

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS**

**JHONATTAN FARAH SIGNORELLI**

**ANÁLISE DE ANOMALIAS EM MEDIÇÕES DE PARÂMETROS ELÉTRICOS EM  
MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS NUMA FÁBRICA DE PRENSAGEM  
METÁLICA**

Manaus/AM  
2019

**JHONATTAN FARAH SIGNORELLI**

**ANÁLISE DE ANOMALIAS EM MEDIÇÕES DE PARÂMETROS ELÉTRICOS EM  
MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS NUMA FÁBRICA DE Prensagem  
METÁLICA**

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr.C. Israel Gondres Torné

Manaus/AM  
2019

**Universidade do Estado do Amazonas – UEA**  
**Escola Superior de Tecnologia - EST**

*Reitor:*

***Cleinaldo de Almeida Costa***

*Vice-Reitor:*

***Cleto Cavalcante De Souza Leal***

*Diretora da Escola Superior de Tecnologia:*

***Ingrid Sammyne Gadelha Figueiredo***

*Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica:*

***Walfredo da Costa Lucena Filho***

*Banca Avaliadora composta por:*

***Prof. Dr. Israel Gondres Torné (Orientador)***

***Prof. Dr. Daniel Guzman Del Rio (Avaliador)***

***Prof. Dr. Edry Antonio Garcia Cisneros (Avaliador)***

*Data da defesa: <16/12/2019>.*

## **CIP – Catalogação na Publicação**

Farah, Jhonattan Signorelli

Análise de anomalias em medições de parâmetros elétricos em motores elétricos trifásicos numa fábrica de prensagem metálica / Jhonattan Farah Signorelli; [orientado por] Israel Gondres Torné– Manaus: 2019.

62 p.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Estado do Amazonas, 2019.

1. Inspeção Preditiva. 2. Motor Elétrico Trifásico. 3. Análise de Falha. Gondres, Israel Torné.

JHONATTAN FARAH SIGNORELLI

ANÁLISE DE ANOMALIAS EM MEDIÇÕES DE PARÂMETROS ELÉTRICOS EM  
MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS NUMA FÁBRICA DE PRENSAGEM METÁLICA

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Nota obtida: \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ )

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

Área de concentração: Máquinas Elétricas

BANCA EXAMINADORA

---

Orientador: Israel Gondres Torné, *Dr.*

---

Avaliador: Daniel Guzmán del Rio, *Dr.*

---

Avaliador: Edry Antonio García Cisneros, *Dr.*

A todos meus amigos que, em algum momento, estiveram ao meu lado durante minha jornada, me permitindo sempre aprender algo novo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Israel Gondres, pela sua enorme contribuição e paciência na orientação do meu trabalho.

Agradeço aos meus amigos do curso e da faculdade como um todo, especialmente ao Ruan Teixeira por estar comigo desde o início do curso e ter enfrentado todos os inúmeros desafios comigo.

Agradecimento a minha mãe e meu padrasto Wesley por toda dedicação e paciência que possuíram em me permitir crescer sob meu ritmo.

Agradeço a todos os professores que fizeram parte da minha formação e especialmente ao professor Almir Kimura Junior e todo grupo do GEAR, por permitir que toda minha formação tenha tido uma base prática sólida, além de ter sido uma base gigantesca para desenvolver minha comunicação interpessoal.

Agradeço a todos meus amigos que, em algum momento da minha vida estiveram presentes ao meu lado. Infelizmente não há espaço para eu dedicar individualmente a todos vocês, mas agradeço a todo apoio moral e espiritual que me forneceram nesses difíceis, porém recompensadores, momentos da minha vida.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma tabela de Análise de Modos de Falha considerando todos os possíveis parâmetros que podem indicar uma falha futura em um motor elétrico trifásico indutivo. O foco do trabalho se mantém nos motores de uma fábrica metalúrgica de prensagem metálica. Os tipos de análise são de temperatura (utilizando câmera termográfica), vibração (utilizando medidor de vibração portátil), corrente e tensão (utilizando multímetro). A construção da tabela FMEA (Análise de Modos de Falha) será feita tanto por pesquisa bibliográfica quanto por levantamento técnico em campo, observando até onde existe limitação de documentação científica para esse assunto. O propósito do trabalho é reduzir o número de paradas da linha de produção da fábrica foco por falhas em motores elétricos, visto que esses possuem grande impacto na eficiência dos equipamentos. A tabela FMEA proposta será utilizada como modelo de procedimento para um plano de manutenção e será mostrado a sua execução na prática, ressaltando o resultado real positivo durante o ano de sua aplicação, tendo uma redução de mais da metade em problemas em motores elétricos.

**Palavras-chave:** Inspeção Preditiva. Motor Trifásico Indutivo. Análise de Modos de Falha.

## ABSTRACT

The present work aims to develop a Failure Mode Analysis table considering all possible parameters that may indicate a future failure in an inductive three-phase electric motor. The focus of the work remains on the motors of a metallurgical press factory. The types of analysis are temperature (using thermographic camera), vibration (using portable vibration meter), current and voltage (using multimeter). The construction of the FMEA table will be made by bibliographic research as well as by technical field survey, observing to what extent there is a limitation of scientific documentation for this subject. The purpose of the work is to reduce the number of plant production line stoppages due to failures in electric motors, as these have a major impact on equipment efficiency. The proposed FMEA table will be used as a procedure model for a maintenance plan and will be shown its implementation in practice, highlighting the actual positive result during the year of its application, with a reduction of more than half in problems in electric motors.

**Keywords:** Predictive Inspection. Three Phase Inductive Motor. Failure Mode Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição dos tipos de manutenção ao longo dos anos. _____	17
Figura 2 – Exemplo de motores indutivos da WEG, comumente utilizados na indústria. ____	19
Figura 3 – Visão explodida de um motor indutivo. _____	20
Figura 4 – Visão de um Estator de um motor de indução. _____	21
Figura 5 – Rotor do tipo bobinado. _____	21
Figura 6 – Rotor do tipo gaiola de esquilo, junto com seu estator. _____	22
Figura 7 – Tipos de rolamentos mais usuais. _____	23
Figura 8 – Configuração mecânica das bobinas do estator com o rotor. _____	24
Figura 9 - Partes de um motor elétrico, destacando o Rotor, Estator e Rolamento. _____	26
Figura 10 - Uso do medidor de vibração no equipamento _____	29
Figura 11 – Exemplo de termografia sendo executada em campo. _____	30
Figura 12 - Exemplo de medição de corrente _____	30
Figura 13 – Termografia no rolamento dianteiro. _____	40
Figura 14 - Termografia no estator. _____	41
Figura 15 - Termografia no redutor acoplado ao motor. _____	41
Figura 16 – Pontos de análise de vibração do motor. _____	44
Figura 17 – Medição de tensão no painel do motor. _____	46
Figura 18 – Medição de corrente com o alicate amperímetro. _____	48
Figura 19 – Técnico realizando análise da caixa de vedação de uns dos motores do equipamento. _____	50
Figura 20 – Modelo do procedimento utilizado e distribuído aos técnicos durante inspeções. _____	53
Figura 21 – Motor a ser realizada a inspeção exemplo. _____	54
Figura 22 – Realização da medição de vibração do motor. _____	55
Figura 23 – Termografia no Estator. _____	56
Figura 24 – Termografia no rolamento inferior. _____	56
Figura 25 – Termografia no rolamento superior. _____	57
Figura 26 – Termografia no redutor. _____	57
Figura 27 – Placa de identificação do motor. _____	58
Figura 28 – Medições de corrente e tensão do motor. _____	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de quantificação do valor de Severidade.....	33
Tabela 2 – Tabela de quantificação do valor de Ocorrência. ....	34
Tabela 3 - Tabela de quantificação do valor de Detecção.....	35
Tabela 4 – Exemplo de uma tabela de FMEA para um caso hipotético em um contexto de uma fábrica têxtil. ....	38
Tabela 5 - Tabela FMEA das análises preditivas do trabalho (parte 1). ....	51
Tabela 6 - Tabela FMEA das análises preditivas do trabalho (parte 2). ....	52
Tabela 7 – Valores de vibração encontrados.....	55
Tabela 8 – Valores de temperatura. ....	58
Tabela 9 – Valores de corrente e tensão. ....	59

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Principais impactos de em paradas de linha da fábrica analisada.....	14
Gráfico 2 – Ocorrências de defeitos em motores que ocasionaram parada de linha durante os anos de 2018 e 2019 na fábrica analisada.....	60

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CV:	Cavalo de Vapor (1 CV $\approx$ 735,5W)
FMEA:	Failure Mode and Effects Analysis
IEC:	International Electrotechnical Commission
ISO:	International Organization for Standardization
NBR:	Norma Brasileira
PVP:	Programa de Verificação do Projeto
RF:	Rádio Frequência

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	16
1.1 GESTÃO DE MANUTENÇÃO .....	16
<b>1.1.1 Manutenção Reativa</b> .....	16
1.1.1.1 Manutenção Corretiva .....	16
1.1.1.2 Manutenção baseada em melhoramento de habilidades .....	17
<b>1.1.2 Manutenção Proativa</b> .....	17
1.1.2.1 Manutenção Preventiva .....	17
1.1.2.2 Manutenção Preditiva .....	18
1.1.2.3 Manutenção de Melhoria .....	18
1.2 MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICO DE INDUÇÃO .....	18
<b>1.2.1 Principais componentes de um motor</b> .....	20
1.2.1.1 Estator .....	20
1.2.1.2 Rotor .....	21
1.2.1.3 Rolamentos .....	22
1.2.1.4 Carcaça .....	23
1.2.1.5 Caixa de ligação .....	23
1.2.1.6 Tampa defletora .....	23
<b>1.2.2 Princípio de funcionamento</b> .....	24
1.3 FALHAS EM MOTORES ELÉTRICOS .....	25
<b>1.3.1 Falhas nos rolamentos</b> .....	26
<b>1.3.2 Falhas no Estator</b> .....	27
<b>1.3.3 Falhas no Rotor</b> .....	27
1.4 ANÁLISES PREDITIVAS EM MOTORES ELÉTRICOS .....	28
<b>1.4.1 Vibração</b> .....	28
<b>1.4.2 Termografia</b> .....	29

<b>1.4.3</b>	<b>Corrente e Tensão</b> .....	<b>30</b>
<b>1.5</b>	<b>FMEA - Análise dos Modos e Efeitos de Falha</b> .....	<b>31</b>
<b>1.5.1</b>	<b>Operação</b> .....	<b>31</b>
<b>1.5.2</b>	<b>Modos potenciais de Falha</b> .....	<b>31</b>
<b>1.5.3</b>	<b>Efeito</b> .....	<b>32</b>
<b>1.5.4</b>	<b>Severidade</b> .....	<b>33</b>
<b>1.5.5</b>	<b>Causa</b> .....	<b>33</b>
<b>1.5.6</b>	<b>Ocorrência</b> .....	<b>34</b>
<b>1.5.7</b>	<b>Controle de Prevenção</b> .....	<b>34</b>
<b>1.5.8</b>	<b>Controle de Detecção</b> .....	<b>35</b>
<b>1.5.9</b>	<b>Detecção</b> .....	<b>35</b>
<b>1.5.10</b>	<b>Risco</b> .....	<b>36</b>
<b>1.5.11</b>	<b>Ação Recomendada</b> .....	<b>36</b>
<b>1.5.12</b>	<b>Exemplo de FMEA</b> .....	<b>37</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO</b> .....	<b>39</b>
<b>2.1</b>	<b>TERMOGRAFIA</b> .....	<b>40</b>
<b>2.2</b>	<b>ANÁLISE DE VIBRAÇÃO</b> .....	<b>43</b>
<b>2.3</b>	<b>ANÁLISE DE TENSÃO</b> .....	<b>45</b>
<b>2.4</b>	<b>ANÁLISE DE CORRENTE</b> .....	<b>47</b>
<b>2.5</b>	<b>A TABELA FMEA</b> .....	<b>49</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>50</b>
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>62</b>

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as empresas tem apresentado grande ritmo de desenvolvimento no setor produtivo, adquirindo novas tecnologias capazes de produzir cada vez mais usando menos, portanto, tem aumentando junto também, a competitividade de novos mercados, obrigando as empresas a adquirirem excelência na sua produção.

Todas linhas de produção possuem algum tipo de manutenção, seja planejada ou não. O modelo mais simples de manutenção é a corretiva não planejada, a qual só existe atuação quando há quebra na máquina. Com o passar dos anos, os estudos de gestão de manutenção foram se aprofundando, o qual levou o conhecimento atual que temos onde toda fábrica procura ao máximo evitar que seus equipamentos críticos parem de forma não planejada, evitando custos por paradas de linha e peças de manutenção (A & P, 2014).

Entre todas as formas de manutenções planejadas, há um destaque para manutenções preditivas, quando há uma inspeção de parâmetros do equipamento em campo, a fim de identificar as condições de funcionamento e avaliar se há necessidade de atuação no equipamento ou não. Essa manutenção se destaca pois possui custo reduzido, visto que o equipamento só é desligado para manutenção programada momentos antes de sua quebra prevista.

Entre todos componentes elétricos de uma fábrica de médio porte, como sensores elétricos, painéis elétricos, placas eletrônicas e motores elétricos, esse último é o que normalmente apresenta maior custo, fazendo com que seja necessário um bom plano de manutenção aplicado nesses equipamentos.

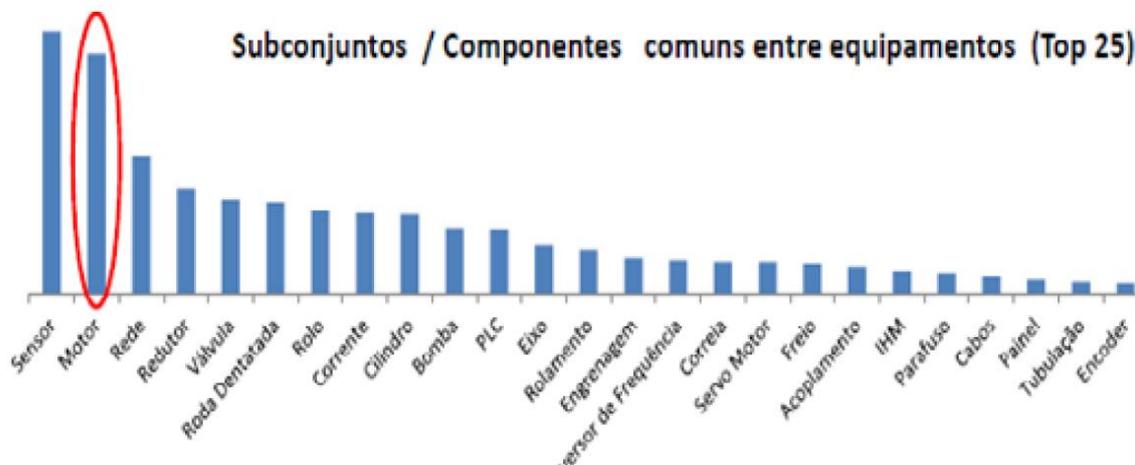
Motores elétricos trifásicos são ótimos para realizar inspeções preditivas pois possuem várias características que podem ser mensuradas como “termômetro” do seu estado de operação. Inspeções preditivas em motores elétricos podem envolver a análise de tensão, corrente, temperatura, vibração, acústica, campo magnético, velocidade, análise química e entre outras técnicas.

Faça-se necessário então uma boa rotina aplicada para essas inspeções, com faixas claras onde esses parâmetros indicam ou não um defeito no motor e, para cada possível caso de leitura tenha um procedimento de análise claro e objetivo sobre as possíveis causas e como trata-las.

Conforme um estudo levantando por (RIBEIRO, 2017) na mesma fábrica estudada, o segundo maior impacto na planta é relacionado a motores, justificando o foco de atenção nesse componente. Como esse tipo de equipamento é passível de inspeções preditivas foca-se atenção

para essa manutenção, visto seu custo benefício em relação a manutenções corretivas e preventivas.

Gráfico 1 - Principais impactos de em paradas de linha da fábrica analisada.



Fonte: (RIBEIRO, 2017).

Durante esse tipo de manutenção é observado deficiência dos técnicos no respeito a padronização da atividade, sendo visto que cada técnico faz a sua investigação baseado em conhecimentos prévios empíricos. Tal *modus operandi* não traz confiabilidade pois uma análise subjetiva pode ser enviesada para uma solução mais custosa, mais simples ou mais rápida para o técnico, o que pode elevar o custo ou trazer mais tempo de máquina parada que o necessário.

Nesse contexto, esse trabalho pretende criar um procedimento de inspeção de análise preditiva das variáveis de corrente, tensão, temperatura e vibração, indicando as faixas de funcionamento e auxiliando na investigação e tratamento dessas anomalias de forma simples, objetiva e compreensível, com objetivo de reduzir a quantidade de falhas por motores elétricos na fábrica estudada. Dentre os objetivos específicos, estão:

- a) levantamento de faixas de conformidade de cada parâmetro elétrico de acordo com especificações encontradas na ABNT correspondente;
- b) levantar bibliografia atual sobre relação de parâmetros elétricos em motores trifásicos e seus problemas mais comuns;
- c) levantar em campo e na bibliografia possíveis causas para os problemas mais comuns encontrados;
- d) validar o procedimento em campo, juntos aos técnicos;
- e) avaliar o impacto da melhoria em termos da quantidade de motores queimados no período.

Para abordagem do trabalho, este será dividido em 3 principais capítulos, descritos abaixo:

Capítulo I - Referencial Teórico: Será apresentado os principais conceitos de manutenção estudados e utilizados para esse trabalho, desde gestão de manutenção, análise de modos de falhas e motores indutivos e suas falhas mais comuns.

Capítulo II – Metodologia e Implementação: neste capítulo são descritas as etapas para elaboração da FMEA, justificando e quantificando as informações.

Capítulo III – Resultados Obtidos: apresenta os resultados obtidos tanto em relação ao material final (a tabela FMEA) e os resultados reais de redução de parada de linha por defeitos em motores, oriundos do trabalho e implementação do plano de manutenção.

## **1 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **1.1 GESTÃO DE MANUTENÇÃO**

Em todo processo produtivo há a necessidade de manutenções. Industrias que possuem elevados números de máquinas operando procuram produzir com excelência, visando sempre um equilíbrio entre produtividade, qualidade e a segurança de seus funcionários. Para atingimento desses objetivos há o desejo da linha rodar com sua capacidade nominal sempre atingida, porém nenhuma máquina mecânica ou elétrica possui essa propriedade de rodar sem apresentar qualquer falha, seja de natureza de desgaste natural ou forçado. Todos querem que seu processo tenha manutenção, a questão que a gestão de manutenção tenta resolver é o quanto de manutenção o processo deve ter (ENGINEERING COMMITTEE, 1998).

Um bom plano de manutenção possui uma correlação direta com custo da fábrica. Períodos curtos de quebra da máquina acarreta numa diminuição nos custos da empresa. O valor dos gastos de manutenção é dependente do risco que a gestão de manutenção pretende tomar (NARAYAN, 2012).

Até metade do século XX a predominância das atividades de manutenções era corretiva não planejada, onde o equipamento sofre algum tipo de intervenção somente quando quebra e começa a impactar a produção na linha (BEN-DAYA, et al., 2009). Tal modelo de manutenção é o mais básico possível, visto que não requer nenhum planejamento prévio. Porém possui vários contras: a probabilidade de não haver peça de reposição aumenta e demora em torno de 50% a 100% mais que uma corretiva planejada para a anomalia ser corrigida devido a todo direcionamento de mão de obra e peça que deve ser realizado durante a parada da máquina (NARAYAN, 2012).

A gestão de manutenção diz respeito, entre outros fatores, às estratégias de manutenção que podem ser aplicadas. Elas se dividem em: reativas e proativas. Na abordagem reativa, a equipe de manutenção aguarda a máquina apresentar algum defeito para então atuar. Já na abordagem proativa, há alguma previsibilidade da anomalia, assim o time de manutenção atua antes da máquina apresentar algum defeito (A & P, 2014).

#### **1.1.1 Manutenção Reativa**

##### **1.1.1.1 Manutenção Corretiva**

Também pode ser chamada de Manutenção Emergencial – É uma manutenção que

aguarda a anomalia acontecer para existir atuação. Era a manutenção predominante nos séculos passadas e hoje só é vista como aconselhada para equipamentos onde não há criticidade no processo e as quebras são raras, conforme Figura 1. Nessa manutenção o tempo de atuação é mais longo do que se fosse planejado devido à demora em separação de peças e mão-de-obra especializada.

Figura 1 – Distribuição dos tipos de manutenção ao longo dos anos.

Aplicação dos Recursos na Manutenção [%]				
Ano	Manutenção Corretiva	Manutenção Preventiva	Manutenção Preditiva	Outros
2011	27,4	37,17	18,51	16,92
2009	29,85	38,73	13,74	17,68
2007	25,61	38,78	17,09	18,51
2005	32,11	39,03	16,48	12,38
2003	29,98	35,49	17,76	16,77
2001	28,05	35,67	18,87	17,41
1999	27,85	35,84	17,17	19,14
1997	25,53	28,75	18,54	27,18
1995	32,8	35	18,64	13,56

Fonte: (ABRAMAN, 2011).

#### 1.1.1.2 Manutenção baseada em melhoramento de habilidades

Essa manutenção é semelhante a anterior, com a diferença que é voltada para a operação, não para um time especializado em manutenção. Ela gira em torno de utilizar o operador do equipamento para realizar pequenas manutenções, com avisos visuais, luminosos ou sonoros, o aproximando de atividade técnicas e melhorando sua matriz de habilidades. É recomendada quando não há criticidade no processo, porém a quebra é frequente.

### 1.1.2 Manutenção Proativa

#### 1.1.2.1 Manutenção Preventiva

Nessa manutenção, há uma periodicidade de inspeções ou trocas mandatórias que são feitos em datas pré-determinadas, assumindo que os componentes possuem desgaste natural ou forçado. A periodicidade pode ser uma data fixa no calendário ou baseada no contador do horímetro da máquina. Essa é a manutenção mais comum, porém possui alguns contras: mesmo com essa frequência definida, pode haver alguma quebra do componente antes de chegar o momento de sua troca mandatória, visto que a periodicidade é definida numa estimativa

probabilística. Da mesma forma alguns componentes podem ser trocados mesmo estando em perfeitas condições.

#### 1.1.2.2 Manutenção Preditiva

Nessa manutenção, há uma inspeção de parâmetros (realizada offline por equipamentos de medição ou online por sensores) que ditam a condição do equipamento, sinalizando para o técnico quando algum componente precisa ser inspecionado ou trocado momentos antes de sua quebra. Essa manutenção possui o grande benefício de apenas sinalizar necessidade de intervenção quando estiver próximo de sua real quebra, porém possui um custo de implementação muito caro, principalmente quando se trata de preditivas online.

#### 1.1.2.3 Manutenção de Melhoria

Nessa manutenção, há apenas uma única atuação, onde o foco da atuação é eliminar a necessidade de manutenções posteriores, como por exemplo o bloqueio de um vazamento de óleo que elimina a necessidade de limpeza naquele conjunto. Como o gasto dessa manutenção é geralmente alto, essa manutenção normalmente é utilizada somente em casos onde há muita frequência de quebra, com difícil atuação e com grande impacto na linha de produção.

Boa parte dos equipamentos, máquinas e sistemas na atualidade tem como força motora um motor trifásico assíncrono, por isso a importância de entender seu funcionamento, ter conhecimento de dados técnicos do motor e compreender as limitações desse tipo de máquina para algumas aplicações (JUNIOR, 2011).

## 1.2 MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICO DE INDUÇÃO

Os motores elétricos são um dos atuadores mais utilizados atualmente na indústria. Dentre seus tipos, existem os de corrente contínua e os de corrente alternada. Os motores de corrente contínua possuem características bem robustas de controle de velocidade e torque, mas justamente sua construção e manutenção é mais cara, levando ele a não ser utilizado em aplicações mais genéricas, que são as mais comuns no ambiente industrial (JUNIOR, 2011). Um modelo popular da WEG é visto na Figura 2.

Figura 2 – Exemplo de motores indutivos da WEG, comumente utilizados na indústria.



Fonte: (WEG, 2018).

Motores de corrente alternada são divididos em duas categorias, os síncronos e assíncronos. Os motores síncronos são assim denominados pois o rotor (onde normalmente se encontra o enrolamento de campo fixo) gira na mesma frequência do fluxo magnético do estator (na maioria das vezes a armadura, onde se encontra o campo girante). Este giro em sincronismo (origem do nome) é causado por uma corrente contínua que circula no enrolamento do rotor, fazendo com que o motor síncrono também possua maior complexidade construtiva, acarretando em empecilhos similares ao do motor de corrente contínua. Por essa razão os motores síncronos são preferíveis em aplicações que é necessária uma potência mecânica mais elevada (UMANS, 2014).

Já o motor assíncrono apresenta maior simplicidade quando comparado com o motor de corrente contínua e com o motor síncrono. Ele não faz o uso de escovas e comutadores pois a corrente no rotor é induzida pelo campo girante do estator, fazendo com que seja conhecido também como motor de indução (JUNIOR, 2011).

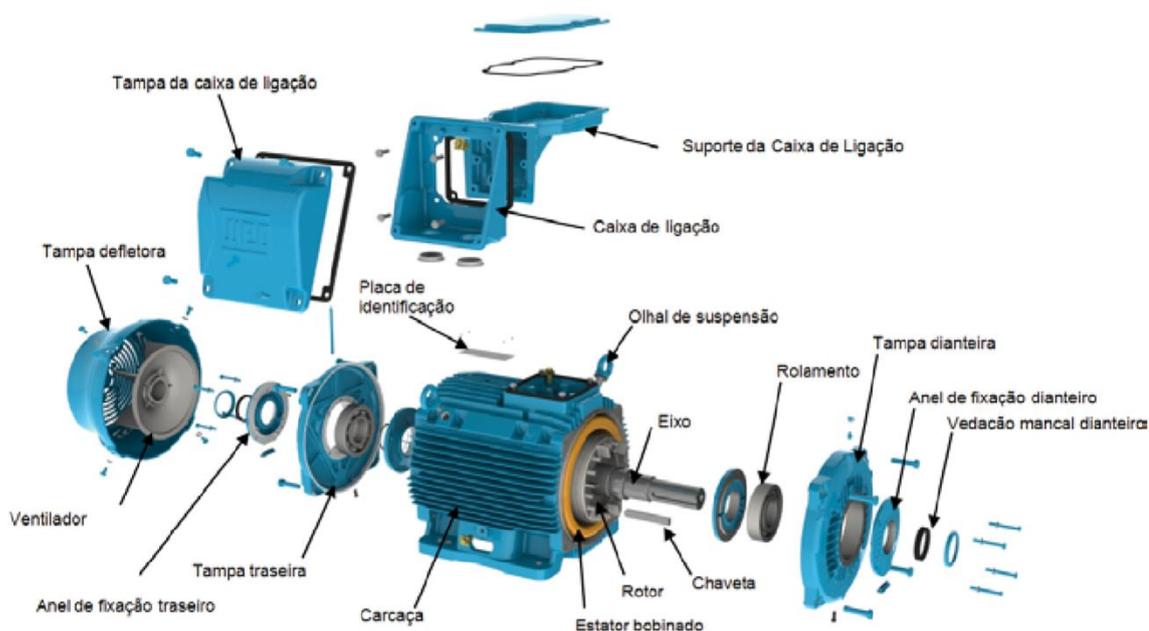
O motor de indução, diferentemente do motor síncrono, não gira na mesma velocidade que o campo girante, pois possui um escorregamento  $s$ , fazendo com que o rotor gire à uma velocidade levemente inferior à velocidade síncrona. Esta peculiaridade torna o controle de velocidade do motor de indução um pouco mais complexa em relação aos outros motores,

porém esse problema possui algumas soluções na eletrônica através de *soft-starters*, inversores de frequência etc.

### 1.2.1 Principais componentes de um motor

Assim como a maioria dos equipamentos, um motor elétrico indutivo pode ser dividido em vários conjuntos menores a fim de facilitar a análise do motor por um inteiro. Abaixo há uma visão explodido fornecida pela (WEG, 2018). Os principais conjuntos que será tratado aqui são os conjuntos que mais apresentam falhas e/ou possuem função vital para funcionamento do motor: estator, rotor, rolamentos, carcaça, caixa de ligação e tampa defletora, vistos na explosão da Figura 3.

Figura 3 – Visão explodida de um motor indutivo.



Fonte: (WEG, 2018).

#### 1.2.1.1 Estator

Como o nome indica, é a estrutura estática do motor. O estator é composto por um núcleo ferromagnético que contém ranhuras axiais internas onde são montados os enrolamentos, conforme mostrado na Figura 4. Estes enrolamentos são alimentados pela rede trifásica e são responsáveis por gerar o campo girante do motor, que irá oscilar de acordo com a frequência da rede e o número de polos por fase. Os enrolamentos são montados de forma a

ficarem afastados mecanicamente  $120^\circ$  um do outro, para se obter a equivalência mecânica da configuração trifásica, onde cada fase está defasada em  $120^\circ$  elétricos uma da outra.

Figura 4 – Visão de um Estator de um motor de indução.



Fonte: (SILVEIRA, 2017).

#### 1.2.1.2 Rotor

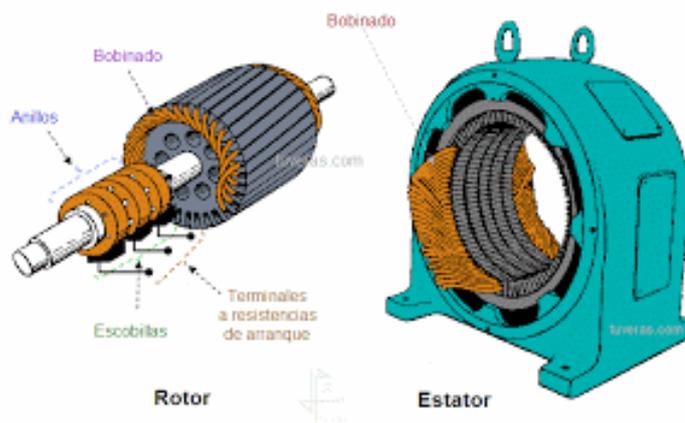
Nessa manutenção O rotor é a parte móvel do motor, que gira através da interação com o campo girante do estator. Os motores de indução apresentam basicamente dois tipos de diferentes de rotor: bobinado ou “gaiola de esquilo”, vistos na Figura 5 e Figura 6, respectivamente.

Figura 5 – Rotor do tipo bobinado.



Fonte: (STROSKI, 2017).

Figura 6 – Rotor do tipo gaiola de esquilo, junto com seu estator.



Fonte: (GOMES, 2016).

O rotor do tipo bobinado possui enrolamentos que são conectados a anéis coletores presentes no eixo, que por sua vez são conectados ao meio externo por escovas. Desta forma é possível monitorar e controlar o circuito do rotor, tornando possível a inserção de impedâncias nos enrolamentos do rotor para controlar a corrente de partida e produzir um torque mais suave.

O rotor do tipo gaiola de esquilo por sua vez é muito mais simples e robusto, tornando-se o tipo mais utilizado atualmente na indústria (UMANS, 2014). Sua estrutura é composta por barras condutoras dispostas de forma axial e curto-circuitadas nas extremidades por anéis condutores, ambos normalmente de alumínio fundido, que contribuem para o seu relativo baixo custo de fabricação. Também são utilizadas chapas ferromagnéticas laminadas e isoladas entre si e entre as barras para concentrar o fluxo magnético induzido no rotor. As barras são responsáveis por gerarem o campo induzido, que irá interagir com o campo girante, provocando a rotação do eixo.

### 1.2.1.3 Rolamentos

Mancais e rolamentos presentes nas extremidades do eixo do rotor são responsáveis por sustentar o rotor e proporcionar a possibilidade de giro livre, para fornecer potência mecânica na ponta do eixo. (BHADESHIA, 2011). Os rolamentos consistem em elementos rolantes (esferas, cilindros ou formas de cano) e anéis que formam as pistas. Sua função é manter contato de duas partes que se movimentam isoladamente de forma a ter o menor atrito possível. Alguns modelos comuns são mostrados na Figura 7.

Figura 7 – Tipos de rolamentos mais usuais.



Fonte: (ABECOM, s.d.)

#### 1.2.1.4 Carcaça

A carcaça compõe a estrutura mecânica externa do motor, normalmente de ferro fundido, e com aletas axiais na parte externa para melhorar a refrigeração do motor. E onde se encontra também a estrutura de base para a fixação do motor.

#### 1.2.1.5 Caixa de ligação

Um pequeno painel na parte externa do motor, onde se encontram os terminais para se realizar as ligações externas do motor, como a forma de ligação da alimentação (estrela ou triângulo) e/ou das bobinas. As ligações são normalmente feitas por porcas e arruelas de pressão com bornes anelares.

#### 1.2.1.6 Tampa defletora

É a peça que fica do lado da ponta oposta à de fornecimento de potência mecânica do motor. É responsável pela ventilação forçada do motor, e possui uma ventoinha que aproveita o próprio giro do eixo para gerar uma corrente de ar, que irá defletir na tampa, criando um fluxo de ar constante no estator, facilitando a refrigeração por dissipação de calor através do ar.

### 1.2.2 Princípio de funcionamento

No motor de indução trifásico, o estator é alimentado por uma fonte trifásica externa, criando fluxo magnético que se concentra no núcleo magnético do motor. O rotor, por sua vez não é alimentado por nenhuma fonte externa, tem seus enrolamentos atravessados pelas linhas de fluxo do estator, onde então são induzidas correntes através da Lei de Faraday como em um transformador (UMANS, 2014). Um esquema desse funcionamento é mostrado na Figura 8.

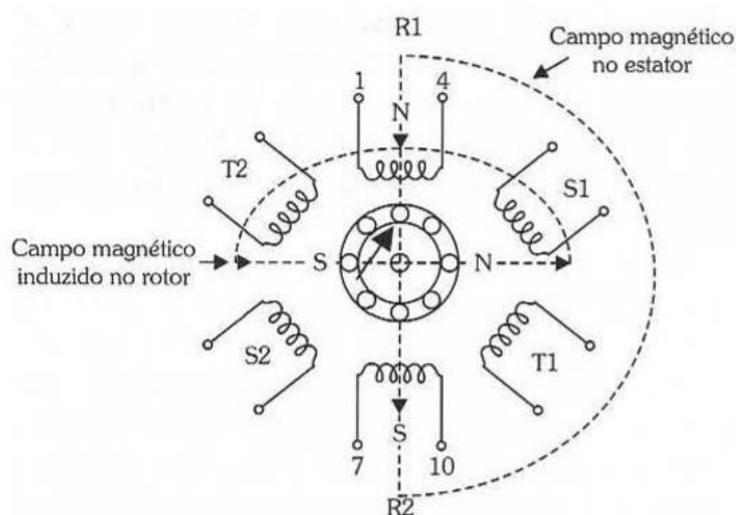
A corrente no rotor tende a ser contrária ao sentido do campo que lhe atravessa. Desta forma, surge um vetor campo magnético fixo (em relação ao rotor) que interage com o campo girante do estator, criando então o efeito de giro mecânico no eixo do motor.

A peculiaridade do motor de indução é que a velocidade de giro mecânica no eixo é sempre inferior à velocidade síncrona do campo no estator, o que o origina sua classificação como máquina assíncrona.

Embora o rotor opere de forma assíncrona, a onda de fluxo produzida pelas correntes induzidas no rotor gira em sincronismo com a onda de fluxo do estator. Isso é um requisito e está coerente com a capacidade de uma máquina de indução de produzir conjugado líquido. (UMANS, 2014).

Desta forma, admite-se que o torque em um motor de indução depende diretamente da diferença de velocidade entre o campo do estator e o giro do rotor.

Figura 8 – Configuração mecânica das bobinas do estator com o rotor.



Fonte: (JUNIOR, 2011).

### 1.3 FALHAS EM MOTORES ELÉTRICOS

Motores elétricos inicialmente possui proteções básicas de sobrecorrente, sobretensão e descarga, porém conforme a aplicação e construção dos motores progrediram sua complexidade, assim também se foi necessário o diagnóstico. Uma boa listagem de problemas comuns pode encurtar o tempo de máquina parada (NANDI, et al., 2005) :

- Falhas no estator resultando na abertura ou curto-circuito de um ou mais rolamentos de fase do estator;
- Conexões anormais dos enrolamentos do estator;
- Quebra de barras ou rachaduras nos anéis terminais do rotor;
- Folgas irregulares estatísticas e/ou dinâmicas no entreferro;
- Eixo desalinhado que pode resultar num atrito entre estator e o rotor;
- Curto-circuito da bobino do rotor;
- Falhas de engrenagens ou nos rolamentos.

Essas falhas podem ocasionar mudanças nos seguintes parâmetros de motores:

- Corrente e tensão desbalanceadas;
- Aumento das vibrações;
- Diminuição do torque médio;
- Perdas de energia;
- Aquecimento excessivo.

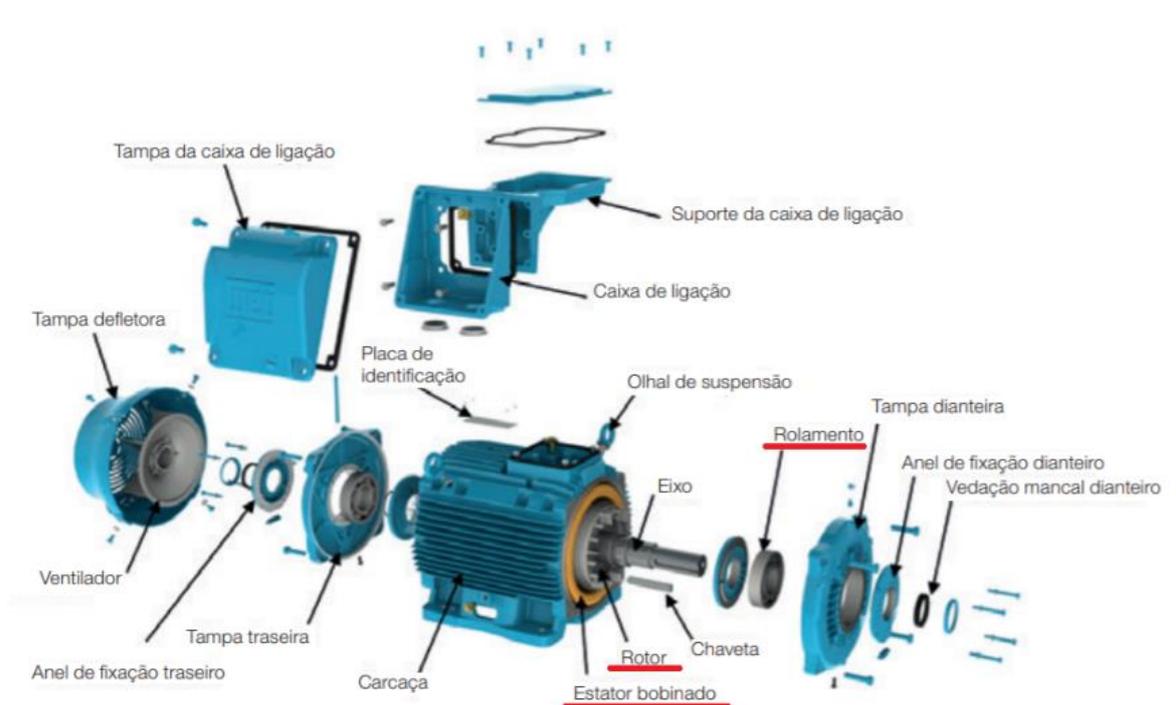
Para inspeção desses parâmetros, segundo (NANDI, et al., 2005), existem vários métodos de inspeção, que variam a forma a qual são medidos e a sua tecnologia:

- Medição de campo eletromagnético;
- Termografia;
- Leitura infravermelho;
- Monitoramento por RF;
- Medição de vibração;
- Medição de acústica;

- Análise química;
- Análise da corrente de assinatura do motor;
- Modelos baseados em inteligência artificial.

Em paralelo a isso, há a análise dividida pelos 3 principais componentes de um motor: Rolamento, Estator e Rotor, destacados na Figura 9. Essa forma de visualização é útil pois mais de 70% das falhas de um motor são no Rolamento ou Estator, nos permitindo priorizar atuações nesses 2 componentes. (REIS, 2010).

Figura 9 - Partes de um motor elétrico, destacando o Rotor, Estator e Rolamento.



Fonte: Adaptado de (WEG, 2018).

Uma descrição das principais falhas levantadas por (REIS, 2010) para cada um dos 3 componentes é listada em sequência.

### 1.3.1 Falhas nos rolamentos

A maioria dos motores usam rolamentos esféricos ou mancais, que são constituídos por 2 anéis e um conjunto de elementos girantes internamente entre eles. Naturalmente há desgaste desses elementos devido a fadiga, porém outros fatores como sujeiras (para os rolamentos não blindados) porém impedir a rotação do rolamento com suavidade.

As principais causas para problemas no rolamento, que podem ser observados numa análise de vibração, são:

- Lubrificação inadequada;
- Contaminação de corpos estranhos;
- Cargas em excesso;
- Vibração do ambiente;
- Desalinhamento de eixos;
- Defeitos na fabricação do material;
- Aplicação de modelos de rolamentos inadequados;
- Danos durante transporte ou manutenção do rolamento;

### **1.3.2 Falhas no Estator**

Cerca de 30% a 40% das falhas se devem a problemas no estator (REIS, 2010). Para essas anomalias, há mais dificuldade em se monitorar com preditivas convencionais, sendo necessário, para ter medições precisas, uma análise de campo elétrico. As principais causas para problemas no estator são:

- Sobreaquecimento;
- Erros de dimensionamento de projeto;
- Folga nas conexões entre enrolamentos;
- Contaminação do óleo;
- Curto-circuito;
- Descargas elétricas.

### **1.3.3 Falhas no Rotor**

Apenas 10% das causas de falhas em motores possui como causa alguma anomalia no rotor, devido ao aperfeiçoamento e robustez no processo de fabricação (REIS, 2010). Em geral, há poucas causas comuns de anomalias no rotor, sendo a mais comum:

- Quebra da articulação das barras/anéis.

## 1.4 ANÁLISES PREDITIVAS EM MOTORES ELÉTRICOS

Com objetivo de identificar as falhas que um motor pode apresentar, disponibiliza-se de várias técnicas de inspeções preditivas, as quais são classificadas em 2 grupos:

- **Inspeções invasivas:** são inspeções que necessitam atuar diretamente no equipamento, sendo necessário o tirar de seu funcionamento por um curto período. Elas são bem básicas, porém possuem o contra de terem custo de implementação muito alto;
- **Inspeções não invasivas:** são inspeções onde não há necessidade de remover o equipamento de seu funcionamento. Elas possuem o benefício de terem custo de implementação muito mais barato em relação as invasivas.

Embora haja prós e contras em ambas técnicas, (REIS, 2010) vê as técnicas não invasivas como mais promissoras, devido a custo e praticidade. Uma listagem com as principais técnicas de ambos grupos é dada abaixo:

- Análise de Vibração;
- Emissão Acústica;
- Análise de Pulsos de Choque;
- Medição de Velocidade de Rotação;
- Termografia;
- Medição de Campo Magnético;
- Análise Química;
- Assinatura Elétrica;
- Emissão de RF;
- Corrente e Tensão.

Durante desenvolvimento do presente trabalho, devido a realidade dos equipamentos da fábrica, será utilizado somente as técnicas de Vibração, Termografia, Corrente e Tensão, descritas a seguir.

### 1.4.1 Vibração

Análise de vibração estudada é através de um medidor de vibração digital, que permite

leitura instantânea da vibração, porém de forma *offline*. Para essa medição é necessário realizar a medição em mais de um ponto. Existem limites de vibração baseados na potência do motor. Essa análise possui como desvantagem a dificuldade de acesso a alguns tipos de motores. Uma das causas principais de vibrações excessivas tem como causa o desalinhamento de eixos, e pode gerar danos aos rolamentos. (COMMITTEE, 2006)

Figura 10 - Uso do medidor de vibração no equipamento

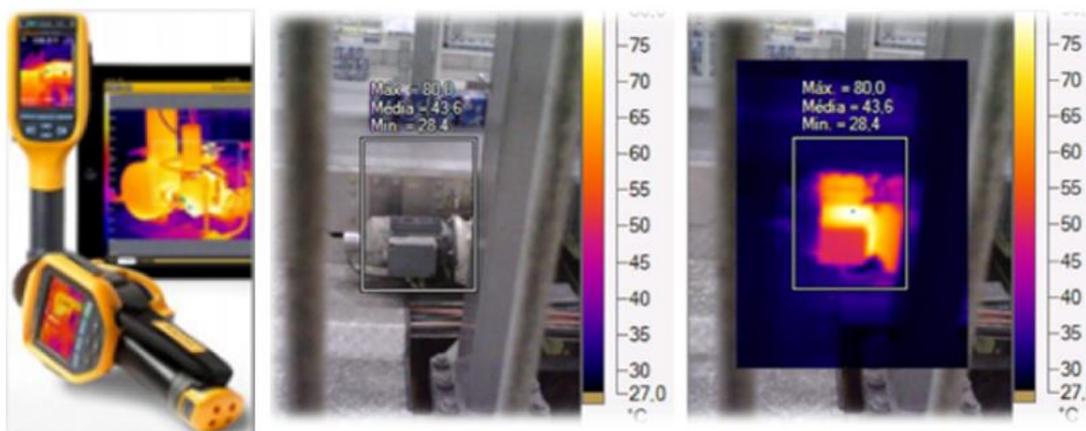


Fonte: (FLUKE, 2019);

#### 1.4.2 Termografia

Técnicas baseadas na imagem térmica têm ganhado popularidade nos últimos anos, sendo considerada uma técnica superior devido a não ser invasiva. (GLOWACZ & GLOWACZ, 2017). Ela permite primordialmente encontrar curtos circuitos e sobrecargas, porém possui a desvantagem de difícil acesso a alguns motores que possam estar internos na máquina.

Figura 11 – Exemplo de termografia sendo executada em campo.



Fonte: (RIBEIRO, 2017);

### 1.4.3 Corrente e Tensão

A medição de corrente e tensão do motor permite a imediata avaliação de sobrecarga, e desbalanceamento de fases. Como é uma técnica prática que envolve equipamento não tão custosos, seu uso é bem popular.

Figura 12 - Exemplo de medição de corrente



Fonte: (FLUKE, 2002);

O uso da técnica de assinatura de corrente é também comum em inspeções preditivas de motores elétricos trifásicos, analisando o domínio da frequência e procurando por variações nas componentes não fundamentais específica do motor. (SIDDIQUE, et al., 2005). Porém o uso e tal técnica requer um investimento relevante inicial, visto a aquisição e equipamentos e treinamentos iniciais.

## 1.5 FMEA - Análise dos Modos e Efeitos de Falha

A FMEA (Failure Mode and Effects Analysis ou Análise dos Modos e Efeitos de Falha) é uma técnica de confiabilidade que lista, classifica e padroniza todas as possíveis falhas de um equipamento, constando as causas, métodos de identificação e respectivas soluções.

É uma técnica de confiabilidade utilizada para auxiliar a criação e aplicação de planos de manutenção em um equipamento assim como padronizar uma rotina visando alcançar o melhor desempenho usando o menor recurso possível (IEC, 2006).

Conforme descrito por (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2011), os objetivos específicos da FMEA são:

- Reconhecer e avaliar as falhas potenciais que podem surgir em um produto ou processo;
- Identificar ações que possam eliminar ou reduzir a chance de ocorrência dessas falhas;
- Documentar o estudo, criando um referencial técnico que possa auxiliar em revisões e desenvolvimentos futuros do projeto ou processo

Embora seja ideal que uma FMEA seja criada junto com a inicialização do projeto, a metodologia já afirma que é um processo vivo que sempre irá estar em constante mudanças, sendo alimentada pelos conhecimentos adquiridos pela equipe técnica e operacional na rotina. (FORD, 2011). Dessa forma, implementar essa técnica após a inicialização do projeto da planta da fábrica não é um de forma alguma menos proveitosa ou efetiva.

A forma clássica de realizar a construção de uma FMEA, segundo (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2011), envolve os seguintes campos: Operação, Modo Potencial de Falha, Efeito, Causa, Controle de Prevenção, Controle de Detecção, Severidade, Ocorrência, Detecção, Risco e Ação Recomendada descritos seus conceitos e forma de obtenção abaixo.

### 1.5.1 Operação

Nesse campo são listados os objetos do equipamento analisado. A descrição correta das funções do item auxilia nas etapas subsequentes de identificação de falha, uma vez que as falhas estão associadas ao não cumprimento das funções especificadas. Geralmente é dividido esses itens por subconjunto ou componentes em sequência lógica do produto na máquina.

### 1.5.2 Modos potenciais de Falha

Neste momento inicia o trabalho técnico propriamente dito. Os participantes da equipe

analisam o primeiro item e indicam modos de falha potenciais. O modo potencial de falha é definido como a maneira com que um item pode falhar em atender aos requisitos do projeto. Devem ser listados todos os modos potenciais de falha pertinentes a cada item ou função. Qualquer modo de falha cuja probabilidade de ocorrência não for praticamente nula deve ser listado. A relação deve conter inclusive aqueles modos de falha que só ocorrem em certas situações (por exemplo, na condição de temperatura muito baixa ou terreno esburacado).

É importante entender que aquilo que está sendo indicado como modo potencial de falha do item em estudo pode ser a causa de um modo de falha em um subsistema de hierarquia superior ou o efeito de um modo de falha em um subsistema de hierarquia inferior. A questão do que é causa, modo de falha ou efeito fica esclarecida quando é definido o item que está sendo analisado. Por exemplo, a deformação da haste é modo de falha da haste (pode ser efeito de um problema no amortecedor e pode ser a causa do rompimento do garfo). A lista de modos potenciais de falha é construída com base na experiência da equipe, usualmente fruto da interação entre os participantes, conduzida em um ambiente de brainstorming, em que todos podem se manifestar. Como ponto de partida, pode-se usar aquilo que deu errado no passado, em aplicações similares. Adicionalmente, dados da assistência técnica e reclamação de clientes costumam ser fontes importantes de informação. Modos de falha típicos são: fissura, deformação, vazamento, curto-circuito, fratura, oxidação, afrouxamento etc. Os modos de falha devem ser descritos em termos técnicos (não em forma de voz do cliente), uma vez que serão analisados pela equipe técnica.

### **1.5.3 Efeito**

Os efeitos potenciais de falha são definidos como aqueles defeitos, resultantes dos modos de falha, conforme seriam percebidos pelo cliente. Em geral, a cada modo de falha corresponde um efeito. Contudo, pode haver exceções, em que um modo de falha provoca mais de um efeito. O efeito deve ser descrito em função daquilo que o cliente pode observar ou experimentar, lembrando que o cliente pode ser interno ou externo. Os efeitos devem ser estabelecidos em termos do item específico que está sendo analisado. Conforme mencionado, existe uma relação de hierarquia entre os componentes. Por exemplo, o componente 1 pode quebrar por fratura, o que vai causar afrouxamento no componente 2, resultando em operação intermitente do sistema. A operação intermitente significa uma queda de desempenho e leva à insatisfação do cliente. Se o foco do estudo é o componente 2, então afrouxamento é o modo de falha, e operação intermitente (percebida pelo usuário) é o efeito do modo de falha. Típicos

efeitos potenciais de falha são: ruído, aspecto desagradável, vibração, folga, operação intermitente, falta de operação, odor desagradável etc.

#### 1.5.4 Severidade

Os efeitos potenciais de falha são definidos como aqueles defeitos, resultantes dos modos de falha, conforme seriam percebidos pelo cliente. Em geral, a cada modo de falha corresponde um efeito. Contudo, pode haver exceções, em que um modo de falha provoca mais de um efeito. O efeito deve ser descrito em função daquilo que o cliente pode observar ou experimentar, lembrando que o cliente pode ser interno ou externo.

A severidade é medida por uma escala de 1 a 10, onde 1 significa efeito pouco severo e 10 significa efeito muito severo. A severidade aplica-se exclusivamente ao efeito. A equipe de FMEA deve chegar a um consenso a respeito do critério a ser utilizado e, então, usá-lo consistentemente. A *Tabela 1* apresenta uma proposta de quantificação da severidade.

Tabela 1 – Tabela de quantificação do valor de Severidade.

Severidade do efeito		Escala
Muito alta	Quando compromete a segurança da operação ou envolve infração	10
	a regulamentos governamentais	9
Alta	Quando provoca alta insatisfação do cliente, por exemplo, um veículo ou aparelho que não opera, sem comprometer a segurança	8
	ou implicar infração	7
Moderada	Quando provoca alguma insatisfação, devido à queda do desempenho ou mau funcionamento de partes do sistema	6
		5
Baixa	Quando provoca uma leve insatisfação, o cliente observa apenas uma leve deterioração ou queda no desempenho	4
		3
Mínima	Falha que afeta minimamente o desempenho do sistema, e a maioria dos clientes talvez nem mesmo note sua ocorrência	2
		1

Fonte: (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2011).

#### 1.5.5 Causa

Esta é uma das etapas mais importantes do estudo, na qual se busca identificar a raiz do problema. Vale observar que a FMEA se apoia no conhecimento da equipe, portanto, a qualidade análise é proporcional ao conhecimento acumulado pela equipe. Dois aspectos contribuem para a FMEA gerar resultados consistentes:

- O trabalho em equipe de diferentes áreas, que permite somar conhecimentos;
- O trabalho sistemático, que contribui para garantir que todos os elementos serão considerados.

A causa potencial de falha pode ser entendida como uma deficiência no projeto, cuja consequência é o modo de falha. Na medida do possível, devem ser listadas todas as causas/mecanismos de falha cuja probabilidade de ocorrência não seja praticamente nula.

É importante listar as causas/mecanismos de forma concisa e completa, de modo a facilitar os esforços de correção ou melhoria do projeto. Causas de falha típicas são: especificação incorreta de material, vida útil inadequada, sobrecarga, lubrificação insuficiente, proteção insuficiente ao ambiente, algoritmo incompleto ou incorreto etc. Enquanto mecanismos de falha típicos, podem ser citados: fadiga, escoamento, instabilidade elástica, deformação lenta, desgaste, corrosão, fusão etc.

### 1.5.6 Ocorrência

A ocorrência relaciona-se com a probabilidade que uma causa ou mecanismo listado anteriormente venha a ocorrer. Em geral, para reduzir a probabilidade de ocorrência da causa ou mecanismo, é necessário que se façam alterações no projeto. A avaliação da ocorrência também é feita usando-se uma escala qualitativa de 1 a 10. O critério usado na definição da escala deve ser consistente, para assegurar continuidade nos estudos. A escala relaciona-se com a taxa de falha, mas não é diretamente proporcional a esta última. A *Tabela 2* apresenta o critério de avaliação sugerido.

Tabela 2 – Tabela de quantificação do valor de Ocorrência.

Ocorrência de falha	Taxa de falha	Escala	
Muito alta	Falhas quase inevitáveis	100/1000	10
		50/1000	9
Alta	Falhas ocorrem com frequência	20/1000	8
		10/1000	7
Moderada	Falhas ocasionais	5/1000	6
		2/1000	5
		1/1000	4
Baixa	Falhas raramente ocorrem	0,5/1000	3
		0,1/1000	2
Mínima	Falhas muito improváveis	0,01/1000	1

Fonte: (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2011)

### 1.5.7 Controle de Prevenção

Nesta etapa, a equipe deve listar as atividades de validação, verificação ou prevenção que estão planejadas. Devem ser consideradas as atividades que podem assegurar a robustez do projeto ao modo de falha ou a causa de falha em análise.

Os controles atuais são aqueles que foram ou estão sendo aplicados a projetos similares. Controles usuais envolvem estudos matemáticos, estudos de laboratório, testes com protótipos, revisões formais de projeto etc. As escalas para ocorrência e detecção devem ser baseadas nesses controles, dado que os modelos ou protótipos em uso sejam representativos do projeto.

### 1.5.8 Controle de Detecção

Os efeitos potenciais de falha são definidos como aqueles defeitos, resultantes dos modos de falha, conforme seriam percebidos pelo cliente. Em geral, a cada modo de falha corresponde um efeito. Contudo, pode haver exceções, em que um modo de falha provoca mais de um efeito. O efeito deve

### 1.5.9 Detecção

A detecção refere-se a uma estimativa da habilidade dos controles atuais em detectar causas ou modos potenciais de falha antes de o componente ou subsistema ser liberado para produção. Também é usada uma escala qualitativa de 1 a 10, onde 1 representa uma situação favorável (modo de falha será detectado) e 10 representa uma situação desfavorável (modo de falha, caso existente, não será detectado).

Para reduzir a pontuação, é necessário melhorar o programa de validação/ verificação do projeto (PVP). Como sempre, o critério de avaliação deve ser definido por consenso e, então, utilizado com consistência. Sugere-se a utilização do critério apresentado na *Tabela 3*.

Tabela 3 - Tabela de quantificação do valor de Detecção.

Possibilidade de detecção		Escala
Muito Remota	O PVP não irá detectar esse modo de falha, ou não existe PVP	10
Remota	O PVP provavelmente não irá detectar esse modo de falha	9
		8
Baixa	Há uma baixa probabilidade de o PVP detectar o modo de falha	7
		6
Moderada	O PVP pode detectar o modo de falha	5
		4
Alta	Há uma alta probabilidade de o PVP detectar o modo de falha	3
		2
Muito Alta	É quase certo que o PVP irá detectar esse modo de falha	1

Fonte: (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2011)

### 1.5.10 Risco

O risco (R) é calculado para priorizar as ações de correção e melhoria do projeto. No cálculo do risco leva-se em conta a severidade, ocorrência e detecção. A fórmula em geral empregada para a avaliação do risco é a multiplicação simples desses três itens, conforme segue:

$$R = S \times O \times D \quad (1)$$

Esse número é o mais importante da Tabela FMEA, sendo ele que vai informar o quanto de atenção deve ser dedicada para aquele modo de falha específico. Não existe um número fixo a qual o Risco deva ser tratado, dependendo do projeto e da avaliação técnica dos envolvidos (FORD, 2011).

O objetivo é reduzir o risco ao máximo, para isso deve ser reduzido qualquer uma das 3 parcelas do produto, seja através de planos de manutenção para melhorar a Detecção ou melhorias de engenharia para reduzir a Ocorrência e a Severidade.

Nesse trabalho será utilizado o conceito do Risco apenas para existir uma priorização técnica na investigação do problema, visto que os planos de manutenção e melhorias cabíveis já foram implementados na medida do possível.

### 1.5.11 Ação Recomendada

As ações recomendadas devem se dirigir aos itens com maior risco. As ações recomendadas devem ser de tal natureza que reduzam a severidade do efeito, a probabilidade de ocorrência ou a probabilidade de não-detecção.

Alterações no projeto podem reduzir a severidade do efeito ou a probabilidade de ocorrência do modo de falha, enquanto ações dirigidas às etapas de verificação/ validação do projeto, em geral, podem reduzir somente a probabilidade de não detecção da causa ou modo de falha.

As ações recomendadas podem contemplar revisão do desenho de partes do projeto, revisão de especificações de materiais, revisão de planos de teste, uso de Projeto de experimentos para otimizar parâmetros do projeto, especialmente quando múltiplas causas iterativas estão presentes.

### **1.5.12 Exemplo de FMEA**

Como exemplo de FMEA, é mostrada a Tabela 4, tratando de um caso hipotético em um contexto de uma fábrica têxtil.

Tabela 4 – Exemplo de uma tabela de FMEA para um caso hipotético em um contexto de uma fábrica têxtil.

(2)	(3)	(4)	(5)	(7)	(8)	(9)	(9)	10	(11)	(12)
Operação / Propósito	Modo potencial de falha	Efeito	S	Causa	O	Controles de prevenção	Controles de detecção	D	R	Ação recomendada
Inspeccionar matéria-prima	Aprovar matéria-prima fora da especificação	Dificuldade de confecção	6	Procedimento de inspeção mal redigido	3		Revisão gerencial dos procedimentos	2	36	
			6	Descuido do inspetor	4	Treinamento dos inspetores	Plano de amostragem	3	72	
Infestar tecido	Dobra ou desalinhamento entre camadas	Peças com dimensões erradas, retrabalho	8	Descuido do operador	3	Treinamento dos operadores	Inspeção visual	3	72	
Cortar infesto	Corte desalinhado	Má aparência do produto final	8	Falta de recursos na máquina de corte	7	Dispositivo luminoso da máquina	Inspeção visual	4	224	Melhorar a bancada da máquina de corte, acrescentar recursos de posicionamento e alinhamento
Identificar partes	Falta de identificação ou erro na identificação	Perda de tempo ou retrabalho	6	Descuido do operador	7	Treinamento dos operadores	Inspeção visual	7	294	Redefinir os procedimentos de identificação, instalar sistema a prova de erros
Posicionar e aderir colante	Posicionamento errado	Perda de tempo ou retrabalho	6	Identificação errada da parte	2		Inspeção visual	3	36	
	Falta de aderência	Retrabalho	6	Pouco aquecimento da máquina	1	Treinamento dos operadores	Inspeção visual	3	18	
Costurar	Costura faltando	Retrabalho, má aparência	8	Descuido do operador	4	Pausas programadas	Inspeção visual	4	128	Promover melhorias ergonômicas nos postos de costura, redefinir programa de pausas
	Costura mal feita	Má aparência do produto final	8	Falta de habilidade	3	Treinamento dos operadores	Inspeção visual	2	48	
Passar	Mal passado	Dobras visíveis, má aparência	8	Descuido do operador	3	Treinamento dos operadores	Inspeção visual	2	48	
	Passado em excesso	Queima o tecido, má aparência	10	Erro na regulagem da máquina	1	Termostato	Inspeção visual	2	20	

Fonte: (FOGLIATTO &amp; RIBEIRO, 2011).

## 2 METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO

O trabalho consiste em uma pesquisa aplicada, e tem como objetivo uma pesquisa descritiva sobre o material bibliográfico, assim como validações em campo, numa amostragem de uma fábrica de prensagem metálica, dessa forma os dados serão obtidos tanto por bibliografias anteriores quanto por atuação em campo, unindo o conhecimento já bem enraizado na bibliografia quanto o conhecimento prático para as máquinas e ambiente específicos de aplicação.

Será levantado o máximo de informações sobre falhas, causas e soluções de parâmetros elétricos de motores que atendem a necessidade da fábrica em questão, que vai de motores de pequeno a médio porte.

O método consiste numa variação da metodologia FMEA, utilizando o mesmo conceito de tabelamento de falhas, porém sem todos os campos levantado por (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2011).

Após levantamento dessas informações será validado em campo com atuações técnicas reais e estudada a real aplicação do procedimento na manutenção diária da fábrica.

No geral, o trabalho divide-se em 5 grandes etapas:

- Listagem de principais anomalias (via bibliografia e via prática);
- Listagem de faixas de valores aceitáveis de parâmetros elétricos para respectivas anomalias;
- Listagem das principais causas para cada respectiva anomalia;
- Quantificação da probabilidade de ocorrência de cada falha e a facilidade em sua identificação;
- Check em campo para validação prática da listagem completa.

Durante todo o trabalho, procura-se sempre criar um material com clareza e assertividade visto que esse material será na prática utilizado por técnicos elétricos que podem ter variação no seu desempenho se houver muita complexidade envolvida durante suas análises.

Também será mantido em foco um equilíbrio entre quantidade de informações e assertividade, visto que se deseja que esse trabalho possa ser o mais amplo possível para expansão na sua utilização quanto também seja prático na utilização os técnicos da fábrica usada como amostra.

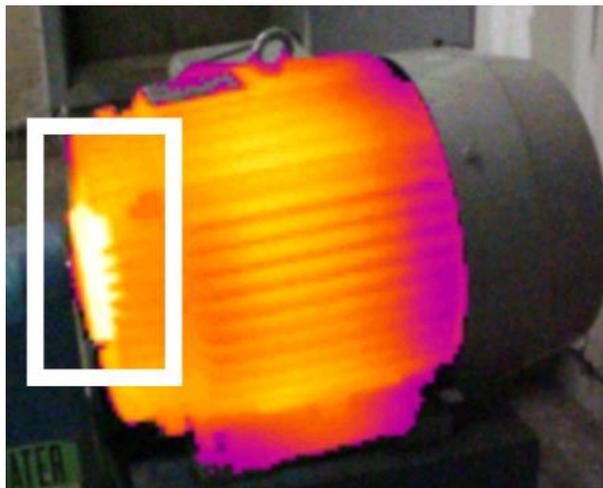
Para tabelamento das causas de falhas e análise dos parâmetros de preditiva, foi realizado o estudo isoladamente para cada modo de preditiva, sendo posteriormente compilado e apresentado como resultado.

## 2.1 TERMOGRAFIA

A NBR-15572 (ABNT, 2012) consta o procedimento de medição de temperatura para diferentes classe de motores. Nele é constatado a medição de temperatura em 3 lugares principais dos motores: o rolamento, no estator e no redutor, conforme Figuras 13,14 e 15, respectivamente.

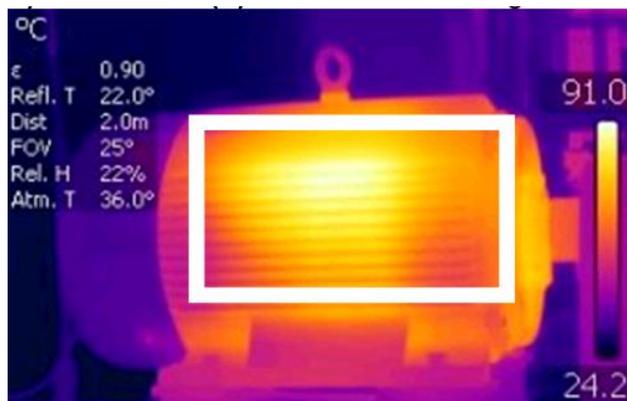
A temperatura ideal de um motor é de 40°C, porém existem valores acima que o motor pode trabalhar dependendo do contexto operacional.

Figura 13 – Termografia no rolamento dianteiro.



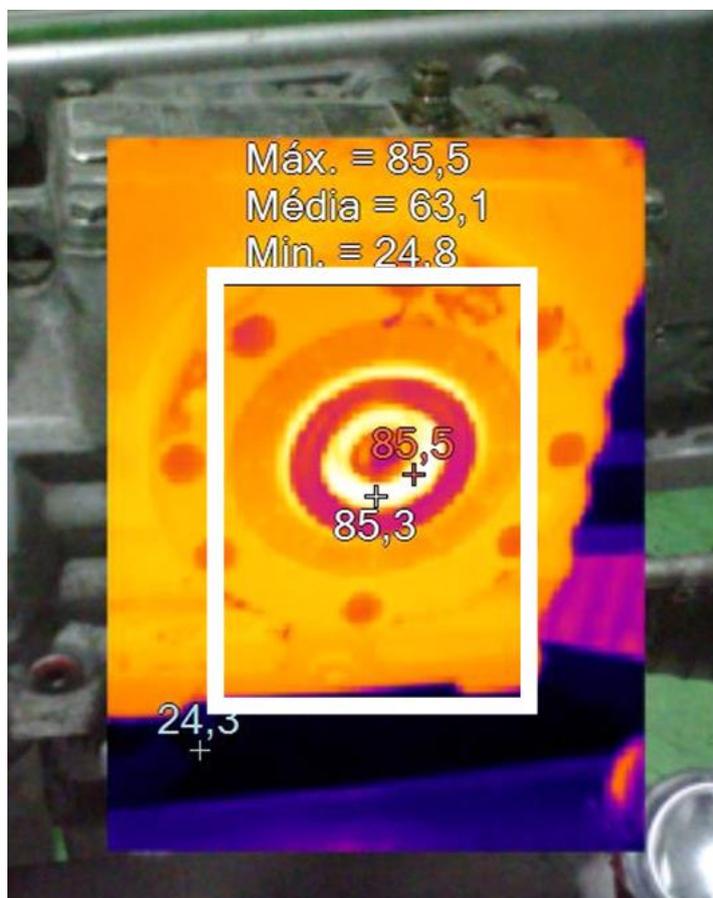
Fonte: Própria.

Figura 14 - Termografia no estator.



Fonte: Própria.

Figura 15 - Termografia no redutor acoplado ao motor.



Fonte: Própria.

Ele também varia a temperatura máxima aceitável para cada um desses pontos, podendo chegar a 80°C no redutor e a 90° no estator e no rolamento. Esse é o ponto crítico,

onde há certeza absoluta que há alguma anomalia a ser tratada e a expectativa é que o motor apresente algum defeito no seu funcionamento num quadro breve.

Para efeitos de previsibilidade de falha, utiliza-se um valor abaixo da temperatura máxima para haver tempo hábil de atuação e correção da anomalia. Esse valor foi considerado baseando-se no período que haverá a atuação e qual ponto está sobreaquecido:

- Rolamento dianteiro: a partir de 70°C;
- Estator: a partir de 50°C deve haver análise e a partir de 70°C já deve ser uma atuação obrigatória;
- Redutor: a partir de 50°C deve haver análise e a partir de 60°C já deve ser uma atuação obrigatória.

Os modos de falha levantados para cada um desses sobreaquecimentos são brevemente discutidos por (ABNT, 2012), sendo necessário uma atuação em campo profissional conforme metodologia da análise FMEA.

A equipe técnica responsável pelo *brainstorm* de modos de falhas foi composta de técnicos mecânicos, técnicos elétricos, técnicos de automação, operadores elites (com amplo tempo de casa) e seus respectivos supervisores de mecânica, elétrica e automação.

Alguns dos modos de falha levantados para problemas de sobreaquecimento:

- Deficiência de Lubrificação;
  - Excesso de Lubrificante (nível alto);
  - Falta de Lubrificante (nível baixo);
  - Viscosidade do lubrificante errada;
  - Lubrificante contaminado com água, sujidades, etc;
  - Lubrificante misturado (óleo mineral com sintético);
  - Lubrificante envelhecido por alta temperatura;
  - Lubrificante em final de vida útil;
- Montagem inadequada (contaminação/sujeira ou impacto na montagem do rolamento);
- Eixo empenado;
- Folga nos mancais dos rolamentos;
- Desequilíbrio de tensão ou corrente elétrica;
- Sobrecarga (defeito no redutor, acoplamento, polia etc);
- Folga na fixação / falta de parafusos / falta de pé;

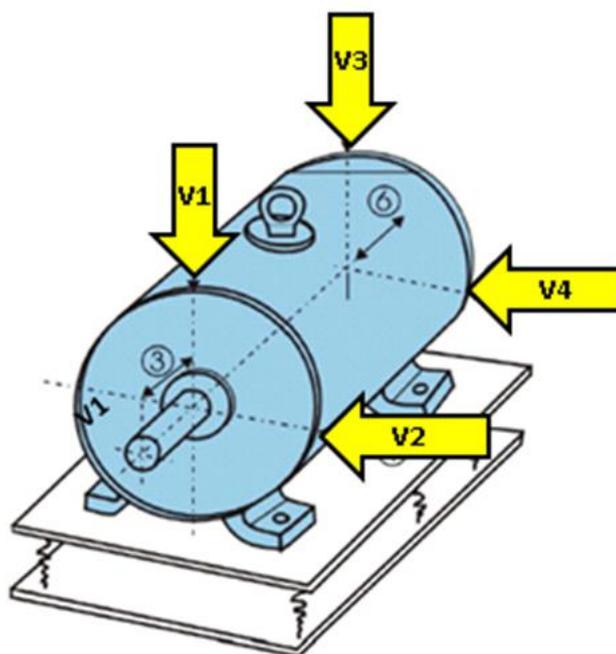
- Baixa isolamento no bobinamento (umidade, picos de tensão);
- Folga no estator;
- Ventilação deficiente ou obstruída / Falta da tampa defletora;
- Contaminação interna (lubrificante do redutor, por exemplo);
- Barras internas quebradas ou trincadas;
- Desalinhamento interno / folga nos mancais;
- Desbalanceamento (perda ou adição de massa, ventoinha);
- Curto circuito no ferro ou bobinas (verniz trincado);
- Sujidade externa acumulada no estator;
- Freio desregulado / ajuste deficiente das molas;
- Pé da estrutura desalinhado;
- Pé da estrutura faltando;
- Pé da estrutura solto;
- Mão francesa da estrutura solta;
- Corrente mal tensionada;
- Sujeira acumulado no eixo de tração;
- Desgaste na esteira;
- Desgaste mecânico das engrenagens;

Todos esses modos de falhas terão sua análise de Ocorrência e Detecção posteriormente avaliadas.

## 2.2 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

A ISO 10816-3 (ISO, 1998) trata sobre a inspeção de análise de vibração de diferentes portes de motores também. O método descrito e o que será utilizado contempla a medição de vibração global baseada em 4 pontos do motor: 2 na carcaça superior (1 em cada extremidade) e 2 na lateral da carcaça (1 em cada extremidade), conforme representação na Figura 16. Dessa forma é possível contemplar vibrações excedentes que ocorrem em um ponto específico do motor. Qualquer valor desses 4 que não obedeça ao tabelamento, pode indicar uma futura falha no motor.

Figura 16 – Pontos de análise de vibração do motor.



Fonte: Adaptado de (ISO, 1998)

Nesse momento a ISO varia o valor de vibração (em  $mm/s$ ) aceitável baseando no local de instalação do motor (base de concreto rígida ou base de metal flexível) e na potência do motor (menor que 20 CV, 100 CV ou mais).

Os valores tabelados na ISO são:

- Motores menores de 20 CV (14,7 kW): acima de 1,8mm/s já deve haver análise. Acima de 4,5mm/s o motor já apresenta problema e deve ter atuação imediata;
- Motores entre 20 CV (14,7 kW) e 100 CV (73,55 kW): acima de 2,8mm/s já deve haver análise. Acima de 7,1mm/s o motor já apresenta problema e deve ter atuação imediata;
- Motores acima de 100 CV (73,55kW) instalados em base rígida de concreto: acima de 4,5mm/s já deve haver análise. Acima de 11,2mm/s o motor já apresenta problema e deve ter atuação imediata;
- Motores acima de 100 CV (73,55kW) instalados em flexível de metal: acima de 7,1mm/s já deve haver análise. Acima de 18mm/s o motor já apresenta problema e deve ter atuação imediata.

Os modos de falhas que podem levar a essa vibração excedente no motor são pouco descritos na ISO, sendo necessário recorrer a bibliografia de terceiros como (COMMITTEE,

2006) e a própria análise técnica em campo.

Os modos de falha levantados são:

- Mancais (deficiência de lubrificação que causa excentricidade permanente, que deslocará o rotor dentro do estator, normalmente aumentando a temperatura);
- Desalinhamento (paralelo, angular, combinada);
- Eixo torto ou empenado (devido sobrecargas mecânicas ou altos aquecimentos);
- Desbalanceamento (desequilíbrio de massa em relação aos eixos de rotação);
- Folga mecânica (parafusos frouxos, folgas excessivas nos mancais);
- Ventilação (quebra das ventoinhas internas e externas);
- Truncamento (caso de desalinhamentos mais severos, gerando fortes vibrações).

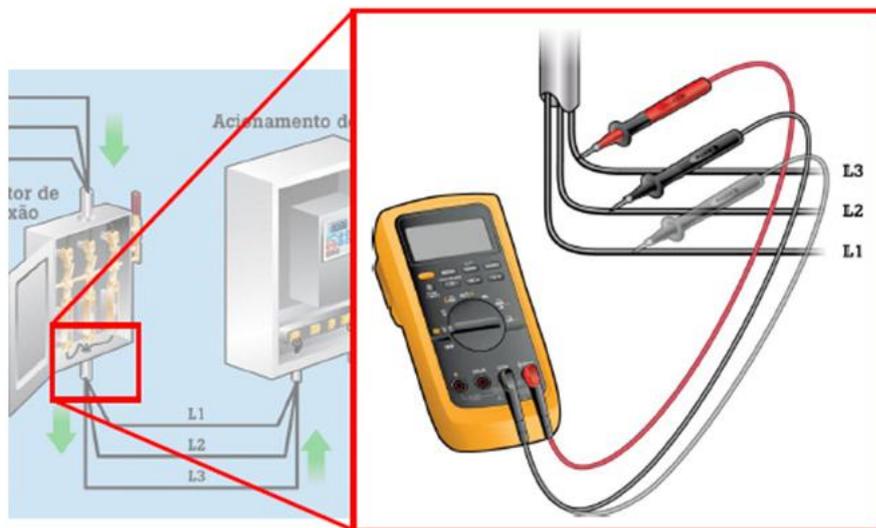
Todos esses modos de falhas terão sua análise de Ocorrência e Detecção posteriormente avaliadas.

### 2.3 ANÁLISE DE TENSÃO

Para essa análise, há avaliação do valor das tensões em cada fase do motor, conforme documentado pela NBR 5410 (ABNT, 2008), não podendo variar mais de 5% para cada tensão. Também é avaliado junto se há algum desbalanceamento crítico entre os valores dessas tensões entre si. Nessa mesma norma, há uma padronização de aceitação de, no máximo, desvio de 2% na tensão.

O método propõe a medição da tensão em cada uma das combinações fase-fase: L1-L2, L2-L3, L1-L3, conforme Figura 17.

Figura 17 – Medição de tensão no painel do motor.



Fonte: Própria.

Considerando uma rede trifásica de 380V, isso implica nas seguintes condições que cada tensão não pode estar fora da faixa 361V e 399V.

Além disso é necessário constatar se há algum desbalanceamento entre as tensões de cada fase, através da seguinte fórmula.

$$T_m = \frac{L1 * L2 + L2 * L3 + L1 * L3}{3} \quad (2)$$

Esse valor  $T_m$  corresponde à média da tensão das fases. Deve-se, em seguida, utilizar o maior valor de tensão lido ( $L1L2$ ,  $L2L3$  ou  $L1L3$ ) e subtrair de  $T_m$ . Em seguida essa diferença deve ser dividida pela média para encontrar a % de desequilíbrio, que não deve ultrapassar 2%, conforme (ABNT, 2008). Uma forma de representar a equação descrita é:

$$Desequilíbrio = \frac{\max(L1L2, L2L3, L1L3) - T_m}{T_m} \quad (3)$$

Dessa forma, os parâmetros devem ser analisados da seguinte forma:

- $L1L2, L2L3, L1L3 > 399V$ : Deve ser feita análise da qualidade de energia;
- $L1L2, L2L3, L1L3 < 361V$ : Deve ser feita análise da qualidade de energia;

- Desequilíbrio > 2%: Deve ser feita análise da qualidade de energia.

Os modos de falha, levantados na análise de qualidade de energia não são explorados pela (ABNT, 2008), sendo necessária análise técnica em campo:

- Aumento de tensão nos potenciais de aterramento;
- Circuito de aterramento conectado ao neutro do painel;
- Curto entre espiras em transformadores ou em geradores;
- Cabos com diâmetro inferior ao necessário;
- Sobretensão induzida ou capacitiva nos condutores;
- Defeito nos enrolamentos dos trafos de distribuição;
- Defeito nos reguladores de tensão;
- Defeito em banco de capacitores por conta da injeção de energia reativa desequilibrada;
- Cargas monofásicas não equilibradas entre as fases, proporcionando consumos de corrente desequilibradas;
- Comutação de grandes cargas (fornos, por exemplo);
- Deficiência no aterramento dos trafos.

Todos esses modos de falhas terão sua análise de Ocorrência e Detecção posteriormente avaliadas.

## 2.4 ANÁLISE DE CORRENTE

De forma semelhante à análise de tensão, é aplicada análise de corrente. A única diferença é que se recomenda se guiar pela corrente nominal do motor, correlacionando a corrente real sendo maior que a nominal com a possível queima do motor, visto toda construção interna do motor ter sido projetada para a corrente nominal. Visualização da medição pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 – Medição de corrente com o alicate amperímetro.



Fonte: (FLUKE, s.d.).

O desbalanceamento entre as correntes de cada fase, através da seguinte fórmula.

$$I_m = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \quad (4)$$

Esse valor  $I_m$  corresponde à média da corrente das fases. Deve-se, em seguida, utilizar o maior valor de corrente lido ( $I_1$ ,  $I_2$  ou  $I_3$ ) e subtrair de  $I_m$ . Em seguida essa diferença deve ser dividida pela média para encontrar a % de desequilíbrio, que não deve ultrapassar 6%, conforme (ABNT, 2008). Uma forma de representar a equação acima é:

$$Desequilíbrio = \frac{\max(I_1, I_2, I_3) - I_m}{I_m} \quad (5)$$

Dessa forma, os parâmetros devem ser analisados da seguinte forma:

- $I_1$ ,  $I_2$  ou  $I_3 >$  Corrente nominal: Deve ser feita análise da qualidade de energia;
- Desequilíbrio  $>$  6%: Deve ser feita análise da qualidade de energia.

Os modos de falha, levantados na análise de qualidade de energia não são explorados pela (ABNT, 2008), sendo necessário análise técnica em campo:

- Tensão acima do especificado;
- Defeitos nos rolamentos;

- Defeitos no estator do motor;
- Defeitos no redutor (ou outros tipos de acoplamentos);
- Desequilíbrio de tensão entre fases;
- Curto circuito entre espiras do bobinamento (verniz trincado devido altas temperaturas ou excesso de vibração);
- Início de baixa isolamento entre espiras e a carcaça (contaminação interna, materiais isolantes danificados por excesso de picos de tensão).

Todos esses modos de falhas terão sua análise de Ocorrência e Detecção posteriormente avaliadas.

## 2.5 A TABELA FMEA

Sendo o objetivo principal desse trabalho, é montado a tabela de Análise de Modos e Efeitos de Falha, considerando todos os levantamentos de modos de falhas anteriores.

Como (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2011) menciona, o método FMEA é muito versátil, podendo ter sua utilização ser adaptada em vários cenários. Para essa aplicação específica, foram utilizadas as primeiras colunas não como identificação de componentes ou subconjuntos, mas diretamente como a faixa de trabalho das medições.

Duas colunas que se mantiveram foram a coluna de Ocorrência, para se estimar a frequência que aquele problema ocorre, e a de Detecção, para se estimar a facilidade do técnico em identificar se a anomalia é devida aquela causa especificamente.

Manteve-se também a informação de Risco, mantendo o mesmo conceito de produto dos dois números anteriores. Dessa forma o técnico pode priorizar sua investigação baseando-se nas causas com maiores riscos.

### 3 RESULTADOS

O levantamento realizado pelo estudo foi aplicado e desdobrados para técnicos da fábrica foco, conforme Figura 19, onde mostra a execução de um técnico. A tabela FMEA foi criada conforme Tabela 5 e Tabela 6, sendo posteriormente disponibilizada de forma procedimentada no plano de treinamento dos técnicos eletricitas, conforme Figura 20.

Figura 19 – Técnico realizando análise da caixa de vedação de uns dos motores do equipamento.



Fonte: Própria.

Tabela 5 - Tabela FMEA das análises preditivas do trabalho (parte 1).

Técnica	Localização	Limite p/ atuação em 1 mês	Limite p/ atuação em 1 semana	Limite p/ atuação imediata	Causa	Ocorrência	Deteccção	Risco
Termografia	Rolamento Dianteiro	-	>=70°C	>=90°C	Deficiência de Lubrificação	6	5	30
					Montagem inadequada (contaminação/sujeira ou impacto na montagem do rolamento)	6	5	30
					Eixo empenado	4	5	20
					Folga nos mancais dos rolamentos	3	4	12
	Estator	>=50°C	>=70°C	>=90°C	Desequilíbrio de tensão ou corrente elétrica	4	6	24
					Sobrecarga (defeito no redutor, acoplamento, polia etc)	5	3	15
					Folga na fixação / falta de parafusos / falta de pé	5	3	15
					Baixa isolamento no bobinamento (umidade, picos de tensão)	5	3	15
					Folga no estator	4	3	12
					Ventilação deficiente ou obstruída / Falta da tampa defletora	2	6	12
					Contaminação interna (lubrificante do redutor, por exemplo)	3	3	9
					Barras internas quebradas ou trincadas	3	3	9
					Desalinhamento interno / folga nos mancais	3	3	9
					Desbalanceamento (perda ou adição de massa, ventoinha)	3	3	9
					Curto circuito no ferro ou bobinas (verniz trincado)	3	3	9
					Sujidade externa acumulada no estator	3	3	9
					Freio desregulado / ajuste deficiente das molas	2	3	6
	Redutor	>=50°C	>=60°C	>=80°C	Deficiência de Lubrificação	7	5	35
					Problemas nos rolamentos	5	5	25
					Eixo de tração empenado provocando esforço anormal	4	5	20
					Pé da estrutura desalinhado	5	4	20
					Pé da estrutura faltando	5	4	20
					Pé da estrutura solto	4	5	20
					Mão francesa da estrutura solta	3	5	15
					Corrente mal tensionada	3	5	15
					Sujeira acumulado no eixo de tração	4	3	12
					Folga nos mancais dos rolamentos	3	3	9
Desgaste na esteira	3	3	9					
Desgaste mecânico das engrenagens	3	3	9					

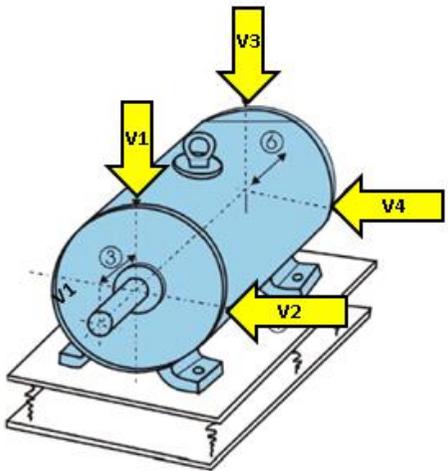
Fonte: Própria.

Tabela 6 - Tabela FMEA das análises preditivas do trabalho (parte 2).

Técnica	Localização	Limite p/ atuação em 1 mês	Limite p/ atuação em 1 semana	Limite p/ atuação imediata	Causa	Ocorrência	Deteção	Risco	
Vibração	-	>=1,8mm/s (<20CV) >=2,8mm/s (<100CV) >=4,5mm/s (>100CV rígido) >=7,1mm/s (>100CV flexível)	-	>=4,5mm/s (<20CV) >=7,1mm/s (<100CV) >=11,2mm/s (>100CV rígido) >=18mm/s (>100CV flexível)	Mancais (deficiência de lubrificação que causa excentricidade permanente, que deslocará o rotor dentro do estator, normalmente aumentando a temperatura)	7	3	<b>21</b>	
					Desalinhamento (paralelo, angular, combinada)	4	4	<b>16</b>	
					Eixo torto ou empenado (devido sobrecargas mecânicas ou altos aquecimentos)	3	5	<b>15</b>	
					Desbalanceamento (desequilíbrio de massa em relação aos eixos de rotação)	4	3	<b>12</b>	
					Folga mecânica (parafusos frouxos, folgas excessivas nos mancais)	3	4	<b>12</b>	
					Ventilação (quebra das ventoinhas internas e externas)	2	5	<b>10</b>	
					Truncamento (caso de desalinhamentos mais severos, gerando fortes vibrações)	2	3	<b>6</b>	
Medição de Tensão por fase	-	Valor de Tensão >399V ou <361V ou Desequilíbrio de Tensão >2%	-	-	Aumento de tensão nos potenciais de aterramento	3	4	<b>12</b>	
					Circuito de aterramento conectado ao neutro do painel	2	5	<b>10</b>	
					Curto entre espiras em transformadores ou em geradores	3	3	<b>9</b>	
					Cabos com diâmetro inferior ao necessário	2	4	<b>8</b>	
					Sobretensão induzida ou capacitiva nos condutores	2	3	<b>6</b>	
					Defeito nos enrolamentos dos trafos de distribuição	3	2	<b>6</b>	
					Defeito nos reguladores de tensão	2	3	<b>6</b>	
					Defeito em banco de capacitores por conta da injeção de energia reativa desequilibrada	2	3	<b>6</b>	
					Cargas monofásicas não equilibradas entre as fases, proporcionando consumos de corrente desequilibradas	2	3	<b>6</b>	
					Comutação de grandes cargas (fornos, por exemplo)	2	2	<b>4</b>	
Deficiência no aterramento dos trafos	2	2	<b>4</b>						
Medição de Corrente por fase	-	Valor > Valor nominal	-	-	Tensão acima do especificado	3	5	<b>15</b>	
					Defeitos nos rolamentos	4	3	<b>12</b>	
					Defeitos no estator do motor	4	3	<b>12</b>	
					Defeitos no redutor (ou outros tipos de acoplamentos)	4	3	<b>12</b>	
	-	Desequilíbrio de Corrente >6%	-	-	-	Desequilíbrio de tensão entre fases	3	6	<b>18</b>
						Curto circuito entre espiras do bobinamento (verniz trincado devido altas temperaturas ou excesso de vibração)	4	3	<b>12</b>
					Início de baixa isolamento entre espiras e a carcaça (contaminação interna, materiais isolantes danificados por excesso de picos de tensão)	3	3	<b>9</b>	

Fonte: Própria.

Figura 20 – Modelo do procedimento utilizado e distribuído aos técnicos durante inspeções.

REALIZAR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NO MOTOR									
<p><b>Ferramenta(s) necessária(s):</b> Medidor de Vibração</p> <p>Obs: sempre realizar essa inspeção apenas em equipamentos que estejam de fácil acesso e que não coloquem em risco sua segurança. Se houver alguma ordem de serviço para você fazer inspeção em um motor que julgue ser perigoso você medir a vibração, avise seu supervisor.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Medir a vibração no ponto V1.</li> <li>2. Medir a vibração no ponto V2.</li> <li>3. Medir a vibração no ponto V3.</li> <li>4. Medir a vibração no ponto V4.</li> <li>5. Checar se cada valor de vibração lido ultrapassa os limites da tabela abaixo, considerando o valor de potência do motor e o material de sua base (concreto rígido ou metal flexível).</li> <li>6. Caso algum dos pontos ultrapasse o valor, investigar cada uma das causas ao lado de cima para baixo.</li> </ol>									
Técnica	Localização	Limite p/ atuação em 1 mês	Limite p/ atuação em 1 semana	Limite p/ atuação imediata	Causa	Ocorrência	Deteção	Risco	
Vibração	-	>=1,8mm/s (<20CV) >=2,8mm/s (<100CV) >=4,5mm/s (>100CV rígido) >=7,1mm/s (>100CV flexível)	-	>=4,5mm/s (<20CV) >=7,1mm/s (<100CV) >=11,2mm/s (>100CV rígido) >=18mm/s (>100CV flexível)	Mancais (deficiência de lubrificação que causa excentricidade permanente, que deslocará o rotor dentro do estator, normalmente aumentando a temperatura) Desalinhamento (paralelo, angular, combinada) Eixo torto ou empenado (devido sobrecargas mecânicas ou altos aquecimentos) Desbalanceamento (desequilíbrio de massa em relação aos eixos de rotação) Folga mecânica (parafusos frouxos, folgas excessivas nos mancais) Ventilação (quebra das ventoinhas internas e externas) Truncamento (caso de desalinhamentos mais severos, gerando fortes vibrações)	7	3	21	
						4	4	16	
						3	5	15	
						4	3	12	
						3	4	12	
						2	5	10	
						2	3	6	

Fonte: Própria.

Como toda indústria, houve dificuldade no aprendizado e qualidade inicial das análises dos técnicos, porém um plano de treinamento presencial, técnico e bem acompanhado possibilitou que o plano de manutenção fosse bem aplicado.

Um exemplo de inspeção realizada conforme o procedimento criado é descrito abaixo. O motor a ser realizado a inspeção é mostrado na Figura 21.

**Figura 21 – Motor a ser realizada a inspeção exemplo.**



Fonte: Própria.

A primeira inspeção realizada foi a de vibração, conforme Figura 22.

Figura 22 – Realização da medição de vibração do motor.



Fonte: Própria.

Os valores de vibração encontrados foram conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de vibração encontrados.

<b>Vibração</b>	
<b>Ponto</b>	<b>Leitura (mm/s)</b>
V1	1.0
V2	1.0
V3	1.1
V4	1.0

Fonte: Própria.

Como os valores estão todos abaixo de 1.8mm/s, não foi encontrado nenhuma anomalia e seguido para a inspeção termográfica.

Para essa inspeção foram realizadas leituras no estator, rolamento inferior, rolamento superior e redutor, conforme Figura 23, Figura 24, Figura 25 e Figura 26, respectivamente.

Figura 23 – Termografia no Estator.



Fonte: Própria.

Figura 24 – Termografia no rolamento inferior.



Fonte: Própria.

Figura 25 – Termografia no rolamento superior.



Fonte: Própria.

Figura 26 – Termografia no redutor.



Fonte: Própria.

Tabela 8 – Valores de temperatura.

Temperatura	
Local	Leitura (°C)
Estator	50.9
Rolamento inf	43.9
Rolamento sup	40.3
Redutor	40.4

Fonte: Própria.

Com exceção do estator, todos os pontos estavam com temperatura  $< 50^\circ$ . Para determinação da solução para correção da temperatura do estator, foi prosseguida a inspeção de corrente e tensão para verificação de desequilíbrios.

Para inspeção de corrente e tensão foi checada a placa de identificação do motor, conforme Figura 27, onde foi verificada uma corrente nominal de 4.9A para uma tensão de 220V.

Figura 27 – Placa de identificação do motor.



Fonte: Própria.

Em seguida o técnico prosseguiu com a medição de correntes e tensões em cada fase conforme Figura 28. Os valores foram anotados e calculados os desequilíbrios, conforme Tabela 9.

Figura 28 – Medições de corrente e tensão do motor.



Fonte: Própria.

Tabela 9 – Valores de corrente e tensão.

<b>Tensão/ Corrente</b>		
Fase	Leitura (V)	Leitura (A)
R	214	1,15
S	213	1,1
T	214	1,12
% desequilíbrio	0,2%	2,4%

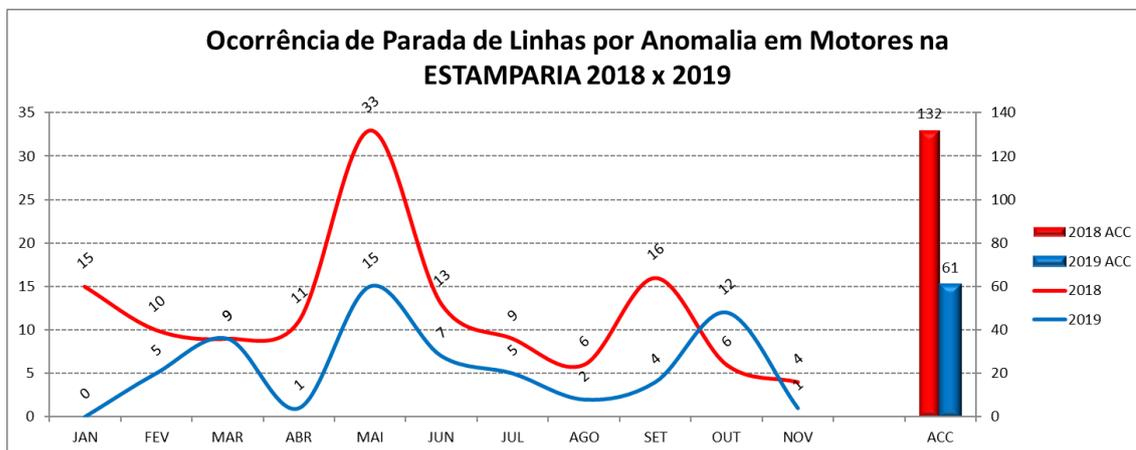
Fonte: Própria.

Visto que não houve nenhum desequilíbrio ou variação na corrente e tensão, a única anomalia encontrada durante toda inspeção foi a temperatura no estator que, verificando os pontos principais que não necessitavam retirar o motor para constatação (como contaminação interna, desalinhamento etc) foi verificado que a pequena variação na temperatura se deve ao fato da climatização da fábrica estar desligada no momento da inspeção, gerando um pequeno aquecimento que foi resolvido com a reativação da climatização da área.

Nessa fábrica todos as paradas de produção acima de 5min são registradas para posterior análise de dados e alimentação da estratégia de resolução de problemas. Dessa forma, é possível medir a quantidade de paradas devido a algum problema em algum motor. O sucesso na aplicação do plano então pode ser conferido comparando as ocorrências desses problemas

ao longo do ano, sendo 2018 um referencial de controle e início de 2019 o início da aplicação do plano, tendo mais força no segundo semestre do ano.

Gráfico 2 – Ocorrências de defeitos em motores que ocasionaram parada de linha durante os anos de 2018 e 2019 na fábrica analisada.



Fonte: Própria.

## CONCLUSÃO

O método FMEA como foi visto é muito versátil, podendo sofrer as modificações que forem necessárias e convenientes para atingimento da confiabilidade do equipamento. Nessa aplicação em específico não foi vista a necessidade de todos os campos conforme instruído pela literatura.

Houveram também algumas dificuldades na aplicação do plano em todos os motores da fábrica, visto que muitos deles estão em áreas de riscos ou mesmo inacessíveis enquanto a máquina operava. Esses motores ficaram sem a análise de temperatura e vibração, visto que a análise de corrente e tensão é feita no painel.

Como esse trabalho se aplica a uma fábrica já existente e operante, foi necessário se trabalhar com os equipamentos de medições já disponibilizados, deixando de lado a possibilidade de algumas outras formas de medição como assinatura elétrica, medição de acústica etc. Mesmo assim, as 4 técnicas utilizadas de temperatura, vibração, corrente e tensão mostraram-se completamente úteis e suficientes para detecção da maioria dos problemas do motor, além de sua forma prática e simples de aquisição de dados.

O *brainstorm* realizado para aquisição dos modos de falhas se mostrou bem efetivo, visto a quantidade de itens levantado.

A eficiência da aplicabilidade nesse levantamento pode ser facilmente verificada na redução de paradas por motores elétricos, onde houve mais previsibilidade nos motores que teriam defeito e permitindo haver uma manutenção planejada com bastante antecedência. O exemplo prático da inspeção realizada também mostra como o processo de inspeção pode ser simples, porém eficaz na detecção de problemas que podem ocasionar grandes paradas futuras.

A principal sugestão de próximos trabalhos é relacionada a envolver outras técnicas preditivas, que não foram utilizadas nesse trabalho devido a empresa já contar com equipamentos de medição específicos. Algumas sugestões estão a inspeção de assinatura elétrica, medição acústica e até mesmo inspeções de temperatura, vibração, corrente e tensão de forma automática, através de soluções *online* de diversas fabricantes de motores.

## REFERÊNCIAS

- ABECOM, s.d. *O que é rolamento? Quais os tipos?*, Belo Horizonte: ABECOM.
- ABNT NBR ISO, 2010. *ABNT NBR ISO 281 Mancais e rolamentos - Capacidade de carga dinâmica e vida útil estimada*, s.l.: s.n.
- ABNT, 2003. *NBR 7094 Máquinas elétricas girantes - Motores de indução - Especificação*, Rio de Janeiro: s.n.
- ABNT, 2008. *NBR 5410 Instalações elétricas de baixa tensão*, Rio de Janeiro: s.n.
- ABNT, 2012. *NBR 15572 Ensaios não destrutivos — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos*, Rio de Janeiro: s.n.
- ABRAMAN, 2011. *A situação da Manutenção no Brasil*. Curitiba, 26º Congresso Brasileiro de Manutenção.
- A, I. & P, N., 2014. Assigning machines to incomparable maintenance strategies with ElectreSort. *OMEGA*, Issue 47, pp. 45-59.
- BEN-DAYA, M. et al., 2009. *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. 1ª ed. London: Springer.
- BHADESHIA, H. K. D. H., 2011. *Steels for Bearings*, Pohang: s.n.
- COMMITTEE, E. M., 2006. *IEEE Guide for Induction Machinery Maintenance Testing and Failure Analysis*, New York: IEEE.
- ENGINEERING COMMITTEE, 1998. *IEEE Guide for Maintenance, Operation, and Safety of Industrial and Commercial Power Systems*, New York: IEEE-SA Standards Board.
- FLUKE, 2002. *Why true-rms?* [Online] Available at: <https://www.newark.com/pdfs/techarticles/fluke/whyTueRMS.pdf> [Acesso em 12 Junho 2019].
- FLUKE, 2019. *Fluke 805 Vibration Meter*. [Online] Available at: <https://www.fluke.com/en-us/product/mechanical-maintenance/vibration-analysis/fluke-805> [Acesso em 12 Junho 2019].
- FLUKE, s.d. *Fluke test and measurement tools*, s.l.: s.n.
- FOGLIATTO, F. S. & RIBEIRO, J. L. D., 2011. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier.
- FORD, M. C., 2011. *FMEA Handbook*. 4.2 ed. Dearborn: s.n.

- GLOWACZ, A. & GLOWACZ, Z., 2017. Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging. *Infrared Physics & Technology*, 81(1), pp. 7-16.
- GOMES, S. R., 2016. *Energização de motor de indução com rotor bobinado*, s.l.: Blog Máquinas Elétricas I.
- IEC, 2006. *IEC 60812 Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)*, Geneva: s.n.
- ISO, 1998. *ISO 10816 Mechanical Vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*, Switzerland: s.n.
- JUNIOR, G. C. d. N., 2011. *Máquinas elétricas: teoria e ensaios*. 4 ed. São Paulo: Editora Érica.
- NANDI, S., TOLIYAT, H. A. & LI, X., 2005. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, 20(4), pp. 719-729.
- NARAYAN, V., 2012. Business performance and maintenance - How are safety, quality, reliability, productivity and maintenance related?. *Journal of Quality in Maintenance*, 18(2), pp. 183-195.
- REIS, A. J. S., 2010. *Reconhecimento de Padrões de Falhas em Motores Trifásicos Utilizando Redes Neurais*, Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- RIBEIRO, V. C. M., 2017. *Gestão de Manutenção: Preventiva em Motores Elétricos Utilizando Método PDCA para Aumento da Confiabilidade de uma Linha de Produção*, Manaus: Universidade do Estado do Amazonas – UEA.
- SIDDIQUE, A., YADAVA, G. S. & SINGH, B., 2005. A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, 20(1), pp. 106-114.
- SILVEIRA, C. B., 2017. *Você sabe quais os tipos de Motor Elétrico CA e como Especificar?*, s.l.: Citisystems.
- STROSKI, P. N., 2017. *Como funciona o motor de indução?*, s.l.: Electrical Library.
- UMANS, S. D., 2014. *Máquinas Elétricas*. 7 ed. Porto Alegre: AMGH.
- WEG, 2018. *MANUAL GERAL DE INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS*. [Online] Available at: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h2c/h87/WEG-iom-installation-operation-and-maintenance-manual-of-electric-motors-50033244-manual-pt-en-es-de-ro-bg-ru-web.pdf> [Acesso em 12 Junho 2019].

