor para aquele serviço.

Segundo FILHO (2010), a escolha de motores com potência além da necessária provoca maior custo incipiente, rendimento inferior e menor fator de potência, o que acarreta desperdícios monetários. Motores mal dimensionados com potência abaixo da exigida pelo processo estarão trabalhando em regime de sobrecarga, o que pode causar danos precocemente.

Geralmente, o primeiro sintoma de uma sobrecarga é o aumento da temperatura do motor. Esse aquecimento, dependendo do seu nível e duração, pode acarretar sérios danos ao motor como defeitos na isolação de suas bobinas, que por sua vez pode gerar um curto circuito e até mesmo queimar o equipamento, além de problemas mecânicos relacionados ao aquecimento dos rolamentos e eixo, que podem travar o motor.

No tópico a seguir, serão apresentados alguns problemas nos motores relativos ao aquecimento.

3.2.2 Aquecimento

A temperatura é uma referência de entendimento simples. O monitoramento de sua variação permite descobrir mudanças no estado dos maquinários, das peças e do próprio processo (KARDEC; NASCIF, 2009).

ANTONIOLLI (1999) diz que a temperatura deve ser monitorada e controlada em todos os programas de manutenção para com isso conservar os equipamentos em boas condições de trabalho.

Baseados nas afirmações dos autores KARDEC e NASCIF (2009) e ANTONIOLLI (1999), conclui-se que a temperatura é um parâmetro que pode fornecer informações sobre o estado dos equipamentos.

Os motores elétricos possuem padrões de temperatura de trabalho. Em geral, aquecimentos excessivos podem indicar problemas.

Segundo SPAMER (2009), o motor elétrico aquecido pode ser resultado de um ou mais fatores, tais como:

- **Interferência na alimentação elétrica:** SPAMER (2009) afirma que esses problemas podem ocasionar aumentos de temperatura nos motores. São eles a falta de fase; sobretensão; subtensão e desbalanceamento das tensões elétricas.
- **Ineficiência do sistema de refrigeração:** pode ocorrer por problemas como a obstrução da ventilação, sujeira ou ventoinha quebrada. A ineficiência na refrigeração pode causar o secamento da lubrificação dos rolamentos, aumento de temperatura, problemas no isolamento das bobinas e até a queima do motor elétrico.
- **Influência de fonte externa de temperatura:** ambientes que possuem estruturas com elevadas temperaturas, tais como fornos ou estufas, podem transmitir calor ao motor elétrico. Em excesso, essa energia térmica pode causar danos como defeito na isolação dos enrolamentos.
- **Operação indevida:** as operações indevidas acontecem quando o motor elétrico tem um número de partidas maior que o previsto em projeto, o que pode causar aumento de temperatura e conseqüentemente defeito na isolação dos enrolamentos, curto-circuito e queima.
- **Sobrecarga:** esse problema é caracterizado principalmente pelo excesso de carga instalada no eixo do motor elétrico, mas também pode ocorrer por falta de lubrificação e desgaste de componentes do motor.

Na Figura 4 é apresentado um fluxograma que esquematiza os tipos de falta mencionados anteriormente, que podem levar ao sobreaquecimento dos motores.

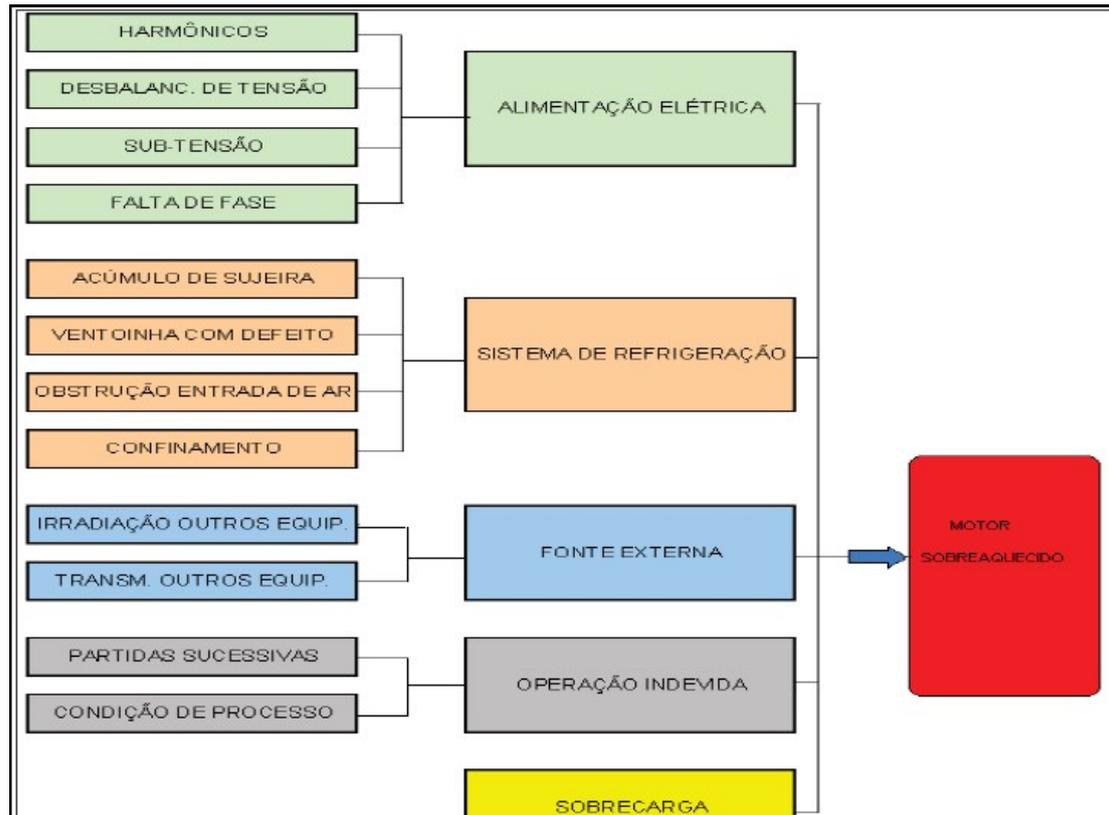


Figura 4: Fluxograma de problemas que levam ao sobreaquecimento do motor. (SPAMER, 2009).

É importante também ressaltar que é preciso garantir que os condutores elétricos estejam bem dimensionados e em bom estado para evitar o surgimento de correntes parasitas.

3.2.3 Vibrações e desalinhamento

Para BALDISSARELLI (2019), vibração se define quando um corpo está em movimento oscilatório em torno de uma referência. A técnica de análise de vibrações é um dos métodos mais importantes de predição. O maior destaque para a aplicação dessa técnica são as máquinas rotativas.

As vibrações em máquinas rotativas podem indicar problema nos motores. Segundo SPAMER (2009), as vibrações podem surgir por diversos fatores como: desbalanceamento; desalinhamento; folgas mecânicas e defeitos em rolamentos. Por isso é de extrema importância o monitoramento das vibrações para que possíveis defeitos sejam identificados em seu início, quando o reparo geralmente é simples e barato.

A seguir, serão apresentados com mais detalhes alguns problemas comuns nos motores que geram vibração:

- **Desbalanceamento:** para SPAMER (2009) o desbalanceamento é muito comum e acontece quando em um rotor, as massas não são distribuídas de maneira uniforme comparado ao eixo de inércia. Segundo FERREIRA (2019) este tipo de

problema geralmente ocorre em decorrência de danos mecânicos tais como: desgaste do eixo, atritos ou colisões, ou por aquecimento.

- **Desalinhamento:** o desalinhamento entre eixo e carga pode provocar grandes desgastes principalmente nos rolamentos da máquina, além de outros desgastes mecânicos. Há duas formas de desalinhamento. São eles o desalinhamento angular, como mostrado na figura 5 e o desalinhamento paralelo, ilustrado na figura 6.

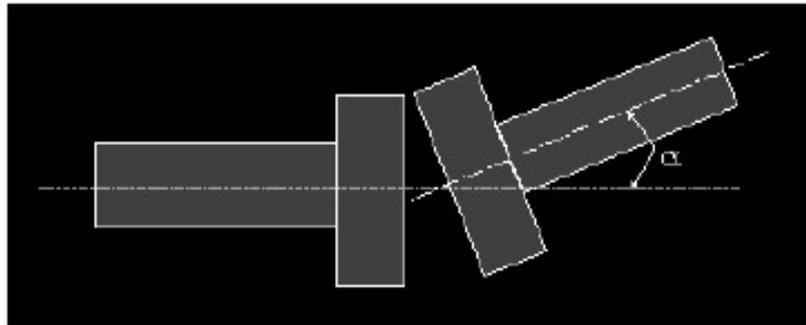


Figura 5: Desalinhamento angular. (SPAMER, 2009).

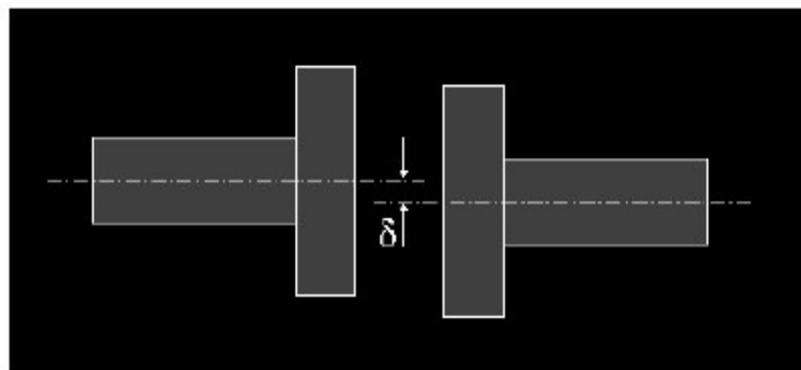


Figura 6: Desalinhamento paralelo. (SPAMER, 2009).

- **Folgas mecânicas:** As folgas mecânicas causam vibrações. Para SPAMER (2009) os principais tipos de folgas mecânicas são folgas estruturais; falta de rigidez na fundação; folgas nos chumbadores; folga por parafusos frouxos; folgas por trincas; e folgas por má fixação entre os componentes da máquina.
- **Desgaste dos rolamentos:** esse problema também gera vibrações. Para FERREIRA (2019), o desgaste dos rolamentos é um dos problemas mais recorrentes em motores elétricos. Algumas das causas de defeitos nos rolamentos são sujidades, falta de lubrificação, desalinhamento, além do desgaste natural por uso.
- **Falhas de engrenamento:** para SPAMER (2009) as falhas de engrenamento podem ocorrer principalmente por desgaste dos dentes das engrenagens, falta de lubrificantes, além de sujidades ou algum outro material estranho que pode estar presente acidentalmente em um engrenamento.

3.3 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

Para CARNEIRO (2015), a manutenção preditiva tem a capacidade de apontar a necessidade de intervenção pois monitora e acompanha as condições da máquina ou instalações. Esse tipo de manutenção pode indicar com maior precisão o tempo de vida útil das partes do equipamento e apontar a necessidade de reparos de forma planejada.

Segundo SOUZA (2011), baseado em dados coletados, a manutenção preditiva pode indicar as reais condições dos equipamentos, seu estado de desgaste e degradação.

KARDEC e NASCIF (2009) classificam a manutenção preditiva como a primeira grande quebra de paradigma na Manutenção, e apontam que ela ganhara força dentro das indústrias com a evolução da tecnologia e conseqüentemente dos métodos utilizados na manutenção preditiva.

Segundo CARNEIRO (2015), em meio as principais vantagens da manutenção preditiva, estão:

- Predizer a necessidade de trabalhos de manutenção da máquina;
- Reduzir a hipótese de desmontagem desnecessária;
- Ampliar o intervalo de disponibilidade das máquinas;
- Diminuir as paradas emergenciais;
- Ampliar a vida útil das maquinas e equipamentos e a confiabilidade da performance;
- Definir com antecedência interrupções de fabricação.

É valido ressaltar que para cada gênero de máquina e aplicação da mesma, deve-se definir a periodicidade e a forma de apontamento dos dados colhidos nas manutenções preditivas, como por exemplo: medições de temperatura e vibração.

Além do mais, caso as manutenções preditivas estiverem determinadas como contínuas, é provável subtrair as manutenções periódicas. Os principais objetivos, portanto, é diminuir custos e aumentar a produtividade. Nos tópicos a seguir, serão apresentadas algumas técnicas de manutenção preditiva.

3.3.1 Análise termográfica

A análise termográfica é um método que consiste na medição da temperatura dos equipamentos, através de câmeras termográficas, com o objetivo de encontrar pontos aquecidos nos equipamentos, onde geralmente pode estar ocorrendo alguma falha.

Segundo CARNEIRO (2015), a termografia é um método visual que tem como característica, dentre as alternativas de medição sem contato, a capacidade de analisar muitos equipamentos em um curto espaço de tempo, sendo ideal em grandes empresas que possui elevado número de maquinário.

É válido destacar que as câmeras térmicas não medem temperatura diretamente. Elas fazem o reconhecimento da radiação infravermelha emitida pela maquina checada por meio de um detector, que gera um sinal de saída.

A radiação infravermelha emitida é proporcional ao calor liberado do equipamento. Esta radiação possui um comprimento de onda impossível de ser vista a olho nu, mas possível de ser sentida na forma de calor (DIEGOLI; GAVLAKI, 2018).

Na figura 7 é apresentado o espectro eletromagnético com suas faixas de frequência.

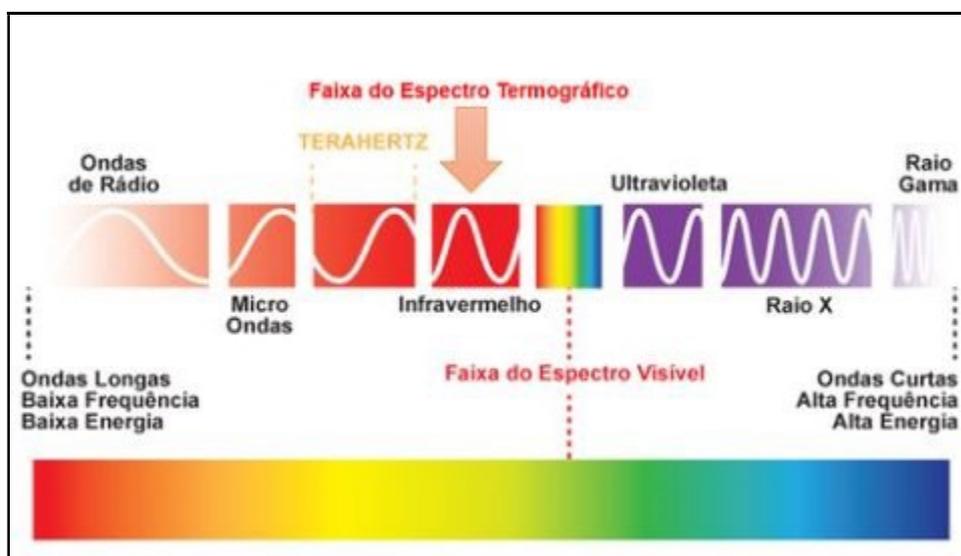


Figura 7: Espectro eletromagnético. (DIEGOLI; GAVLAKI, 2018).

As câmeras termográficas fazem a função de transformar a radiação infravermelha que não é possível de ser vista aos olhos humanos em uma imagem visível, como mostra a figura 7. As câmeras termográficas captam a energia transmitida por um equipamento, modificam a frequência dessa energia e produzem imagens que correspondem ao nível de faixa de possível visualização do espectro magnético. Essas são denominadas de termogramas. As imagens podem ser analisadas por técnicos treinados ou por software próprio e indicam a temperatura de qualquer ponto da imagem (CYRINO, 2015).

É de notável interesse que a câmera esteja calibrada (CARNEIRO 2015), assim como todo e qualquer instrumento de medição utilizado na indústria.

Com a análise termográfica é possível detectar o aumento de temperatura de um equipamento, o que é de extrema importância, pois este é o primeiro sintoma em caso de anomalias das maquinas. Para realizar as medições de temperatura utiliza se a câmera termográfica.

De acordo com SPAMER (2009) a termografia pode evitar paradas de equipamentos e aumentar a confiabilidade do processo produtivo evitando manutenções corretivas não programadas.

Ainda de acordo com o autor, a termografia possui os seguintes atributos:

- Medição de temperatura com distância segura do equipamento.
- Máquinas mais confiáveis e seguras.
- As medições de temperatura podem ser realizadas com os equipamentos em funcionamento, o que evita paradas de produção.
- Diminuição de manutenções corretivas.
- Gera informações para o planejamento das manutenções.
- Inspeções de várias máquinas em um curto espaço de tempo.

Deve ser medida a temperatura da carcaça do motor, eixo e das conexões elétricas. Os valores obtidos devem ser comparados com valores determinados pelo fabricante do motor ou caso não tenha essa informação, deve ser comparado com valores de medições anteriores. Variações de temperatura indicam que algum defeito pode estar presente, possivelmente em seu início.

3.3.2 Monitoramento de grandezas elétricas

Segundo MELO (2017), a qualidade da energia elétrica consumida pelos equipamentos tem sido assunto discutido atualmente, devido o aumento da frequência de utilização de dispositivos eletrônicos sensíveis a variações de tensão e corrente elétrica.

Para os motores elétricos, a análise de tensão e corrente de entrada pode descobrir falhas. Algumas dessas falhas relacionadas com qualidade de energia estão descritas brevemente a seguir:

- **Picos de tensão:** segundo MELO (2017), picos de tensão frequentes podem causar graves problemas ao isolamento dos motores e conseqüentemente a queima dos mesmos.
- **Desequilíbrio de fases:** O desequilíbrio de fases pode provocar aquecimento, vibrações, ineficiência e até a queima do motor elétrico em casos onde os valores de tensão apresentam grande diferença de uma fase para a outra e principalmente em casos onde os motores trabalham por períodos prolongados nessas condições.

O monitoramento de grandezas elétricas é de extrema importância. Sabe-se que variações e desbalanceamento das tensões, e correntes diferentes em cada bobina do motor, são problemas que podem gerar a queima deste. Para evitar esse problema é necessário monitorar estas grandezas. A forma mais simples e barata de monitoramento

é através de um multímetro, onde será medida a tensão elétrica e a corrente elétrica de cada fase do motor.

3.3.3 Análise de vibração

Para OKADA (2020) vibração é um movimento que se repete de forma oscilatória e em relação a uma referência. Quando esse fenômeno ocorre em máquinas industriais, pode causar desgastes em seus componentes e, conseqüentemente, quebras.

Para identificar essas vibrações na manutenção preditiva é utilizado um equipamento chamado de coletor de sinais de vibração. Ele é constituído de sensores magnéticos que são chamados de acelerômetros e que são colocados na máquina para monitoramento e obtenção de informações referentes aos componentes da máquina. As informações captadas são armazenadas e comparadas periodicamente com o intuito de identificar possíveis evoluções de vibrações e defeitos.

Com a utilização destas técnicas de análise vibratória, é possível detectar problemas típicos de máquinas elétricas, sendo os mais comuns: desbalanceamento, desalinhamento de eixos, defeitos de rolamentos, desgaste em engrenagens e mancais, cavitação e má fixação da máquina ou de seus componentes internos (WANG; WILLIANG, 1995).

Estes problemas podem causar quebra e paradas nas empresas. Para evitar essa situação recomenda-se fazer medições periodicamente através da técnica de análise de vibração citada.

Os valores de vibrações colhidos devem ser registrados e comparados com medições anteriores ou valores especificados pelo fabricante. Alterações nestes números podem indicar falhas.

4. RESULTADOS

Baseado em tudo que foi abordado neste trabalho, foi criado um plano de manutenção para motores elétricos, que consiste em um check list em forma de tabela, que deve ser preenchido com anotações dos valores colhidos em medições e verificações.

Com a implementação da manutenção preditiva dentro da indústria espera-se uma série de benefícios derivados desse programa como redução de custo, aumento de produtividade, entre outros. A Figura 8 apresenta uma lista com os benefícios que podem ser obtidos se aplicadas corretamente as técnicas mencionadas neste trabalho e o check list que será apresentado.

LISTA DE BENEFÍCIOS
REDUÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO
REDUÇÃO DE FALHAS EM MOTORES
REDUÇÃO DE ESTOQUE DE PEÇAS DE REPOSIÇÃO
REDUÇÃO DE HORAS EXTRAS DE MANUTENÇÃO
REDUÇÃO DO TEMPO DE PARADA DE PRODUÇÃO
AUMENTO DA VIDA UTIL DAS MAQUINAS
AUMENTO DA PRODUTIVIDADE
AUMENTO DOS LUCROS

Figura 8: Lista de benefícios. (produção própria).

4.1 PERIODICIDADE DA MANUTENÇÃO PREDITIVA

Para determinar a periodicidade das inspeções utiliza-se um indicador apresentado na NBR 5462 chamado de MTBF, que é uma sigla em inglês que significa tempo médio entre falhas, ou seja, esse indicador aponta o intervalo médio entre uma falha e outra.

A seguir, tem – se um exemplo de cálculo do MTBF:

- Período = 365 dias
- Número de falhas do equipamento nesse período = 8

$$\text{MTBF} = \text{Período} / \text{Número de falhas}$$

$$\text{MTBF (Tempo médio entre falhas)} = 365 / 8 = 45 \text{ dias}$$

Com o valor do MTBF obtido é possível calcular a frequência de inspeção através da formula a seguir:

$$\text{Frequência de inspeção} = 0,7 \times \text{MTBF}$$

Se o valor do MTBF for igual a 45, então a frequência de inspeção será:

$$F_i = 0,7 \times 45 = 31 \text{ dias}$$

A fórmula de frequência de inspeção sugere que as manutenções preditivas sejam realizadas a cada 70% do tempo médio entre falhas. A aplicação desse método é indicada principalmente em casos onde o processo de implementação das manutenções preditivas está em seu início. A frequência de inspeção pode variar de acordo com a importância da máquina para o processo produtivo e as condições ambientais desse processo.

4.2 PLANO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA ATRAVÉS DO CHECK LIST

Neste tópico, apresenta-se o check list de manutenção preditiva, criado para ser aplicado aos motores elétricos na indústria. Para preenchê-lo, alguns valores deverão ser coletados.

Após as coletas, os mesmos devem ser comparados periodicamente, e deve-se observar se existem alterações nos padrões de valores, que podem vir a indicar o surgimento de falhas. Os valores de referência devem ser coletados no manual do fabricante do motor elétrico e do condutor. A periodicidade de inspeção deve ser calculada através da fórmula de frequência de inspeção mostrada no tópico 4.1 deste trabalho.

No fim do check list, existem alguns pontos que são checados visualmente e devem ser marcados apenas com “ok” ou “não ok”. Caso esteja “não ok”, deve-se programar a parada para realização do reparo. Na figura 09 tem – se o plano de manutenção preditiva através do check list.

CHECK LIST DE MANUTENÇÃO PREDITIVA E COLETA DE DADOS					
ITEM	COLETA DE VALORES	VALOR DE REFERENCIA INDICADO PELO MANUAL DO FABRICANTE	PERIODICIDADE <small>(VALOR ADQUIRO NO CALCULO DE FREQUENCIA DE INSPEÇÃO BASEADO NO VALOR DE MTBF)</small>		
			MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3
1	TEMPERATURA DA CARÇAÇA (medida em °C)				
2	TEMPERATURA CONECTOR R (medida em °C)				
3	TEMPERATURA CONECTOR S (medida em °C)				
4	TEMPERATURA CONECTOR T (medida em °C)				
5	TEMPERATURA CONDUTOR R (medida em °C)				
6	TEMPERATURA CONDUTOR S (medida em °C)				
7	TEMPERATURA CONDUTOR T (medida em °C)				
8	TEMPERATURA DO EIXO (medida em °C)				
9	TEMPERATURA DO ACOPLAMENTO (medida em °C)				
10	VIBRAÇÃO NA CARÇAÇA (medida em mm/s)				
11	VIBRAÇÃO NO EIXO (medida em mm/s)				
12	VIBRAÇÃO NO ACOPLAMENTO (medida em mm/s)				
13	TENSÃO ELETRICA FASE R (medida em V)				
14	TENSÃO ELETRICA FASE S (medida em V)				
15	TENSÃO ELETRICA FASE T (medida em V)				
16	CORRENTE ELETRICA FASE R (medida em A)				
17	CORRENTE ELETRICA FASE S (medida em A)				
18	CORRENTE ELETRICA FASE T (medida em A)				
	MARCAR COM OK OU NÃO OK				
19	FIXAÇÃO DO MOTOR				
20	FIXAÇÃO DA CARGA				
21	CONDIÇÕES DE VENTILAÇÃO				
22	CHECAR VISUALMENTE				
23	RUIDOS ANORMAIS				

■	Usar camera termografica
■	Usar medidor de vibrações
■	Usar multímetro
■	Checar visualmente

Figura 9: Check list de manutenção preditiva. (Produção própria).

4.3 PASSO A PASSO DA INSPEÇÃO E PROBLEMAS IDENTIFICADOS ATRAVÉS DO CHECK LIST

Do item 1 ao item 9 do check list tem-se as medições de temperatura, que deverão ser realizadas com a câmera termográfica.

No item 1 é feita a medição da temperatura da carcaça do motor. O aumento de temperatura na carcaça do motor pode indicar problemas como: sobrecarga; sub tensão; sobre tensão; ventoinha danificada; condições improprias de ventilação ambiente e rolamentos travados.

Do item 2 ao item 7 se faz medições da temperatura dos conectores e cabos elétricos. Alterações nos padrões de temperatura desses itens podem indicar problemas como: falta de aperto das conexões elétricas; mal dimensionamento dos cabos e elevados níveis de corrente elétrica.

Os itens 8 e 9 solicitam medições na temperatura do eixo e acoplamento. Aumento de temperatura nesses locais indicam problemas relacionados a desalinhamento do eixo e carga; desbalanceamento e sobrecarga.

Do item 10 ao item 12 do check list, se faz medições de vibrações. No item 10 é feita a medição de vibrações na carcaça do motor. Valores de vibração acima dos padrões definidos pelo fabricante ou pelo histórico de medições pode indicar problemas como: má fixação do motor; folgas mecânicas desgaste dos rolamentos e falhas de engrenamento.

Nos itens 11 e 12 se faz medições de vibrações no eixo e acoplamento. Vibrações excessivas nesses locais indicam principalmente desalinhamento entre eixo do motor e carga acoplada e desbalanceamento do eixo.

Do item 13 ao 18 do check list se faz medições de tensão e corrente elétrica com o multímetro. Com essas verificações é possível identificar: sobretensão; subtensão; desbalanceamento entre a tensão das fases e sobre corrente. Esses problemas, se não solucionados, podem causar a queima do motor.

Do item 19 ao item 23, são realizadas inspeções visuais.

Nos itens 19 e 20 se pede para verificar visualmente a fixação do motor e da carga. Quando o motor ou a carga estão com a fixação frouxa ou não fixados pode se obter vibrações que geram: desalinhamentos; desgastes de partes mecânicas como eixo, acoplamento e rolamentos; folgas e conseqüentemente aquecimento.

No item 21, pede-se para verificar as condições de ventilação como o estado da ventoinha e as condições ambientes que podem ter sido alteradas por algum outro equipamento ou condição instalada próximo ao motor elétrico. A ventilação é muito importante para o eficiente funcionamento do motor elétrico. Restrições e deficiências de ventilação podem levar ao aquecimento do motor elétrico e a queima do mesmo.

O item 22 pede para checar visualmente o motor. Nesse item pode se identificar problemas relacionados a sujeira do motor e do local. Excessos de sujeira podem causar deficiências na ventilação e também curto-circuito.

O item 23 solicita a checagem de ruídos anormais que podem indicar problemas como: tampas soltas; desgastes mecânicos e problemas nos rolamentos.

A proposta do check list é identificar todos os problemas citados anteriormente de maneira precoce, para que se possa atuar na resolução de maneira planejada, sem impactos ao sistema produtivo, enquanto o problema ainda está no seu início e é de fácil resolução e baixo custo.

4.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO CHECK LIST

Para exemplificar, o plano de manutenção sugerido através do check list foi aplicado ao Motor Weg W22 IE1 Standard Efficiency 3 KW 380 V. Os valores de referência de tensão, corrente, temperatura e vibrações foram adquiridos no manual do fabricante. O mesmo determina que esses valores de referência são válidos quando as características do ambiente são de temperatura máxima de até 40 °C e altitude de até 1000 metros. Para condições diferentes de ambiente o fabricante determina outros valores de referência para temperatura e vibrações que podem ser consultados no manual da máquina. O fabricante admite em seu manual variações de vibrações de acordo com a carga que será aplicada ao motor.

Para exemplificar a periodicidade das manutenções, foi levado em consideração que o motor possui um MTBF de 45 dias. Então, utilizando a fórmula de cálculo de frequência de inspeção, tem-se:

$$F_i = 0,7 \times 45 = 31 \text{ dias}$$

Nesse caso, o cálculo indica que inspeções devem ser realizadas a cada 31 dias, ou seja, mensalmente. Na figura 10 tem-se o exemplo de aplicação do plano de manutenção através do check list.

CHECK LIST DE MANUTENÇÃO PREDITIVA E COLETA DE DADOS PARA O MOTOR WEG W22 IE1 STANDARD EFFICIENCY 3KW 380 V								
ITEM	COLETA DE VALORES	VALOR DE REFERENCIA INDICADO PELO MANUAL DO FABRICANTE	PERIODICIDADE <small>(VALOR AQUIRRO NO CALCULO DE FREQUÊNCIA DE INSPEÇÃO BASEADO NO VALOR DE MTBF)</small>					
			JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
1	TEMPERATURA DA CARÇAÇA (medida em °C)	ATÉ 140 C°						
2	TEMPERATURA CONECTOR R (medida em °C)	ATÉ 70 C°						
3	TEMPERATURA CONECTOR S (medida em °C)	ATÉ 70 C°						
4	TEMPERATURA CONECTOR T (medida em °C)	ATÉ 70 C°						
5	TEMPERATURA CONDUTOR R (medida em °C)	ATÉ 70 C°						
6	TEMPERATURA CONDUTOR S (medida em °C)	ATÉ 70 C°						
7	TEMPERATURA CONDUTOR T (medida em °C)	ATÉ 70 C°						
8	TEMPERATURA DO EIXO (medida em °C)	ATÉ 70 C°						
9	TEMPERATURA DO ACOPLAMENTO (medida em °C)	ATÉ 70 C°						
10	VIBRAÇÃO NA CARÇAÇA (medida em mm/s)	0,7 mm/s						
11	VIBRAÇÃO NO EIXO (medida em mm/s)	0,7 mm/s						
12	VIBRAÇÃO NO ACOPLAMENTO (medida em mm/s)	0,7 mm/s						
13	TENSÃO ELETRICA FASE R (medida em V)	220 V (TENSÃO FASE / NEUTRO)						
14	TENSÃO ELETRICA FASE S (medida em V)	220 V (TENSÃO FASE / NEUTRO)						
15	TENSÃO ELETRICA FASE T (medida em V)	220 V (TENSÃO FASE / NEUTRO)						
16	CORRENTE ELETRICA FASE R (medida em A)	7,9 A						
17	CORRENTE ELETRICA FASE S (medida em A)	7,9 A						
18	CORRENTE ELETRICA FASE T (medida em A)	7,9 A						
	MARCAR COM OK OU NÃO OK							
19	FIXAÇÃO DO MOTOR							
20	FIXAÇÃO DA CARGA							
21	CONDIÇÕES DE VENTILAÇÃO							
22	CHECAR VISUALMENTE							
23	RUIDOS ANORMAIS							
	Usar camera termografica							
	Usar medidor de vibrações							
	Usar multímetro							
	Checar visualmente							

Figura 10: Exemplo de aplicação do check list. (Produção própria).

4.5 CUSTOS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA E SUGESTÃO DE ORDEM DE PRIORIDADE DE INVESTIMENTO.

Para ser possível a prática da manutenção preditiva dentro da indústria é necessário que se invista em equipamentos e treinamento de colaboradores. Com a finalidade de aplicar as técnicas sugeridas nesse trabalho, é preciso que se faça a compra de equipamentos como a câmera termográfica, o medidor de vibrações e o multímetro, além da aquisição de treinamento.

Na tabela 01 é apresentado um orçamento das ferramentas necessárias para a aplicação das técnicas apresentadas, além da aquisição de um treinamento de manutenção preditiva para quatro funcionários. O orçamento dos equipamentos foi realizado na loja virtual de ferramenta Dutra Máquinas e o treinamento de manutenção preditiva foi orçado na escola Somática Educar.

TABELA DE CUSTOS	
Câmera Térmica pontual infravermelha Wi-Fi -20 °C a 400 °C - E5-XT	R\$ 11.999,00
Medidor de Vibração Datalogger VT-8204 Lutron	R\$ 5.022,95
Alicate amperímetro digital CAT III 600V - 302+	R\$ 299,90
Treinamento de Técnicas Preditivas aplicadas à Detecção de Falhas em Equipamentos Industriais (1 pessoa)	R\$ 267,00
Total de custos incluindo os equipamentos e treinamento para 4 funcionários	R\$ 18.388,00

Tabela 01: Orçamento. (Produção própria).

Para indústrias de pequeno porte e/ou que possuem maiores restrições nos valores destinados a investimentos, tem-se uma sugestão da ordem de prioridades de investimento em relação ao orçamento apresentado.

O primeiro item que deve ser priorizado é o treinamento dos funcionários, pois nenhum trabalhador deve realizar atividades sem antes estar qualificado, capacitado e autorizado para exercer a sua atividade.

O segundo item a ser priorizado é a compra do multímetro, pois com esse equipamento é possível verificar os níveis de tensão elétrica e garantir que o motor esteja ligado em sua tensão correta de trabalho, o que pode evitar a queima do mesmo. Com o multímetro também é possível verificar a ausência de tensão elétrica, o que é fundamental para garantir a segurança do funcionário em caso de paradas para manutenção.

Em seguida deve-se priorizar a compra da câmera termográfica, pois levando em consideração que este trabalho trata de motores elétricos, neste equipamento especificamente, o aquecimento acima dos padrões determinados pode indicar um leque muito grande de problemas como sobrecarga, na alimentação elétrica, defeitos no sistema de refrigeração, operações indevidas, desgastes, entre outros.

E por fim, mas também com grande importância, sugere-se a compra do medidor de vibrações, pois esse equipamento é capaz de identificar problemas relacionados a desgastes e desalinhamentos.

5. CONCLUSÃO

Com a implementação do check list apresentado, é possível identificar de maneira precoce uma grande quantidade de problemas, conforme apresentado na sessão de resultados. Dessa forma, monitorando os motores através do check list, é provável que se obtenha pelo menos um dos benefícios que na sequência estão descritos:

Redução dos custos de manutenção: devido ao monitoramento frequente dos motores, espera-se que os problemas sejam detectados em sua fase incipiente, e que pequenos reparos possam ser realizados, ao invés de esperar que ocorra uma grande falha e seja necessária a troca de peças com custos elevados.

Redução de falhas nos motores: com a aplicação do check list e o aumento de monitoramento do estado dos motores elétricos, espera-se uma tendência de diminuição da ocorrência de falhas, e, conseqüentemente, das manutenções corretivas.

Aumento da vida útil dos motores: com o monitoramento frequente das condições de trabalho dos componentes do motor elétrico, é possível identificar problemas iniciais e atuar antes de seu agravamento, além de ser possível acompanhar a evolução do problema e aproveitar as peças ao máximo, sem comprometer o funcionamento da linha de produção.

Redução de estoque de peças de reposição: com a diminuição da frequência de quebra dos motores, naturalmente será possível reduzir a quantidade de peças estocadas para consertos corretivos, uma vez que haverá uma redução na demanda dessas peças.

Redução de horas extras de manutenção: devido o mapeamento da situação dos motores com o check list, as manutenções passarão a ocorrer de maneira planejada, evitando assim surpresas com quebras inesperadas e horas extras não programadas.

Redução parada de produção, e conseqüente aumento dos níveis de produtividade: em razão da redução nas paradas não programadas, os motores estarão disponíveis por mais tempo para o sistema produtivo industrial.

Aumento dos lucros: em conseqüência da implementação da manutenção preditiva, espera-se um aumento nos lucros da indústria, uma vez que possivelmente ocorrerão redução de custos com peças, horas extras, quebras inesperadas, maior aproveitamento dos equipamentos, e maior disponibilidade das máquinas para produção.

Outro item de importante destaque que a manutenção preditiva pode ajudar a obter é a entrega dos produtos para os clientes no prazo estabelecido, pois com a diminuição de quebras inesperadas e paradas de produção indesejáveis a empresa terá maiores condições de cumprir os prazos determinados, melhorando a reputação da empresa com o seu cliente e também a imagem da marca no mercado.

Por fim, a construção desse trabalho proporcionou mostrar os benefícios que a manutenção preditiva pode trazer a um sistema fabril, em específico aos motores elétricos, monitorando suas condições de trabalho e permitindo um sistema de produção confiável e disponível, além de conseqüentemente evitar transtornos e reduzir custo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
- ANTONIOLLI, Edilar B. **Estudo comparativo de técnicas de medição e análise de vibrações para a manutenção preditiva em mancais e rolamentos**. Abril, 1999.
- BALDISSARELLI, Luciano. **Manutenção Preditiva na indústria 4.0**. (2019).
- CABRAL, Lígia M.M. **O Panorama do Setor de Energia Elétrica no Brasil**. (1998).
- CARNEIRO, André de A. **Estudos de técnicas de manutenção preditiva em transformadores de potência e motores de indução trifásica**. (julho 2015).
- CYRINO, L. **Termografia, conceitos e aplicações**. [S.l.], 29 jun. 2015.
- DAPPER, Paloma V. **Implementação de uma rotina de manutenção em rolamentos**. São Paulo, 2019.
- DIEGOLI, B. B.; GAVLAKI, D. **Indústria 4.0: Manufatura Avançada**. Nov. 2018.
- FERREIRA, Ravi Helon De Melo S. **Sistema de Manutenção Preditiva para Motores Elétricos Utilizando de Sinais de Vibração e Aprendizado de Máquina**. (2019).
- FILHO, Delly O. **Dimensionamento de motores para o bombeamento de água**. (2010)
- KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 3.ed. Rio de Janeiro: Ed. Qualitymark, p. 384, 2009.
- MELO, Hugo da C. **Plano de manutenção preditiva para motores elétricos – Definição e implementação numa indústria de pasta de papel**. Coimbra, nov. 2017.
- OKATA, Roberto H. **Manutenção preditiva: estratégia de produção e redução de custo**. (2020).
- RIGHETTO, Sophia B. **Manutenção Preditiva 4.0: Conceito, Arquitetura e Estratégias de Implementação**. (2020).
- SPAMER, Fernanda R. **Técnicas de manutenção em máquinas rotativas**. (agosto 2009).
- WANG, H.; WILLIAMS, K. **The Vibrational Analysis and Experimental Verification of a Plane Electrical Machine Stator Model**. Mechanical Systems and Signal Processing, p.429-438, 2003.
- WEG. **Guia de especificação. Motores elétricos**. (2021).
- WEG. **Catálogo técnico. Motor elétrico trifásico W22**. (2021).

WOLFF, Joca. **O Motor Elétrico: Uma história de energia, inteligência e trabalho.** (2004).