

Otávio Bohn Pessatti

**UM PANORAMA SOBRE O MONITORAMENTO DE
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
(TCC) submetido ao Curso de
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Santa
Catarina como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica

Orientador: Eng. Eletricista Hugo
Gustavo Gomez Mello, Me.
Coorientador: Prof. Nelson Sadowski,
Dr.

Florianópolis
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pessatti, Otávio Bohn

Um panorama sobre o monitoramento de condições de
operação de motores elétricos / Otávio Bohn Pessatti ;
orientador, Hugo Gustavo Gomez Mello, coorientador, Nelson
Sadowski, 2020.

94 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Manutenção preditiva. 3.
Motores elétricos. 4. Indústria 4.0. 5. Diagnóstico de
falhas. I. Mello, Hugo Gustavo Gomez. II. Sadowski,
Nelson. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Otávio Bohn Pessatti

Um panorama sobre o monitoramento de condições de operação de motores elétricos

Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora

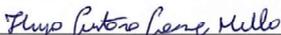
Florianópolis, 30 de junho de 2020.



Documento assinado digitalmente
Jean Wanele Leite
Data: 03/07/2020 12:33:47-0300
CPF: 003.474.909-80

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

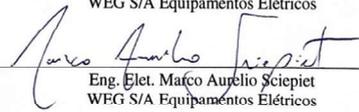

Eng. Elet. Hugo Gustavo Gomez Mello, Me.
Orientador



Documento assinado digitalmente
Nelson Sadowski
Data: 02/07/2020 10:11:30-0300
CPF: 311.384.389-87

Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina


Eng. Elet. Carlos Eduardo Guarenti Martins, Me.
WEG S/A Equipamentos Elétricos


Eng. Elet. Marco Aurelio Sciepiet
WEG S/A Equipamentos Elétricos

Este trabalho é dedicado aos meus pais,
minha namorada, irmãos, amigos,
colegas de trabalho e de classe.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, que desde o início instigaram seus filhos a buscar uma formação de excelência. Minha namorada Manuela pelo apoio e principalmente pela paciência por conta do tempo dedicado a esse trabalho. Meus irmãos pela parceria que vem desde a juventude até os dias de hoje. Meus colegas de classe da Engenharia Elétrica, com os quais foi impossível se sentir sozinho em quaisquer “apuros acadêmicos”. Meus colegas da C2E e do Labmat, pelos desafios aceitos e atingidos durante os últimos 5 anos. Por fim, meus colegas na WEG, que nunca negaram compartilhar conhecimento de anos de experiência com um estagiário.

RESUMO

Esse trabalho apresenta um panorama sobre tecnologias importantes na área de monitoramento de condições de operação de motores elétricos. Dada a relevância do tema e os potenciais retornos financeiros para indústrias de todos os setores, julga-se pertinente um levantamento abrangente que contemple desde a medição de parâmetros de interesse à tomada de decisão sobre a necessidade de manutenção. A partir do conceito de manutenção preditiva e uma revisão das falhas mais comuns em motores elétricos, uma análise de um sistema típico de monitoramento e uma série de soluções comerciais são discutidas. As principais tendências do tema são sumarizadas, tendo como plano de fundo a indústria 4.0, a modularização comercial de soluções e os próximos avanços em termos de diagnóstico de motores elétricos.

Palavras-chave: Manutenção preditiva. Motores elétricos. Indústria 4.0.

ABSTRACT

This work presents an overview of important technologies in the area of monitoring electric motors operating conditions. Given the relevance of the topic and the potential financial returns for industries of all sectors, a comprehensive survey is considered pertinent, ranging from the measurement of operating parameters to making decisions about the urgency for maintenance. Based on the concept of predictive maintenance and a review of the most common failures in electric motors, an analysis of a typical monitoring system and a series of commercial solutions are discussed. The main trends of the theme are summarized, using the 4.0 industry, the commercial modularization of solutions and the next advances in terms of diagnosis of electric motors as background.

Keywords: Predictive maintenance. Electric motors. Industry 4.0.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de banheira: probabilidade de falha	24
Figura 2 - Posicionamento da ação de manutenção preditiva com relação a falha	25
Figura 3 - Volume de publicação de artigos sobre manutenção preventiva e preditiva	25
Figura 4 - Custos de operação com e sem paradas na produção. 27	
Figura 5 - Taxonomia de falhas em motores elétricos.....	31
Figura 6 - Taxonomia de falhas orientada a componentes	32
Figura 7 - Distribuição de ocorrência de falhas elétricas ou mecânicas em motores elétricos	34
Figura 8 - Ocorrência de falhas por componente.....	34
Figura 9 - Frequência de falhas em motores de indução por componente	35
Figura 10 - Frequência de falhas em motores de indução por componente, indústria <i>offshore</i>	35
Figura 11 - Motor de indução e seus principais componentes....	38
Figura 12 - Estrutura típica de um rolamento de esferas rolantes	38
Figura 13 - Espectro de frequência de rolamento com 4 tipos de falhas	40
Figura 14 - Estator bobinado	43
Figura 15 - Variação da impedância de sequência negativa com a quantidade de bobinas curtocircuitadas.....	44
Figura 16 - Variação da impedância de sequência negativa com o desbalanceamento da alimentação.....	45
Figura 17 - Rotor gaiola de esquilo de alumínio injetado.....	46
Figura 18 - Espectro de corrente de motor de indução de 7,5 kW saudável e com barras do rotor quebradas, faixas de frequência normal e reduzidas respectivamente.....	47
Figura 19 - Formas de energia, etapas de conversão e falhas associadas	50
Figura 20 - Fluxo da informação no monitoramento da operação de motores.....	53
Figura 21 - Volume de artigos publicados.....	54
Figura 22 - Esquemático de um acelerômetro piezoelétrico.....	55
Figura 23 - Instalação de termistores nas bobinas	56
Figura 24 - Relação não linear entre temperatura e resistência do termistor	57
Figura 25 - Relação quase linear de sensores do tipo KTY	58

Figura 26 - Medidor de corrente.....	58
Figura 27 - Desempenho comparativo em termos de consumo de energia.....	62
Figura 28 - Fluxo de informação no monitoramento de condições de motores elétricos	64
Figura 29 - Possíveis pontos de fusão de informações.....	65
Figura 30 - ABB Ability Smart Sensor™	68
Figura 31 - Montagem do ABB Ability Smart Sensor™ na carcaça do motor.....	68
Figura 32 - Classificação de risco de operação dos motores	70
Figura 33 - WEG Motor Scan™	71
Figura 34 - Montagem do WEG Motor Scan™ na carcaça	71
Figura 35 - Posicionamento e leitura do WEG Motor Scan™ em comparação com acelerômetros	72
Figura 36 - Classificação de motores em operação	73
Figura 37 - Siemens Simotic Connect™ montado na carcaça de um motor.....	73
Figura 38 - Conjunto aberto e bateria.....	74
Figura 39 - SKF CWMA 8800™	75
Figura 40 - Pluralidade de sensores instalados em um motor elétrico	76
Figura 41 - Schaeffler Optime™.....	76
Figura 42 - Malha de comunicação entre sensores.....	77
Figura 43 - AVS 2000R™.....	78
Figura 44 - Comunicação do <i>gateway</i> AMC.....	78
Figura 45 - Tediensens LN Series™	79
Figura 46 - LOGGING NODE™.....	80
Figura 47 - Medidor de corrente trifásico Monnit.....	80
Figura 48 - Montagem da solução da DOL Group.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Manutenção preditiva e confiabilidade de motores elétricos	26
Tabela 2 - Distribuição de falhas por componente levando em conta aplicação	36
Tabela 3 - Magnitude das componentes de falha, tensão balanceada	41
Tabela 4 - Magnitude das componentes de falha, tensão desbalanceada.....	41
Tabela 5 - Falhas e sinais emitidos	48
Tabela 6 - Falhas e suas causas	49
Tabela 7 - Falhas, causa e efeito.....	49
Tabela 8 - Frequências de manifestação de falhas.....	51
Tabela 9 - Comparativo entre protocolos de comunicação.....	61
Tabela 10 - Dados dos módulos de comunicação para teste.....	61
Tabela 11 - Comparativo entre produtos identificados.....	67
Tabela 12 - Dados gerais ABB Ability Smart Sensor™.....	69
Tabela 13 - Dados técnicos ABB Ability Smart Sensor™.....	69
Tabela 14 - Dados gerais WEG Motor Scan™.....	72

LISTA DE SÍMBOLOS

f_i	Frequência de passagem de esferas na pista interna
f_o	Frequência de passagem de esferas na pista externa
f_{ball}	Frequência de rotação das esferas
f_{cage}	Frequência falha na gaiola do rolamento
f_r	Frequência de rotação do rotor
f_e	Frequência da tensão de alimentação
f_{bng}	Frequência de falha do rolamento
f_s	Frequência de falhas entre voltas nas bobinas do estator
f_{stbb}	Frequência de barras quebradas manifestada na corrente do estator
N	Velocidade de rotação
n_b	Número de esferas no rolamento
B_d	Diâmetro das esferas
P_d	Diâmetro da pista do rolamento
α	Ângulo de contato entre esferas e a pista
$m = n$	1,2,3,...
k	1,3,5...

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo geral	22
1.1.2	Objetivos específicos	22
2	MANUTENÇÃO PREDITIVA	23
3	FALHAS EM MOTORES ELÉTRICOS	29
3.1	CLASSIFICAÇÃO DAS FALHAS	30
3.2	FALHAS MAIS FREQUENTES	33
3.3	PRINCIPAIS COMPONENTES DE INTERESSE	37
3.3.1	Rolamentos	38
3.3.2	Estator	42
3.3.3	Rotor	46
3.4	RELAÇÃO CAUSA E EFEITO DAS FALHAS	48
4	SISTEMA TÍPICO PARA O MONITORAMENTO DE CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	53
4.1	MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE INTERESSE	55
4.2	PROCESSAMENTO DE DADOS E COMUNICAÇÃO	59
4.3	TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO	63
5	SOLUÇÕES COMERCIAIS	67
5.1	ABB ABILITY SMART SENSOR	68
5.2	WEG MOTOR SCAN™	70
5.3	SIEMENS SIMOTIC CONNECT™	73
5.4	SKF CWMA 8800™	74
5.5	SCHAEFFLER OPTIME™	76
5.6	AMC VIBRO AVS 2000R™	77
5.7	TEDIASENS LN SERIES™	79
5.8	MONNIT™	80
5.9	DOL GROUP™	81
6	CONCLUSÕES	83

REFERÊNCIAS.....	87
-------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

Plantas industriais compreendem uma sucessão de processos que dependem diretamente de máquinas elétricas girantes para seu funcionamento. Falhas nesses equipamentos podem acarretar em uma série de custos relacionados à manutenção e ao tempo em que a linha de produção foi interrompida. Em um cenário de competitividade industrial que independe do setor, garantir a eficiência de processos e equipamentos é objeto de interesse de qualquer empresa.

No dia a dia, uma das formas na qual essa busca pela eficiência se manifesta é na redução do tempo de inatividade das máquinas essenciais às linhas de produção, tarefa atribuída às equipes de manutenção. A tendência é que, quanto mais reativa for a estratégia desses times, mais onerosos serão os impactos sobre a cadeia produtiva em caso de imprevistos. Isso motivou o surgimento de inúmeras práticas de manutenção periódica para prolongar a vida útil dos motores e antecipar suas falhas (QUEIROZ, 2017), também conhecida como manutenção preventiva. A partir de 2016, o lançamento de sensores integrados entre si e a módulos de comunicação sem fio trouxe os olhos do mercado para o monitoramento de condições de operação de motores, ao escalonamento da manutenção preditiva e à sua digitalização.

O termo indústria 4.0 se refere a uma transformação vivida no meio industrial durante a última década e, por definição, baseada na integração e digitalização de máquinas, processos e produtos. Sustentada pela dita quarta revolução industrial, a aquisição de dados em tempo real durante a operação de máquinas já é realizada e o uso dessa informação para diagnósticos é agenda para as indústrias de todos os setores (BALOGH, 2018). Já existem no mercado produtos bem estabelecidos como, por exemplo, WEG Motor Scan™ e ABB Ability™ Smart Sensor, capazes de fazer a leitura de temperatura, vibração e tempo de operação de motores elétricos de maneira não invasiva. O uso de protocolos de comunicação sem fio permite a fácil visualização dos dados em smartphones ou na nuvem, transmitidos via *gateway* ou através de outros dispositivos conectados.

Essas informações facilmente acessíveis são indicativas e podem exigir análises para a realização de diagnósticos sobre as condições em que operam as máquinas para, enfim, apresentar um parecer sobre a necessidade de manutenção ou não. Ou seja, tão importante quanto adquirir e enviar os dados das máquinas é saber como interpretá-los. Situar-se estrategicamente em qualquer ponto da cadeia produtiva que compreende medição, comunicação e análise de dados pode ser um

diferencial competitivo tendo em vista a imensidão do mercado de manutenção preditiva.

Dito isso, o presente trabalho visa estudar as soluções existentes no mercado de monitoramento das condições de operação de motores elétricos e sua relação com o que é conhecido em termos de diagnóstico de falhas, tendo como plano de fundo a Indústria 4.0.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo traçar um panorama sobre as principais soluções de monitoramento *wireless* de condições de operação de motores elétricos, definindo a estrutura típica desse tipo de sistema e relacionando as últimas aplicações comerciais lançadas com o que é conhecido em termos de diagnóstico de falhas.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, listam-se os seguintes tópicos:

- Definir manutenção preditiva;
- Revisar principais tipos de falhas em motores elétricos de indução, bem como elencar os principais parâmetros de interesse e técnicas de diagnóstico;
- Esboçar um sistema típico de monitoramento de condições de operação *wireless*;
- Listar as principais soluções comerciais existentes;
- Sumarizar principais tendências no tema;

2 MANUTENÇÃO PREDITIVA

A busca pela redução de custos em processos é um dos pilares da competitividade em todos os setores da indústria. Entre uma vasta gama de despesas inerentes a qualquer linha de produção a manutenção ocupa lugar significativo pois, se não for bem manejada, pode ser extremamente onerosa para a empresa. Anos atrás, Mobley (2002) estimou que até 60% dos custos de produção em indústrias pesadas, como de papel e celulose, podem ser relacionados à manutenção, custo esse que pode variar até 15% para indústrias mais leves como, por exemplo, a indústria alimentícia. Independentemente da proporção, nenhum ramo industrial pode se dar ao luxo de negligenciar esse tipo de dispêndio, tornando fundamental a adoção de estratégias inteligentes de manutenção de máquinas. Existe uma série de metodologias disponíveis e investigadas em artigos para realizar essa gestão de maquinário, mas conceitualmente a maioria delas pode ser enquadrada em três categorias apresentadas por Motaghare (2018) e descritas abaixo:

- Executar até a falha (*Run-to-failure*): com certeza a mais reativa das estratégias, onde apenas cuidados paliativos são feitos mesmo na presença de defeitos ou sinais claros de falhas. A premissa da máquina operar até sua falha acarreta em custos altos devido à compra de peças de reposição e, principalmente, devido aos tempos de interrupção nas linhas de produção.
- Manutenção preventiva: estratégia que leva em conta principalmente o tempo de operação da máquina para estipular a probabilidade de falha e, então, realizar a manutenção. Como exposto por Motaghare (2018), a estratégia se baseia na curva de banheira (*bathtub curve*) para definir a periodicidade de inspeções, essas mais frequentes no início e no fim da vida útil da máquina como ilustrado na Figura 1. Esse efeito é observado devido a fatores como a instalação e calibração da máquina que, se forem realizados incorretamente, podem resultar em falhas irremediáveis já nos primeiros dias de operação. Assim como, após quantidade suficiente de tempo, o desgaste dos componentes inerente à operação dos motores também resulta naturalmente em falhas. Essa vida útil pode ser aumentada ou reduzida de acordo com as ações das equipes de

manutenção, mas tão importante quanto postergar a vida útil da máquina é identificar quão próximo a máquina está de falhar para planejar a sua troca de forma que minimize eventuais custos de parada na produção.

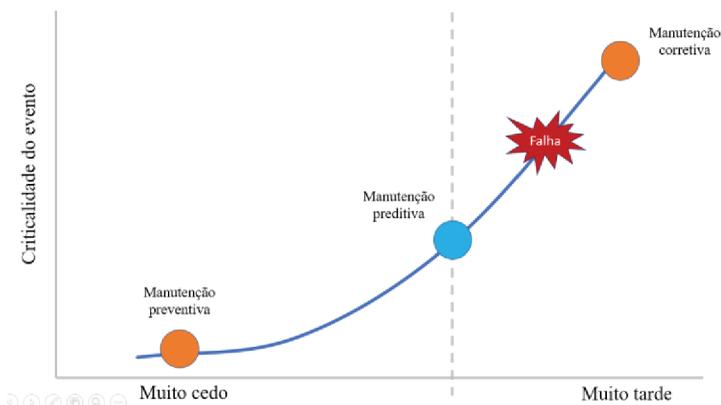
Figura 1 - Curva de banheira: probabilidade de falha



Fonte: Motaghare, 2018.

- **Manutenção preditiva:** evolução da manutenção preventiva, leva em conta outros parâmetros de operação adicionalmente ao tempo para emitir um parecer sobre a necessidade ou não de manutenção. De certa forma, essa estratégia faz com que a máquina se aproxime mais de uma falha a curto prazo quando comparada à manutenção preventiva, visto que a intervenção na operação só é realizada a partir de um indício de defeito potencial. Esse efeito, ilustrado na Figura 2, é justamente o diferencial dessa abordagem, pois a manutenção por si só também é um fator de risco para a ocorrência de falhas que passa a ser realizada somente quando necessário. É evidente que se a estratégia for bem-sucedida e não interromper desnecessariamente as máquinas, menores serão os custos incorridos com paradas na produção.

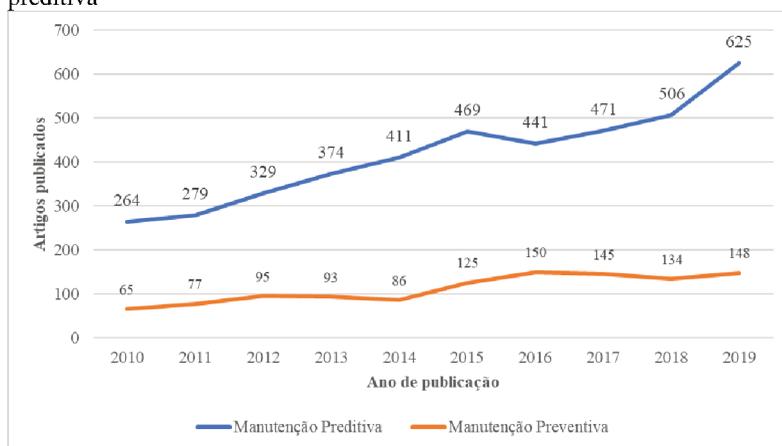
Figura 2 - Posicionamento da ação de manutenção preditiva com relação a falha



Fonte: Motaghare (adaptado), 2018.

Visto que a manutenção preditiva é, em teoria, a menos onerosa das estratégias, não é surpresa a crescente relevância que o tema tem recebido, ilustrada na Figura 3 por um crescimento significativo na quantidade de artigos publicados sobre o assunto no mundo (linha azul). Esse efeito é ainda mais evidente quando comparado ao número de artigos relacionados à manutenção preventiva (linha laranja):

Figura 3 - Volume de publicação de artigos sobre manutenção preventiva e preditiva



Fonte: autor (base de dados: Science Direct, 2020).

Dada a importância de motores elétricos nas plantas industriais, esse acaba por ser um dos principais direcionadores dos estudos sobre manutenção preditiva. Por exemplo, Basak (2006) discute o efeito do monitoramento de condições sobre a confiabilidade de operação de motores elétricos de diferentes potências, mostrado na Tabela 1:

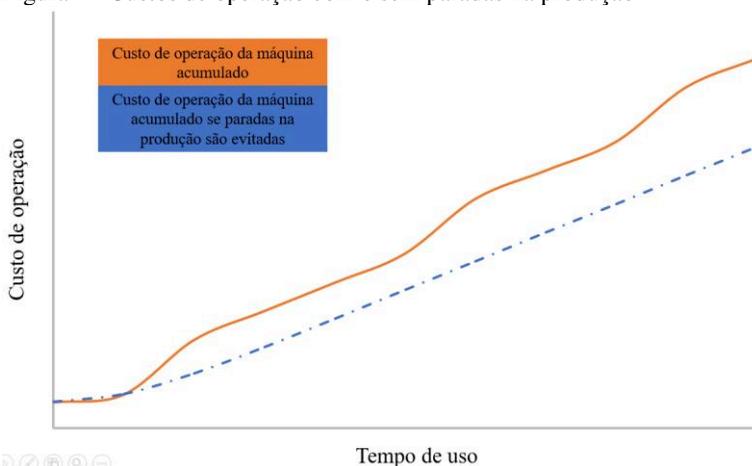
Tabela 1 - Manutenção preditiva e confiabilidade de motores elétricos

Faixa de velocidade (721-1800 RPM)	Confiabilidade sem monitoramento após 1 ano (%)	Confiabilidade com monitoramento após 1 ano (%)
Faixa de potência (HP)		
201-500	92,6	96,8
501-5000	91,1	96,5
>5000	90,7	95,5

Fonte: Basak, 2006.

As variações percentuais observadas acima refletem em um impacto gigantesco quando se leva em conta a quantidade de motores elétricos e outras máquinas usadas industrialmente no mundo. Mas, se a manutenção preditiva é a menos onerosa das estratégias, o que ainda a impede de ser aplicada em larga escala? Primeiramente é necessário avaliar a real necessidade de se utilizar o método (MOBLEY, 2002) pois, dependendo da aplicação, o índice de falha e o custo de reposição de componentes e equipamentos podem ser baixos o suficiente para que as despesas de manutenção sejam manejadas suficientemente bem através da manutenção preventiva. Existe um custo incorrido à implantação de métodos de manutenção preditiva que deve ser capaz de proporcionar um retorno mensurável aos custos gerais de manutenção, destacado pela diferença entre as curvas da Figura 4:

Figura 4 - Custos de operação com e sem paradas na produção



Fonte: Mobley (adaptado), 2002.

Para empresas que ainda não aplicam o conceito, Mobley (2002) discute que é necessária uma mudança cultural de toda a indústria para compreender os efeitos da nova estratégia de manutenção para a linha de produção. Relewa-se a importância de capacitar os colaboradores da empresa para fazerem as análises e chegarem às conclusões certas sobre desvios nos parâmetros de operação das máquinas. Em relação à empresa como um todo, Mobley (2002) também destaca que existe uma série de outros efeitos capazes de interromper a linha de produção como, por exemplo, a operação indevida de máquinas e layout do chão de fábrica que podem ser confundidos com atribuições das equipes de manutenção. É destacada a importância da clareza das incumbências e do envolvimento global da empresa, incluindo setores de marketing e vendas que, mesmo parecendo ser equipes distantes do dia a dia de manutenção, são capazes de sobrecarregar as linhas de produção se não fizeram correta gestão de prazos e volume de acordos comerciais. Em suma, as equipes de manutenção podem ter dificuldades em justificar e implantar sistemas de manutenção preditiva se não possuem autonomia e desempenho adequados.

Adicionalmente, o conceito de se utilizar os parâmetros de operação das máquinas para realizar um diagnóstico de suas condições é relativamente simples, porém a obtenção desses dados, bem como a sua interpretação ainda é fator limitante para a difusão global de práticas em manutenção preditiva. Para indústrias com instalações antigas, a

dificuldade é ainda maior visto que os galpões, máquinas e até mesmo layout da fábrica muitas vezes não foram projetados levando em conta a aplicação de mecanismos de medição, comunicação e análise de parâmetros de operação. Fatores de ambiente, como temperatura, umidade e outros gases nocivos também podem inviabilizar a aplicação de sistemas de medição e comunicação precisos. Não obstante, grandes fabricantes de máquinas e/ou outros componentes elétricos já têm apresentado uma gama significativa de soluções para atender a essa demanda de mercado de maneira escalonável e levando em conta ambientes nocivos de operação.

O próximo capítulo abordará quais são os principais tipos de falhas em motores elétricos e como elas se manifestam.

3 FALHAS EM MOTORES ELÉTRICOS

Estima-se que cerca de 68% da energia elétrica consumida na indústria mundialmente seja usada para alimentar motores elétricos (BAZURTO, 2016) e, cada vez que um desses motores falha, existem custos de manutenção relativos à parada na produção com os quais a empresa deverá arcar. Além de diretrizes internas às indústrias que visam a eficiência energética de suas plantas, a participação de quase 30% da indústria no consumo de energia elétrica mundial (NEJAT, 2015) impulsiona a relevância do assunto, tornando-o praticamente de interesse público. Dessa forma, não é surpresa a grande quantidade de artigos analisando os mais variados tipos de falhas em motores elétricos, bem como os parâmetros que influem diretamente em sua eficiência.

Cada tipo de motor elétrico possui características construtivas próprias e, portanto, maior ou menor susceptibilidade a falhas específicas. Entre os motores mais presentes e estudados na indústria, nenhum recebe tanto destaque quanto o motor de indução, ao ponto que, em 2006, estimou-se uma participação de 80% dos motores de indução entre os motores usados industrialmente no mundo (BASAK, 2006). Dessa forma, também não é surpresa que boa parte dos artigos e estatísticas do assunto também sejam direcionados a esse tipo de máquina, refletindo em uma ênfase nas análises feitas nesse trabalho. Motores de indução são confiáveis, eficientes e requerem pouca manutenção (JIGYASU, 2018), ainda assim são susceptíveis a falhas, principalmente se expostos a condições de operação inadequadas.

Os níveis de tensão em que operam os motores elétricos causam uma variação na ocorrência de falhas, orientando as equipes de projeto a desenvolverem componentes ou subsistemas da máquina mais robustos de acordo com a sua alimentação e aplicação. Dentro do contexto de soluções para o monitoramento sem fio das condições de operação de motores elétricos industriais, mostrou-se útil utilizar uma denominação diferente da NR10 quanto aos limites dos níveis de tensão. Nesse trabalho entende-se por aplicações de baixa tensão motores elétricos que são alimentados por valores de tensão inferiores a 1 kV, aplicações de média tensão motores que operam entre 1 kV e 13,8 kV, e, por fim, aplicações de alta tensão motores elétricos que operam acima de 13,8 kV.

Motores elétricos são projetados levando em conta uma série de parâmetros, entre eles: montagem, tolerância da manufatura, ambiente de operação e característica da carga (IMORU, 2014). Durante a sua operação, as máquinas estão sujeitas a interações com uma série de forças mecânicas e eletromagnéticas que foram levadas em conta no projeto para

geração mínima de vibrações e ruído. A alteração de qualquer um dos parâmetros de projeto pode fazer o motor perder o equilíbrio existente entre as forças, causando diferentes estresses a seus componentes e posteriormente resultando em falhas.

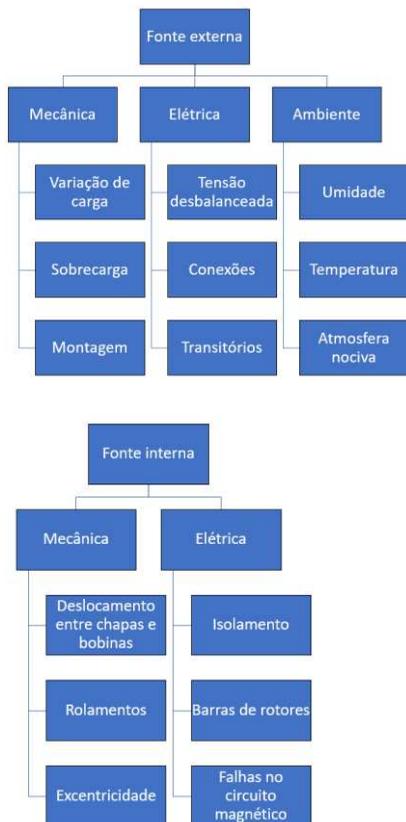
As falhas em si são entendidas como defeitos ou alterações em partes do motor (BAZURTO, 2016) que afetam parcial ou totalmente o seu funcionamento, produzindo efeitos como a redução da eficiência até a perda de usabilidade da máquina (IMORU, 2014). O tempo de atividade ainda é um dos principais parâmetros de interesse para fins de diagnóstico, mas uma série de outros fatores podem influir na ocorrência de falhas. A própria manutenção pode vir a causar perdas na eficiência e, dependendo do tamanho do motor, a compra de um equipamento novo pode ser menos onerosa que o reparo da máquina. Esse tipo de decisão, ponderada por outros fatores, é responsabilidade das equipes de manutenção.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS FALHAS

Diferentes abordagens podem ser utilizadas para classificação dos tipos de falhas em motores elétricos. Para melhor observância das relações de causa e efeito, geralmente a divisão das falhas é realizada segundo suas origens (BAZURTO, 2016) e orientada aos componentes em que ocorrem os defeitos. A combinação das duas abordagens permite distinguir diferentes causas de sintomas mensuráveis durante a operação das máquinas e discernir seus efeitos nos diferentes subsistemas do motor.

Em um primeiro nível, as falhas em motores elétricos podem ser classificadas em internas ou externas. As origens internas são oriundas de aspectos construtivos da máquina, enquanto as falhas externas advêm das características do ambiente onde o motor opera, bem como de sua carga e fornecimento elétrico. A Figura 5 apresenta um exemplo de taxonomia de falhas em motores elétricos:

Figura 5 - Taxonomia de falhas em motores elétricos



Fonte: Bazurto (adaptado), 2016.

Como pode ser visto no esquemático acima, há um segundo nível de profundidade com nomenclatura intuitiva para categorização das falhas:

- Falhas Elétricas: oriundas de características elétricas da tensão fornecida e/ou dos componentes do motor (condutividade, isolamento etc);
- Falhas Mecânicas: oriundas da carga, montagem equivocada, assim como alterações das características mecânicas de componentes e/ou de conjuntos internos ao motor

- (deslocamento de chapas entre si, movimento da cabeça de bobina, defeitos no rolamento etc);
- Falhas relativas ao meio: oriundas das condições do ambiente em que o motor está operando (degradação do material isolante devido a fortes temperaturas ou atmosfera nociva aos condutores etc).

É unanimidade entre os pesquisadores que o assunto é extremamente vasto em escopo (BASAK, 2006), mas a forma de abordagem e classificação das falhas nem sempre é a mesma. A segmentação das origens das falhas pode ser orientada pelo objetivo da pesquisa, podendo ser mais ou menos ramificada. Por exemplo, a taxonomia proposta por Imoru (2014) destaca as falhas de cunho eletromagnético separadamente das falhas elétricas, abordando com mais ênfase o surgimento de correntes parasitas e ruído eletromagnético.

De maneira equivalente, é de interesse de alguns autores fazer o agrupamento das falhas por componente do motor, o que não acarreta em perda na qualidade da informação. Esse tipo de classificação, mostrada na imagem a seguir para motores de indução, pode ser utilizada para levantamento de estatísticas sobre a frequência de falhas orientada pelos principais elementos da máquina. Dados sobre a variação de susceptibilidade a falhas em determinadas partes do motor variando-se a aplicação, tamanho e alimentação da máquina são informações de grande valor para equipes de pesquisa, desenvolvimento e manutenção.

Figura 6 - Taxonomia de falhas orientada a componentes



Fonte: Jigyasu (adaptado), 2018.

O próximo tópico irá mostrar como a classificação proposta na Figura 6 é suficientemente adequada e compreende as falhas mais frequentes na maior parte dos motores elétricos. Uma vez associada à classificação da Figura 5 e a alguns métodos de diagnóstico, haverá critérios suficientes para compreender o potencial das soluções comerciais investigadas no capítulo 5.

3.2 FALHAS MAIS FREQUENTES

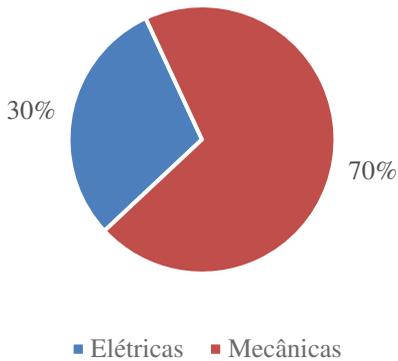
Quando bem utilizadas, as informações obtidas com o levantamento em campo da frequência de falhas em motores elétricos são de grande valor para diferentes grupos de trabalho. Equipes de desenvolvimento de produto se beneficiam, por exemplo, no processo de tornar componentes e processos mais robustos levando em conta a sua aplicação. Equipes de pesquisa do âmbito acadêmico e corporativo podem priorizar estudos sobre a degradação de componentes e o surgimento das falhas mais relevantes. Por fim, equipes de manutenção podem utilizá-las para definir estratégias de uso da máquina, vistoria e, quando possível, controle de variáveis do ambiente como temperatura e umidade.

Dada a relevância do assunto, os levantamentos de ocorrência de falhas são feitos entre diferentes parâmetros orientados à pesquisa ou interesse dos autores. Alguns exemplos de critérios são:

- Tipos de falhas (BAZURTO, 2016);
- Componente da falha (BAZURTO, 2016), (JIGYASU, 2018), (IMORU, 2014);
- Tipo de motor (BAZURTO, 2016), (JIGYASU, 2018), (IMORU, 2014), (ZHANG, 2011), (KIM, 2017);
- Tensão de operação (ZHANG, 2011);
- Potência da máquina (BASAK, 2006);
- Aplicação da máquina (IMORU, 2014).

Por exemplo, Bazurto (2016) apresenta estatísticas de centros de manutenção de motores elétricos da Colômbia, onde foram analisados cerca de 500 motores que falharam e com potência variando de 0 a 300 HP. Não foi priorizada nenhuma tipologia de motor ou aplicação e os resultados foram agrupados em falhas elétricas ou mecânicas.

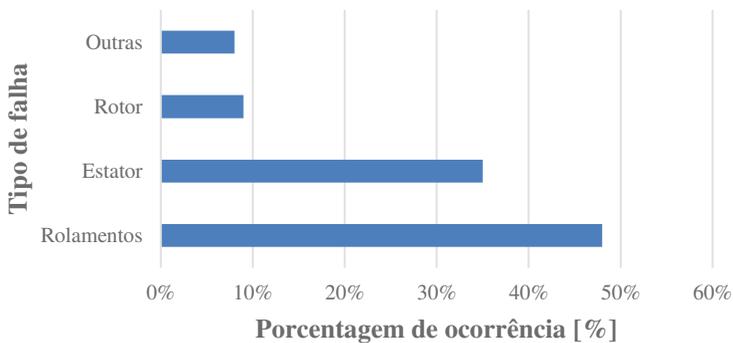
Figura 7 - Distribuição de ocorrência de falhas elétricas ou mecânicas em motores elétricos



Fonte: Bazarro, 2016.

Como visto acima, as falhas mecânicas claramente prevalecem sobre as elétricas nos motores analisados evidenciando a importância da correta instalação e associação do motor com a sua carga (BAZURTO, 2016). No mesmo artigo, após revisão bibliográfica e ainda sem se limitar a tipos de motores elétricos específicos, o autor traz os seguintes dados gerais sobre falhas, dessa vez orientados a componentes:

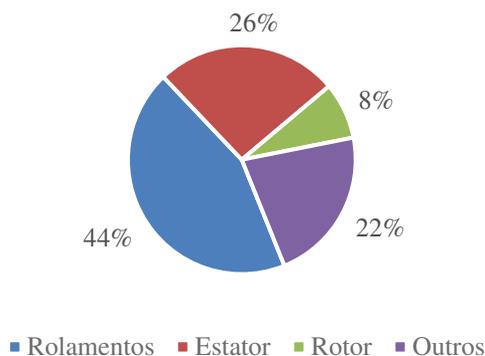
Figura 8 - Ocorrência de falhas por componente



Fonte: Bazarro, 2016.

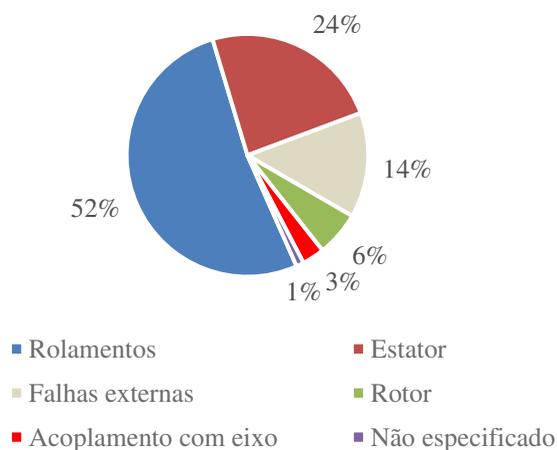
Apesar de não usar um banco de dados extensivo, a estatística da Figura 8 reflete a distribuição das falhas de maneira satisfatória, principalmente após compará-la com outras referências. Logo abaixo, são apresentados os resultados de dois levantamentos feitos por Jigyasu (2018) e Imoru (2014), respectivamente. A frequência de falhas também é levantada por componente, só que dessa vez tratando apenas de motores de indução:

Figura 9 - Frequência de falhas em motores de indução por componente



Fonte: Jigyasu, 2018

Figura 10 - Frequência de falhas em motores de indução por componente, indústria *offshore*



Fonte: Imoru, 2014.

Enquanto Jigyasu (2018) não caracteriza a aplicação dos motores avaliados, Imoru (2014) trata de motores aplicados na indústria petroquímica e *offshore*, sendo possível observar algumas variações entre os resultados mesmo que ambas as pesquisas tratem de motores de indução. Motores da indústria petroquímica e *offshore* são projetados para operar em condições severas, havendo também uma série de estudos sobre o tema. Zhang (2011) apresenta a Tabela 2 - Distribuição de falhas por componente levando em conta aplicação Tabela 2, que compara os resultados de 3 levantamentos de falhas feitos em condições diferentes de operação. Os dados da IEEE-IAS (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos – Sociedade de Aplicações Industriais) e do ERPI (Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica) tratam de máquinas de média tensão. Enquanto isso, os dados referentes à pesquisa da Allianz (empresa multinacional de seguros) foram obtidos a partir de motores de média a alta tensão principalmente aplicados em navios.

Tabela 2 - Distribuição de falhas por componente levando em conta aplicação

Falha	% de falhas em motores de indução			
	Aplicações gerais			Aplicação em navios
	IEEE-IAS	ERPI		Allianz
Rolamento	44	41		13
Estator	26	36		66
Rotor	8	9		13
Outras	22	14		8

Fonte: Zhang, 2011.

A maresia à qual motores aplicados em navios estão sujeitos aumenta drasticamente a quantidade de falhas no estator devido a degradação dos sistemas isolantes nessas condições, obrigando projetistas a utilizarem isolantes mais robustos nesse tipo de aplicação. Além da aplicação, a alta tensão utilizada em parte dos motores analisados pela Allianz também é fator de estresse elétrico para os isolantes, que a partir de sua deterioração ficam mais susceptíveis a descargas parciais pois os elevados níveis de tensão facilitam o processo de ruptura da rigidez dielétrica dos isolantes. Dito isso, é completamente compreensível um aumento da ocorrência de falhas de origens elétricas nos isolantes do estator dos motores da Allianz, comportamento típico entre motores de alta tensão com o agravante da aplicação estar sujeita à maresia. O que também surpreende, e destacado por Zhang (2011), é que nos motores de

maior tensão há uma queda abrupta nas falhas em rolamentos, justificada pelo fato da aplicação do levantamento utilizar, por exemplo, mancais do tipo bronzina. Esses mancais possuem construtividade simples quando comparados com rolamentos de esferas rolantes, que possuem estrutura delicada e geralmente são aplicados em motores de baixa tensão.

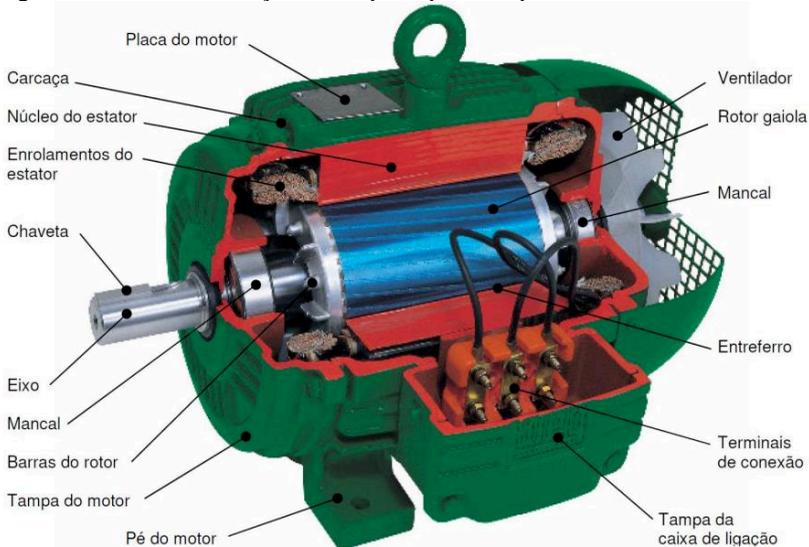
Adicionalmente, as variações nas frequências de falhas podem ser ainda mais intensas quando se comparam diferentes tipos de motores. Por exemplo Kim (2017) menciona um levantamento de falhas em motores de passo, relatando 80% das falhas como sendo ocasionadas em rolamentos, porcentagem significativamente maior às levantadas para motores de indução.

As soluções analisadas no capítulo 5 são majoritariamente utilizadas em motores de baixa e média tensão, e segundo a revisão feita é possível afirmar que os rolamentos serão os elementos mais susceptíveis a falhas, seguido do estator e rotor, respectivamente. Essas falhas e seus principais sintomas, bem como algumas técnicas diagnóstico, serão aprofundados no tópico 3.3.

3.3 PRINCIPAIS COMPONENTES DE INTERESSE

Um motor de indução parte do princípio da indução de corrente em uma espira sujeita a um campo magnético variável e tem a sua construção típica ilustrada na Figura 11. Essa estrutura mínima pode ser acrescida de outros componentes específicos dependendo da aplicação ou das características do projeto. Como parte integrante do motor, qualquer componente está sujeito a estresses e falhas, no entanto como já destacado no tópico anterior é de interesse aprofundar aspectos relacionados às falhas em rolamentos, estator e rotor.

Figura 11 - Motor de indução e seus principais componentes

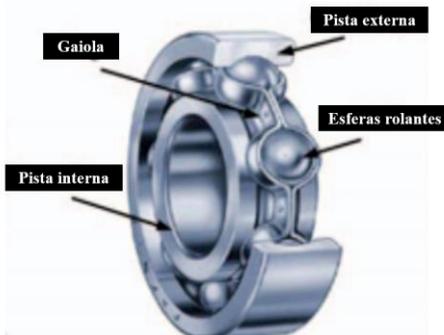


Fonte: WEG, 2020.

3.3.1 Rolamentos

O rolamento é um componente associado ao mancal da máquina elétrica e responsável por reduzir o atrito no movimento rotacional realizado pelo eixo. Sua estrutura normalmente consiste de duas pistas (uma interna e outra externa) sob as quais circulam elementos rolantes espaçados de maneira equidistante por uma gaiola (DALVAND, 2014).

Figura 12 - Estrutura típica de um rolamento de esferas rolantes



Fonte: Dalvand, 2014.

Essa estrutura é o que faz do rolamento o elemento mais susceptível a falhas em diversas aplicações, por isso existe uma grande quantidade de estudos sobre técnicas de identificar defeitos nesse componente durante a operação das máquinas. Em suma, Henao (2014) aponta que degradações em rolamentos se manifestam principalmente através de: pulsações no torque na frequência associada à rotação, vibrações associadas a essas pulsações e aumento no nível geral do ruído de operação da máquina. O uso de acelerômetros para medição de vibração na carcaça do motor é o caminho mais intuitivo para o monitoramento, uma vez que é aplicável durante a operação da máquina e sem requerer grandes adaptações para a instalação dos sensores. Segundo Henao (2014), quanto mais próximo do rolamento estiverem os sensores, mais viável será a distinção dos efeitos das falhas em relação a outros efeitos de vibração naturais do motor.

Para a análise dos dados de vibração um trabalho de processamento deve ser realizado onde a Transformada de Fourier é base para análise do espectro de frequência dos dados obtidos via acelerômetro. Levando em conta a estrutura típica do rolamento, Maruthi (2016) cita 4 tipos de falhas nesse componente e a suas respectivas frequências de manifestação (Equações 1 à 4), também ilustradas em um espectro na Figura 13. A medição da vibração foi realizada via microacelerômetro ADXL322 (ANALOG DEVICES, 2020) e o rolamento avaliado foi o modelo Nachi 6205 ZE (NACHI, 2007) aplicado em um motor de indução trifásico, 1,5 kW, 415V, 50 Hz e 1440 rpm.

Equação 1 - Frequência de passagem da esfera na pista interna

$$f_i = \frac{n_b}{2} \cdot f_r \left[1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \alpha \right]$$

Equação 2 - Frequência de passagem da esfera na pista externa

$$f_o = \frac{n_b}{2} \cdot f_r \left[1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \alpha \right]$$

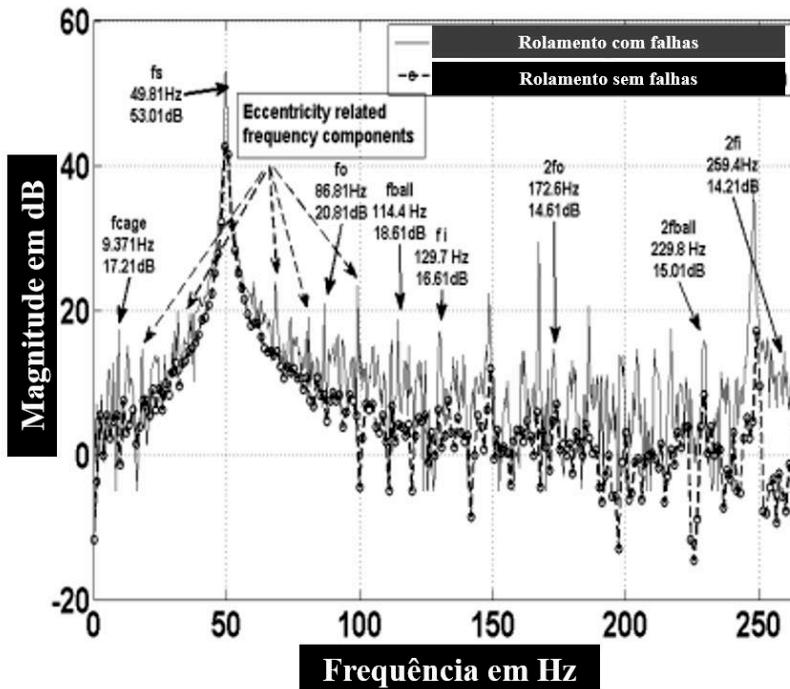
Equação 3 - Frequência de giro das esferas

$$f_{ball} = \frac{P_d}{B_d} \cdot f_r \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cdot \cos \alpha \right]$$

Equação 4 - Frequência de falha na gaiola

$$f_{cage} = \frac{1}{2} \cdot f_r \left[1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \alpha \right]$$

Figura 13 - Espectro de frequência de rolamento com 4 tipos de falhas



Fonte: Maruthi (adaptado), 2016.

Isso significa que, uma vez em posse das especificações técnicas dos rolamentos da máquina, um ou mais acelerômetros posicionados próximos ao mancal e um sistema de aquisição e tratamento dos dados, é possível discernir diferentes falhas em rolamentos. Na prática, sabendo da importância do monitoramento das condições dos rolamentos, é comum entre os fornecedores disponibilizar as frequências das diferentes

falhas em rolamentos ao invés das especificações construtivas do componente (SKF, 2020).

Para fins de diagnóstico, uma série de fatores deve ser levado em conta pois alterações nas condições de operação da máquina podem modificar os resultados das leituras. Por exemplo, uma tensão de alimentação desbalanceada aparenta intensificar a magnitude da vibração associada aos defeitos em rolamentos (MARUTHI, 2016), fortalecendo a necessidade de se isolar as condições de teste para observância da relação causa e efeito. As tabelas abaixo mostram os resultados de testes em motores de indução sem carga, a diferença entre os dois ensaios é a tensão de alimentação, balanceada no primeiro caso (Tabela 3) e desbalanceada no segundo (Tabela 4).

Tabela 3 - Magnitude das componentes de falha, tensão balanceada

Componente de falha	f_{cage}	f_o	f_i	f_{ball}
Frequência (Hz)	9,371	86,81	129,7	114,4
Magnitude (dB)	17,21	20,91	14,61	18,61

Fonte: Maruthi (adaptado), 2016.

Tabela 4 - Magnitude das componentes de falha, tensão desbalanceada

Componente de falha	f_{cage}	f_o	f_i	f_{ball}
Frequência (Hz)	9,371	88,29	132,7	116,4
Magnitude (dB)	20,41	23,61	30,01	22,01

Fonte: Maruthi (adaptado), 2016.

A magnitude dos espectros é maior para o caso desbalanceado, reforçando a correlação existente entre as grandezas elétricas e mecânicas nos motores, interação essa que pode ser utilizada a favor do desenvolvimento de outras técnicas de diagnóstico. Assim como o desbalanceamento da tensão causa um efeito mecânico no rolamento, esse, por sua vez, deixa um “rastros” na corrente que circula na bobinagem do estator. Bem estabelecida e apresentada por Zhou (2017), a relação entre frequência da falha no rolamento e sua expressão no espectro de corrente do estator é a seguinte:

Equação 5 - Frequência de manifestação de falha em rolamento na corrente

$$f_{bng} = |f_e \pm m \cdot f_v|$$

Fonte: Zhou, 2017.

Onde f_v é oriundo de qualquer umas das equações de 1 a 4 relacionadas às diferentes frequências de vibração das falhas em rolamentos. Trata-se de um método robusto, mas que peca por depender de uma frequência estática de alimentação devido à dependência entre a posição das harmônicas da corrente e a carga (CUSÍDO, 2008), restringindo sua aplicação a motores alimentados diretamente pela rede. Por esse motivo, Cusído (2008) investiga o uso da transformada *Wavelet* para diagnóstico de falhas de rolamentos e outros componentes de maneira aplicável a motores alimentados por inversores de frequência. Por fim, Kapoor (2014) aprofunda o uso da FFT e da transformada discreta de *Wavelet* calculando a energia dos dois espectros e comparando-a com a energia de um motor saudável e criando um indicador chamado “assinatura da falta”. Por levar em conta a operação normal do motor, a informação acusa principalmente a entrada e saída de novas harmônicas, mostrando mais rapidamente que há uma falta. O lado negativo do indicador é necessitar de dados de operação em condições saudáveis do motor para ser utilizado, o que o inviabiliza para soluções comerciais de diagnóstico para máquinas diversas.

Adicionalmente, o crescente uso de inversores de frequência um problema relevante, o surgimento de correntes parasitas nos rolamentos como um fator de estresse considerável para o componente. Existem alternativas como escovas para o aterramento do eixo que visam mitigar esse efeito, visto que as correntes desgastam as pistas, as esferas e até mesmo o lubrificante da peça.

3.3.2 Estator

O estator de um motor elétrico é um elemento acoplado à carcaça da máquina e que abriga as bobinas responsáveis por gerar o campo magnético que, por sua vez, interage com o rotor fazendo o eixo da máquina girar. Normalmente é constituído por chapas de ferro empilhadas que formam um pacote capaz de conduzir o fluxo magnético gerado pela corrente que percorre suas bobinas. Entre o pacote de chapas e as bobinas há um material isolante para evitar que os condutores entrem em contato elétrico com o ferro.

Figura 14 - Estator bobinado



Fonte: WEG, 2020.

Como visto no tópico 3.2, trata-se de um dos componentes mais susceptíveis a falhas em motores de indução de baixa tensão. A exposição a vibrações, correntes parasitas e focos de calor podem fazer o pacote de chapas perder sua rigidez (BAZURTO, 2016), por isso a importância da correta fixação do estator junto à carcaça, isolamento entre suas chapas e controle térmico do conjunto. No entanto, as falhas mais comuns em estatores não estão associadas ao seu núcleo, mas sim às suas bobinas (ARKAN, 2001): falhas entre espiras, curtos e circuito aberto são algumas das principais causas de falhas em motores elétricos.

Uma forma de avaliar as condições das bobinas e que é prática comum entre as equipes de manutenção é a realização de testes periódicos com a máquina desligada da rede. Em Henao (2014) são mencionados 5 ensaios diferentes para avaliação das condições das bobinas:

- Medição de resistência de isolamento;
- Teste AC e DC do HIPOT;
- Teste de isolamento entre espiras;
- Análise de fator de potência;
- Análise de descargas parciais.

Como esses ensaios envolvem retirar a máquina de operação, existem potenciais custos incorridos à paralização da produção que

poderiam ser evitados caso um monitoramento durante a operação do motor pudesse ser realizado. No entanto as bobinas do estator não emitem sinais claros como os rolamentos sobre seu nível de degradação, exigindo sistemas de medição mais complexos a fim de se obter um diagnóstico. Apesar das falhas entre as espiras das bobinas também possuem uma componente harmônica definida na Equação 6 e abordada por Basak (2006), esses não são sinais passíveis de serem medidos através da carcaça da máquina, diferentemente das vibrações associadas a falhas em rolamentos.

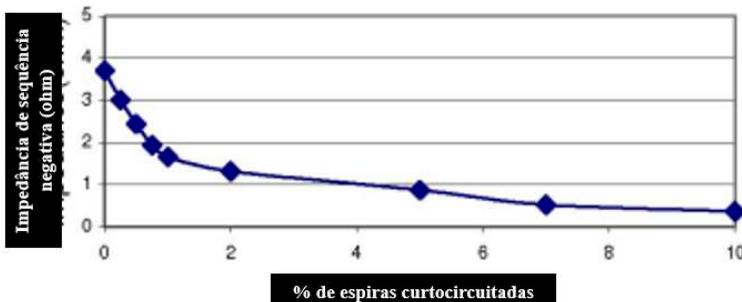
Equação 6 - Componente harmônica de falhas entre espiras de bobinas do estator

$$f_s = (n(1-s) / p \pm k) f$$

Fonte: Basak, 2006

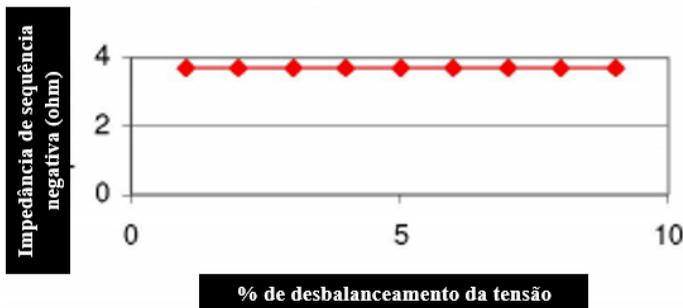
Pennan (1994) implementou uma técnica para prever alterações no fluxo magnético axial resultantes de curtos e identificar a posição de bobinas defeituosas. Arkan (2001) aplicou uma técnica de decomposição de potência, eliminou eventuais efeitos de variação na carga ou tensão de alimentação e, por fim, analisou componentes de sequência negativa da corrente de alimentação para identificar potenciais falhas entre espiras com precisão. Ao que tudo indica e apontado por Basak (2006), a análise da impedância de sequência negativa é um método extremamente robusto para detecção de curtos entre enrolamentos. Além de apresentar uma variação evidente com o aumento de enrolamentos curto circuitados em motores de indução como visto na Figura 15, a técnica ainda apresenta baixíssima variação para tensões desbalanceadas de alimentação, comportamento exposto na Figura 16.

Figura 15 - Variação da impedância de sequência negativa com a quantidade de bobinas cortocircuitadas



Fonte: Basak (adaptado), 2006.

Figura 16 - Variação da impedância de sequência negativa com o desbalanceamento da alimentação



Fonte: Basak (adaptado), 2006.

Uma maneira alternativa de se abordar o problema é, ao invés de procurar sinais sobre a falha de algum componente da bobina, investigar outros parâmetros que podem ter efeito diretos na degradação dos componentes. Uma série de fatores pode causar as falhas nas bobinas e o advento do uso de inversores de frequência para alimentar os motores tem intensificado alguns desses efeitos e atraído diversos pesquisadores. Por exemplo Calabrese (2017) analisa o estresse térmico causado aos isolantes das bobinas, aumentado com o uso do inversor de frequência pelo aumento de corrente capacitiva. De maneira análoga, Guastavino (2014) estuda o efeito de descargas parciais, esse aumentado pela distribuição desigual da tensão nas bobinas também alimentadas por inversor de frequência. A magnitude dos efeitos de cada estresse é particular às tipologias de motor e suas aplicações e, com isso em mente, Arkan (2001) sugere que a combinação de estresses de diferentes naturezas é a principal causa de falhas nas bobinagens do estator. Cada efeito, em maior ou menor grau, tem sua contribuição para degradação dos condutores até a ocorrência da falha.

Para fins de monitoramento durante a operação de motores, pode-se fazer uma relação indireta entre parâmetros facilmente obtidos para avaliar a possibilidade de falha nos componentes. Por exemplo, uma vez conhecida a relação entre a temperatura e degradação de um isolante e sua variação com o passar do tempo (WILLIAMSON, 2017), pode-se fazer uma estimativa da temperatura do estator a partir da temperatura ambiente por meio de modelos já existentes (HOSEINI, 2016), (HUBER,2014) e saber se a isolação corre risco de sofrer uma degradação térmica ou não.

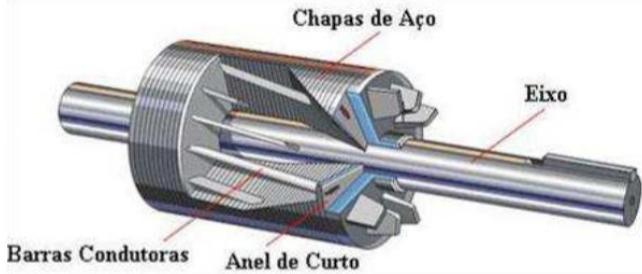
O aspecto negativo para fins comerciais é esse tipo de método depender do conhecimento prévio sobre os parâmetros da máquina em questão.

Dessa forma, para as falhas mais comuns no estator, pode ser de interesse monitorar sintomas diretos de falhas através do fluxo magnético (PENMAN, 1994) e corrente (ARKAN, 2001) bem como condições de estresse que podem resultar na falha das bobinas, como, por exemplo, a temperatura.

3.3.3 Rotor

O rotor de um motor elétrico é um elemento acoplado ao eixo da máquina com estrutura elétrica e mecânica para interagir com o campo magnético formado pelo estator e produzir torque. Assim como o estator, na maioria das configurações é formado por um pacote de chapas de ferro com barras de alumínio (rotor gaiola de esquilo) ou bobinas (rotor bobinado) para passagem de corrente. É justamente nesses condutores, em forma de barras ou bobinas, que a maioria das falhas em rotores se manifestam.

Figura 17 - Rotor gaiola de esquilo de alumínio injetado



Fonte: Santos, 2008.

Para o caso do rotor bobinado, podemos supor que os seus enrolamentos estão sujeitos a efeitos de estresse semelhantes aos enrolamentos do estator, com o agravante de fazer parte de um componente girante, ou seja, mais sujeito a efeitos mecânicos de deslocamento. Rotores de gaiola como na Figura 17 são menos susceptíveis a falhas e normalmente têm as suas barras formadas através da injeção de alumínio. O material é uma escolha típica para essa aplicação devido às suas propriedades elétricas, mecânicas e o seu peso, no entanto suas propriedades mecânicas podem resultar em quebras das barras durante a operação. Para fins de diagnóstico, a quebra de uma barra

se manifesta como uma assimetria no circuito elétrico do rotor, sendo dessa forma rastreável.

Dada a característica elétrica desse tipo de falha no rotor, os métodos de análise com base no espectro de frequência da corrente do estator são os mais comuns para identificação desse problema (HENAO, 2014). Como um reflexo da quantidade de motores de indução no mercado, existem muito mais estudos de detecção de falhas orientados a rotores do tipo gaiola de esquilo do que a rotores bobinados. Por exemplo, Basak (2006) mostra a Equação 7 - Frequência de quebra de barras do rotor manifestada na corrente de alimentação, que define a componente harmônica da corrente do estator referente à quebra de barras.

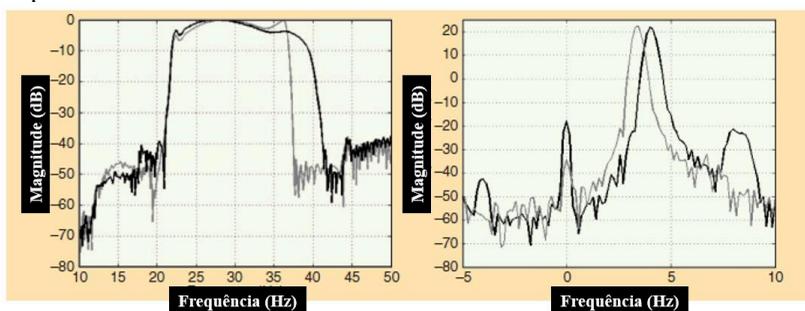
Equação 7 - Frequência de quebra de barras do rotor manifestada na corrente de alimentação

$$f_{stbb} = \left[\frac{\eta}{p} (1-s) \pm s \right] f \quad \text{where } \eta/p = 1,3,5, \dots$$

Fonte: Basak, 2006.

Henao (2014) discute que a análise da FFT da corrente do estator pode não ser o suficiente para identificação clara das falhas, principalmente em aplicações com inversor de frequência ou durante a aceleração de motores, como ilustrado na Figura 18:

Figura 18 - Espectro de corrente de motor de indução de 7,5 kW saudável e com barras do rotor quebradas, faixas de frequência normal e reduzidas respectivamente.



Fonte: Henao, 2014.

O primeiro gráfico da Figura 18 ilustra o espectro de frequência da corrente do estator de um motor saudável (linha cinza) e um motor com falhas no rotor (linha preta), a variação da velocidade causa um

espalhamento dos sinais de falhas em largas faixas de frequência, dificultando a sua identificação. Com isso em mente, Stefani (2009) usa um método de demodulação de sinais variantes no tempo para uma frequência constante, uma espécie de tradução da frequência de falha na frequência zero (HENAO, 2014). Uma vez reduzida a largura do espectro de análise é possível identificar com maior distinção as manifestações de falhas do rotor. No segundo gráfico da Figura 18 é possível notar uma diferença significativa entre os sinais do motor saudável (linha cinza) e motor com falhas no rotor (linha preta), principalmente entre as frequências de 7 e 8 Hz.

De forma alternativa, o monitoramento das condições do rotor durante a operação da máquina pode ser feito pelo método de Viena, que consiste em calcular o torque eletromagnético a partir da tensão e da corrente de alimentação, a variação entre eles dará indícios sobre assimetria nos condutores do rotor (HENAO, 2016).

3.4 RELAÇÃO CAUSA E EFEITO DAS FALHAS

Dadas as limitações tecnológicas em termos de medição de parâmetros de operação de forma modularizável, é de interesse para os fabricantes de soluções para monitoramento de condições de motores elétricos priorizar a leitura de dados que permitam a realização de mais de um tipo de diagnóstico. Em (BASAK, 2006) são apresentadas as Tabelas 5 e 6, que contém os sinais emitidos pelos principais tipos de falhas e as suas principais causas, respectivamente:

Tabela 5 - Falhas e sinais emitidos

Falhas	Sinais de manifestação					
	Corrente	Vibração	Fluxo magnético	Descargas parciais	Análise de gás	Temperatura
Isolamento das bobinas	X			X	X	X
Curtos entre espiras	X	X	X	X	X	X
Barras de rotor quebradas	X	X				
Rolamentos	X					

Fonte: Basak (adaptado), 2006.

Tabela 6 - Falhas e suas causas

Falhas	Causas							
	Sobrecarga	Operação desbalanceada	Transientes	Vibração	Contaminação e abrasão	Falha de manufatura ou instalação	Desalinhamento do rolamento	Corrente parasita no rolamento
Curtos entre espiras	X	X	X			X		
Barras de rotor quebradas	X	X		X	X	X		
Rolamentos						X	X	X
Excentricidade						X	X	

Fonte: Basak (adaptado), 2006.

A gama de diagnósticos oriundos de cada parâmetro é critério para o desenvolvimento de soluções comerciais no setor de monitoramento e a compreensão da causa raiz de possíveis falhas é base para o conceito de manutenção preditiva. No entanto, visto as limitações em termos de diagnóstico prévio de falhas, nem todos os defeitos podem ser antecipados, ou seja, identificar sinais da ocorrência de defeitos após sua ocorrência também possui valor estratégico para as equipes de manutenção. Se identificadas rapidamente, as falhas podem não levar o motor a um estado de perda total, por isso a importância da coluna “Efeito”, proposta na Tabela 7 e exposto por Bindu (2014):

Tabela 7 - Falhas, causa e efeito

Falha	Causa	Efeito
Curtos entre espiras	1. Deterioração devido a desgaste térmico	1. Abertura ou curto entre espiras 2. Geração de calor excessivo
Barras de rotor quebradas	1. Expansão térmica e sobrecarga térmica na gaiola do rotor 2. Estresses mecânicos nas laminações, devido a falhas de rolamentos ou eixo desbalanceado. 3. Estresses magnéticos por desbalanceamento ou ruído eletromagnético 4. Estresses ambientais (contaminação)	1. Redução da eficiência do rotor 2. Aumento de temperature localizado 3. Vibrações devido a expansão do rotor
Falhas mecânicas		
Rolamentos	1. Calor conduzido pelo eixo do rotor, aumentando deterioração do lubrificante 2. Vibrações no eixo 3. Correntes parasitas 4. Instalação incorreta	1. Aumento da fricção 2. Corrosão do rolamento, levando a descamação 3. Torções na pista de esferas 4. Quebra de barras de rotores

Fonte: Bindu (adaptado), 2014.

É interessante notar que a quebra de barras em rotores aparece tanto como uma falha originária como um possível efeito de falhas em rolamentos. Equivalentemente, o calor excessivo gerado por falhas na bobinagem do estator pode proporcionar um estresse térmico aos condutores do rotor, também o levando à falha. Essas interações reforçam

a ideia de um equilíbrio tênue entre as forças e componentes de um motor elétrico, visto que falhas em um componente raramente permanecerão isoladas sem afetar outros elementos da máquina.

Após análise das Tabelas 5, 6 e 7 é possível concluir que a corrente de alimentação é o parâmetro mais poderoso para fins de diagnóstico e isso não acontece por acaso. Luo (2019) discute e aborda de maneira ilustrativa, através da Figura 19, o caminho percorrido pela energia provida a um motor, bem como as falhas presentes em cada forma de energia ou conversão:

Figura 19 - Formas de energia, etapas de conversão e falhas associadas



Fonte: Luo (adaptado), 2019.

O principal mérito do diagrama acima é mostrar a bilateralidade dos processos de conversão da energia. Visto que a tensão de alimentação, através de sua magnitude e frequência, proporciona a formação de um campo magnético capaz de interagir com o rotor e fazendo o eixo da máquina girar, qualquer variação elétrica ou mecânica nesse processo terá um efeito que faz o caminho reverso e se manifesta na corrente de alimentação. Isso justifica a sua abrangência sobre as principais falhas em motores elétricos, bem como as relações bem estabelecidas entre falhas e suas harmônicas representadas na corrente do estator, abordadas ao longo desse capítulo e sumarizadas na Tabela 8:

Tabela 8 - Frequências de manifestação de falhas

Falha	Componente no espectro de frequência da corrente no estator
Curto entre espiras	$f_s = (n(1-s)/p \pm k)f$ onde $n=1,2,3,\dots$; $k=1,3,5,\dots$
Barras de rotor quebradas	$f_{stbb} = [\frac{\eta}{p}(1-s) \pm s]f$ onde $\eta/p = 1,3,5,\dots$
Rolamentos	$f_{brg} = f \pm n f_v $ onde $n=1,2,3,\dots$; $f_v =$ Frequência de vibração

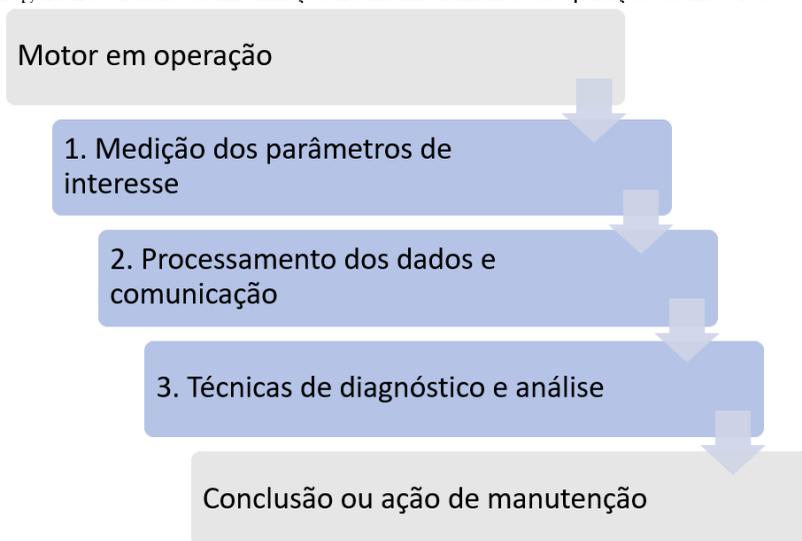
Fonte: Basak (adaptado), 2006.

A dificuldade de se monitorar corrente do estator de maneira modularizável somada à análise das tabelas 5, 6 e 7 justifica a importância do monitoramento de temperatura e dados de vibração durante a operação dos motores, técnica que já se mostra disponível no mercado, como abordado no capítulo 5. Por fim, outros parâmetros obtidos direta ou indiretamente não podem ser descartados, entre eles, o fluxo magnético como avaliado, por exemplo, por Santos (2017) de maneira não invasiva para detecção de falhas incipientes em geradores.

4 SISTEMA TÍPICO PARA O MONITORAMENTO DE CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Dada a importância de se adotar estratégias de manutenção preditiva na indústria e a vasta quantidade de técnicas de diagnóstico já existentes, a obtenção de parâmetros de operação em tempo real, seu processamento e disponibilização passam a ser objetos de interesse de pesquisa. Apesar de que, cada método terá sua particularidade em vista da aplicação e diagnósticos desejados, todos os sistemas de manutenção preditiva aplicados a motores elétricos desde protótipos até soluções comerciais se baseiam no seguinte fluxograma:

Figura 20 - Fluxo da informação no monitoramento da operação de motores

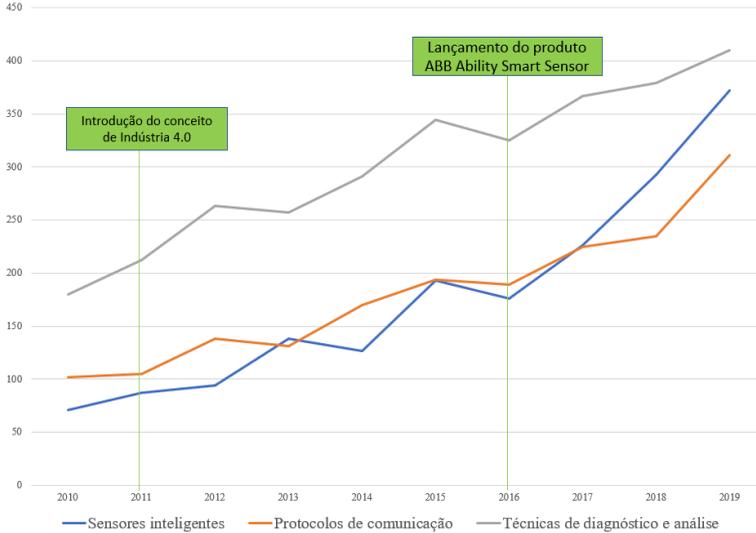


Fonte: autor.

O monitoramento de condições de motores com base na Figura 20 é tão antigo quanto a aplicação dos motores em si, o que muda com o passar do tempo é a eficiência com a qual cada uma das etapas é realizada. Apresentado formalmente pela primeira vez em 2011 (STEFANINI, 2018), o conceito de Indústria 4.0 está intimamente ligado à evolução de todo o processo de manutenção preditiva nos últimos anos. Esse efeito é ilustrado pelo gráfico abaixo, que mostra a evolução da quantidade de artigos científicos relacionados ao monitoramento de condições de

motores elétricos segmentados em 3 grupos: sensores inteligentes, protocolos de comunicação e técnicas de diagnóstico.

Figura 21 - Volume de artigos publicados



Fonte: autor (base de dados: Science Direct, 2020).

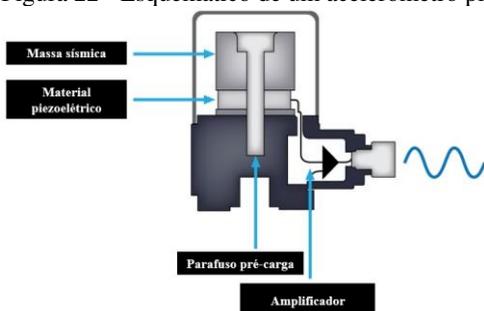
Primeiramente é explícito que os 3 temas apresentam crescimento notável na quantidade de publicações de artigos nos últimos anos e acredita-se que o lançamento da solução comercial ABB Ability Smart Sensor™ em 2016 tenha impulsionado a relevância do assunto. Além disso, a difusão comercial de MEMS (*Micro-electromechanical systems*) tem viabilizado a realização de medidas com um alto nível de precisão a um preço acessível e permitindo a construção de unidades de aquisição compactas. Acredita-se que isso também estimule o estudo de métodos de comunicação sem fio e técnicas de diagnóstico, uma vez que a obtenção facilitada de parâmetros de interesse viabiliza a aplicação comercial de muitas técnicas que antes eram apenas restritas a ensaios e laboratórios. Em resumo, existe muito espaço para o desenvolvimento de tecnologias nas 3 frentes e algumas empresas têm travado verdadeiras corridas para desenvolver sensores menores, meios de comunicação mais eficientes e técnicas de diagnóstico automatizadas.

4.1 MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE INTERESSE

A primeira condição para a realização de um diagnóstico confiável é a acurácia satisfatória dos sensores utilizados, uma vez que leituras feitas por sensores instáveis levarão, quase que certamente, a conclusões incorretas sobre o estado de operação do motor. Também é de interesse para as equipes de manutenção que a sua instalação seja a menos invasiva possível visto que a desmontagem do motor para instalação de sensores específicos é fator de risco para a própria máquina e representa uma quantidade maior de tempo despendido para aparelhagem do sistema de leitura. Por fim, visto que um dos pilares para identificação prévia de falhas é a variação abrupta de parâmetros, a resolução dos sensores não é o principal fator de interesse na configuração do sistema, mas deverá, é claro, contemplar requisitos mínimos para leitura adequada das condições de operação.

Como apresentado no capítulo 3, o monitoramento de vibrações é ferramenta útil para a detecção de defeitos em rolamentos, um dos componentes mais susceptíveis a falhas em motores de indução de baixa e média tensão, o que pode ser feito a partir da instalação adequada de um acelerômetro na própria superfície do motor elétrico. A maior parte dos acelerômetros comerciais têm como princípio de funcionamento o efeito piezoelétrico, no qual uma tensão elétrica surge em cristais presentes no encapsulamento na ocorrência de esforço mecânico (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019).

Figura 22 - Esquemático de um acelerômetro piezoelétrico



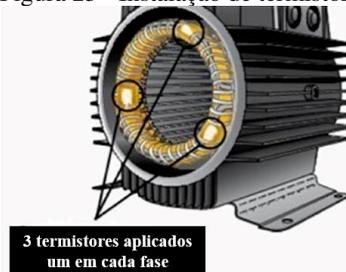
Fonte: National Instruments (adaptado), 2019.

Em vista do grande mercado de monitoramento de vibrações, acelerômetros de 3 eixos se tornaram acessíveis comercialmente, mas ainda apresentam custo mais elevado quando comparados a acelerômetros simples. Cabe às equipes de manutenção a avaliação dos

recursos disponíveis e as necessidades de se utilizar acelerômetros de três ou apenas um eixo. Além de esforços gerais para barateamento, também existem tecnologias alternativas sendo desenvolvidas como, por exemplo, o design de um acelerômetro capacitivo de três eixos extremamente compacto com base em SOI wafers (pastilhas de silício e isolantes) apresentado por Aydemir (2020). Em geral, acelerômetros capacitivos possuem maior sensibilidade quando comparados com acelerômetros piezoelétricos (ENDEVCO, 2020) e podem se tornar uma tendência para pesquisas aplicadas em motores elétricos, como também discutido por Helal (2015).

Outro parâmetro de interesse destacado no capítulo 3 é a temperatura, cuja variação pode ser indício de falhas na bobinagem ou até em barras de rotores. A sua medição comumente é feita via termistores, componentes cuja resistência varia de acordo com a temperatura ambiente. O seu tamanho pequeno que permite a instalação em contato direto com os enrolamentos do estator e sua baixa inércia térmica que dá respostas rápidas a variações de temperatura são alguns dos motivos de sua vasta aplicação na indústria [EDVARD, 2016]. Para análise de falhas em isolamento podem ser montados termistores na proximidade de cada fase, como mostrado na Figura 23, e feita uma associação com, por exemplo, um relé de proteção configurado para ativar um alarme ou abrir um circuito em caso de variações de elevações de temperatura na bobina acima de um determinado limiar.

Figura 23 - Instalação de termistores nas bobinas



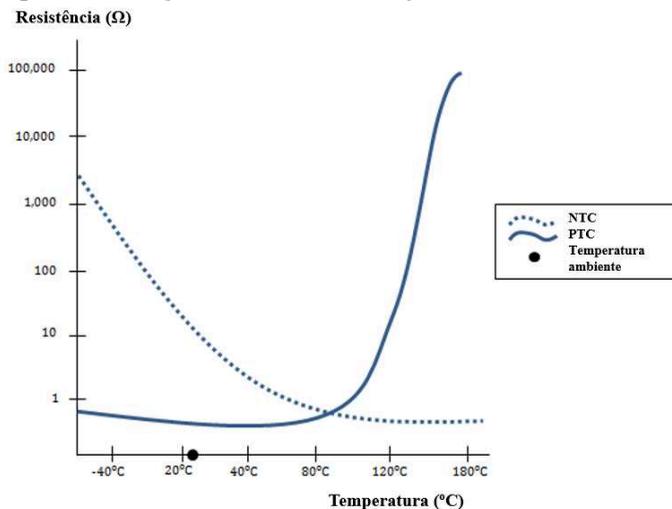
Fonte: Collins (adaptado), 2020.

É evidente que a configuração utilizada na Figura 23 é realizada de maneira invasiva, técnica usada principalmente em máquinas alimentadas por alta tensão, onde a deterioração dos isolantes se configura como a maior causa de falhas. Tal método, no entanto, não é conveniente para máquinas de baixa tensão. A desmontagem do motor para

aparelhagem de termistores nas bobinas é uma das dificuldades que as soluções do capítulo 5 visam resolver, ao realizar as medições de temperatura de maneira não invasiva na própria carcaça do motor com a possibilidade de inferir o nível de estresse térmico ao qual estão sujeitas as bobinas.

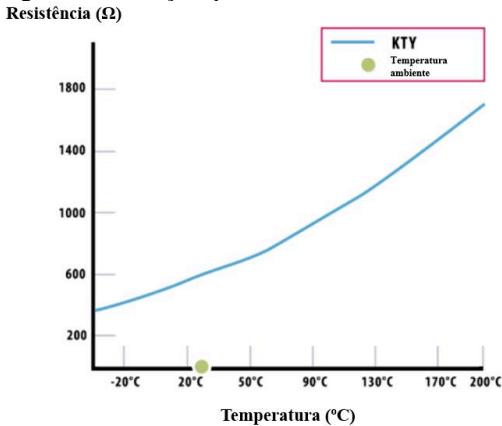
Para escolha adequada do termistor, a sua temperatura de resposta deve ser adequada ao tipo de isolamento aplicado na máquina pois é imprescindível garantir que exista baixa resistência térmica entre o sensor e os condutores. A quantidade e espessura superior de isolantes aplicados a máquinas de alta tensão, somado à alta potência envolvida dificultam a aplicação de termistores nesse tipo de máquina [EDVARD, 2016]. Uma das principais características de termistores é a sua relação não linear entre a resistência e temperatura ambiente ilustrada na Figura 24, propriedade essa que tenta ser contornada por outra alternativa comercial, sensores do tipo KTY constituídos de silício com a relação térmica praticamente linear apresentada na Figura 25. Outra proposta é feita por Mohammed (2018), abordando o uso de uma Grade de Bragg em um fio de fibra óptica, realizando a medição de temperatura em diversos pontos da máquina e, através de modelos matemáticos, analisando o comportamento térmico do motor.

Figura 24 - Relação não linear entre temperatura e resistência do termistor



Fonte: Edvard (adaptado), 2016.

Figura 25 - Relação quase linear de sensores do tipo KTY



Fonte: Edvard (adaptado), 2016.

Entre os parâmetros de interesse avaliados no capítulo 3, nenhum abre a possibilidade para tantos diagnósticos diferentes quanto a alimentação do motor. A sua prática, na maioria das vezes, depende da instalação de transformadores de corrente nos cabos de alimentação, bem como um sistema adequado de processamento dos dados lidos, exigindo esforços das equipes de manutenção para a sua implementação. Existem algumas variações na construção e nos sinais de saída dos sensores de corrente, mas os principais tipos têm base no efeito Hall e podem vir com braçadeiras para facilitar a montagem, como mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Medidor de corrente



Fonte: Kohsin Electric Corporation.

Em casos onde a instalação de transformadores de corrente for inviável e tendo em mente o diagrama da Figura 19, existem formas alternativas e indiretas de se obter dados sobre a alimentação elétrica do

motor. Kai (2011), por exemplo, apresenta um estudo onde uma bobina é montada em uma ranhura do estator para, a partir do fluxo magnético no entreferro, medir a tensão de indução do motor. Após processamento digital e levando em conta o circuito equivalente do motor, é calculada a corrente no rotor a partir da tensão obtida. Alternativamente, para o caso de motores alimentados por inversores de frequência, Orkisz (2008) mostra que, contornando o controle realizado pelo *drive* para ajuste da frequência, esses dispositivos podem ser usados como fonte de informação para diagnóstico.

Além de menores e mais precisos, é possível que a principal tendência dos últimos anos seja a possibilidade de se agrupar diferentes sensores em um módulo único, não invasivo e de fácil instalação na máquina elétrica. O lançamento do produto ABB Ability Smart Sensor™ em 2016 disponibilizou uma outra forma de avaliação das máquinas para as equipes de manutenção, ao ponto que, nos anos seguintes, uma série de produtos comerciais com a mesma finalidade foram lançados. Em decorrência disso, desenvolvimento de sensores cada vez menores, comumente associados ao conceito de MEMS, tem sido alvo de grande quantidade de pesquisadores (TSAKALAKOS, 2013).

Em suma, para cada parâmetro de interesse existirá um método específico para a sua obtenção. Por exemplo magnetômetros podem fazer a medição de fluxo no entreferro para identificar barras de rotor quebradas em motores de indução (WILDERMUTH, 2015). Cada caso deve ser avaliado em termos de existir ou não a possibilidade de leitura direta do parâmetro, instalação do sensor resistente a aplicação do motor, possibilidade de integração com outros sensores de forma modular e associação do conjunto a um método de comunicação adequado, assunto discutido no próximo tópico.

4.2 PROCESSAMENTO DE DADOS E COMUNICAÇÃO

Plantas industriais, dependendo da aplicação, podem ser ambientes inconvenientes para a permanência de pessoas, fatores como altas temperaturas e a atmosfera carregada com resíduos dos processos industriais levam algumas empresas a planejar de maneira extremamente restritiva a circulação dos colaboradores pelas suas instalações. Além disso, a probabilidade da ocorrência de acidentes de trabalho também aumenta com a presença desnecessária de pessoas na proximidade de processos e máquinas, tornando relevante o desenvolvimento de tecnologias que reduzam o fluxo de funcionários nesses ambientes. Por exemplo, uma equipe de manutenção que adota estratégia de manutenção

preventiva irá circular frequentemente nas dependências da fábrica para a realização de ensaios e eventuais manutenções, carregando consigo uma série de instrumentos de teste. Se, além de mudar para uma estratégia de manutenção preditiva, essa equipe puder acompanhar os parâmetros de operação da máquina sem necessariamente estar em sua proximidade, é possível reduzir a circulação dos colaboradores pelo parque fabril e o tempo antes direcionado para as tarefas de manutenção poderá ser realocado para outras atividades.

Isso tem se tornado possível nos últimos anos graças à integração de módulos de comunicação sem fio aos sensores instalados nas máquinas elétricas. Além de permitir o diagnóstico à distância, esse conceito reduz a quantidade de cabos instalados na proximidade das máquinas, principalmente se o conjunto compreendido pelo sensor e o módulo de comunicação for alimentado eletricamente por uma bateria. Elementos que aproveitam a energia obtida pela vibração do motor para alimentar o conjunto, também chamados de *energy harvester* (SHIMANOUCI, 2013) ajudam a estender a vida útil das baterias e viabilizar a alimentação sem fio. Parte significativa das soluções do capítulo 5 não compreendem meios para a troca de baterias, por isso a importância da escolha de um protocolo de comunicação com baixo consumo de energia.

O Wi-Fi é um método extremamente difundido em ambientes residenciais, comerciais e industriais, no entanto, seu elevado consumo de energia limita o desenvolvimento de soluções sem fio de monitoramento, obrigando o uso de outras tecnologias com alcance equivalente e menor consumo de energia. A tecnologia LoRa, por exemplo, pode fazer transmissões sem fio a distâncias de até 4 km em áreas urbanas usando potências da ordem de 100 mW (ALMEIDA, 2019). Essas características permitem a transmissão de dados com qualidade mesmo através de paredes e são fundamentais para a instalação de módulos de medição e comunicação em ambientes enclausurados, como câmaras frias.

Indiscutivelmente o consumo de energia é umas das principais condições de contorno para escolha da solução adequada, mas esse é apenas um dos muitos critérios comparativos entre os diferentes protocolos de comunicação aplicáveis. Shahzad (2014) avalia espectro de frequência, topologia de nós, alcance e outros fatores de maneira comparativa entre Wi-Fi, Bluetooth e Zigbee, como mostrado na Tabela 9. Cabe ressaltar que foi avaliada a versão 4.0 do Bluetooth, no entanto sabe-se que já há testes e implementações em algumas aplicações da versão 5.0 com capacidade de alcance maior.

Tabela 9 - Comparativo entre protocolos de comunicação

Protocolo	ZigBee	BLE 4.0	Wi-Fi
Código IEEE	802.15.4	802.15.1	802.11 b/g/n
Espectro de frequência	868/915 MHz; 2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz, 5 GHz
Topologia	Estrela, malha, <i>cluster tree</i>	Estrela, ponto a ponto	Estrela, ponto a ponto
Tamanho da rede	65536	Não definido	32
Taxa de dados (Mbps)	0.02 – 0.25	1	11/ 54/600
Recursos do sistema	4 kB – 32 kB		1 MB+
Alcance (m)	< 100	< 50	< 100
Número de canais	1/10/16	40	11-14 (3 Ortogonal)
Segurança	128-AES	128-AES	SSID

Fonte: Shahzad (adaptado), 2014.

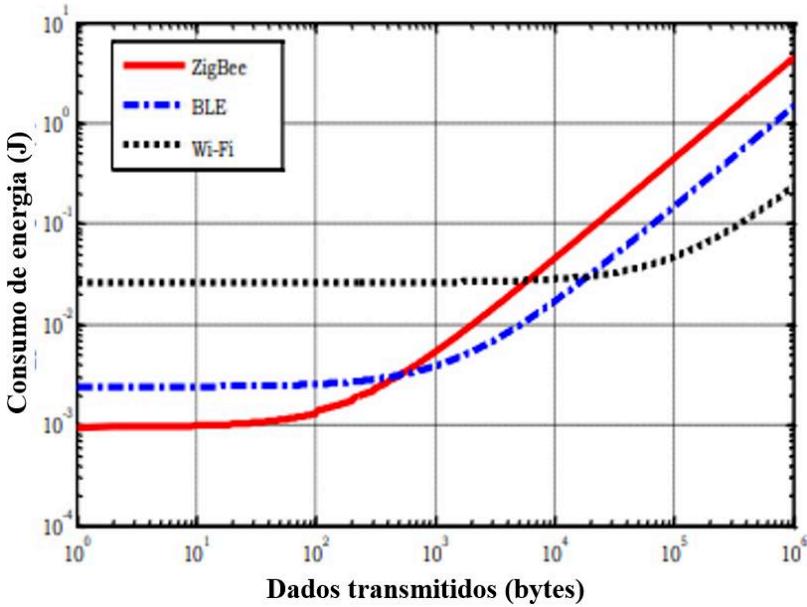
No estudo proposto por Shahzad (2014), a partir dos parâmetros específicos de módulos avaliados, para cada tipo de protocolo exposto na Tabela 10 - Dados dos módulos de comunicação para teste foi avaliado o consumo de energia para cada um dos métodos variando-se a quantidade de dados transmitidos. Os resultados estão expostos na Figura 27.

Tabela 10 - Dados dos módulos de comunicação para teste

Protocolo	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi	
Conjunto	(CC2520)	(CC2540)	(CC3000)	
Tensão de operação (V)	3.0	3.0	3.6	
Consumo de corrente	Modo de descanso (uA)	0.03	0.4	0.5*
	Modo ocioso (mA)	1.6	N.A	N.A
	Modo de recepção (mA)	18.5	15.8	92.0
	Modo de transmissão (mA)	25.8	21.0	190.0
Tempo entre descanso e tr/rec (ms)	0.5	0.5	60*	
Tempo de conexão(ms)	15	400	4000	
Taxa de dados (Mbps)	0.25	1	54	
Tamanho do pacote de dados (bytes)	127	47	2346	
* Desligado				

Fonte: Shahzad, 2014.

Figura 27 - Desempenho comparativo em termos de consumo de energia



Fonte: Shahzad, 2014.

Um das informações que mais chama a atenção na Tabela 10 é o tempo de conexão de cada protocolo, muito menor para o Zigbee e que acaba refletindo em um consumo menor desse tipo de protocolo para uma baixa quantidade de dados (até 500 bytes aproximadamente). Para grandes quantidades de dados (acima de 200000 bytes aproximadamente), o Wi-Fi passa a ser a opção mais econômica. Em termos de largura de faixa, o Bluetooth acaba prevalecendo como escolha, por ter a faixa mais compatível com um fluxo de dados típico de um sistema de monitoramento de condições de máquinas (SHAHZAD, 2014). Como outra vantagem, o Bluetooth possui fácil conectividade com *smartphones* e outros aparelhos de fácil manuseio pelos colaboradores enquanto transitam pelas plantas industriais.

Adicionalmente, o estudo avaliou a implementação de um sistema responsável por fazer um pré-processamento de dados via controlador ainda no módulo de medição. Foi constatado que, para os 3 protocolos de comunicação avaliados, o consumo de energia na comunicação é menor quando os dados passam por etapas de filtro, transformada de Fourier e similares antes de sua transmissão. No entanto é evidente que, apesar da economia de energia na comunicação, a

integração de módulos para pré-processamento dos sinais representa desafios grandes para fins de design e projetos de soluções replicáveis em dimensões reduzidas.

As conclusões expostas nesse estudo justificam o fato de parte das soluções de sensores integrados à módulos de comunicação utilizarem o protocolo Bluetooth, no entanto ao verificar novamente a Tabela 9 é possível ver que o alcance máximo desse tipo de dispositivo fica limitado a 50 metros. Diferentemente de laboratórios de ensaio, parques fabris podem se estender por até centenas de metros, o que inviabiliza a análise de diferentes motores elétricos em um só lugar, a não ser que algum outro dispositivo faça essa ponte entre os dados obtidos e uma plataforma fácil para sua visualização. Nesse contexto entram os *gateways*, responsáveis por coletar os dados de leitura e enviá-los para a nuvem, ocupando o mínimo de espaço físico na proximidade das máquinas. A solução WEG Motor Scan™ apresenta um *gateway* associado como opção de compra (WEG, 2019), uma vez disponibilizados na nuvem, os dados podem ser compartilhados das mais variadas formas para uma grande quantidade de dispositivos e pessoas.

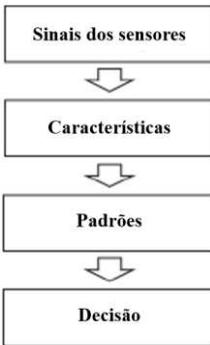
4.3 TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO

Algumas das principais técnicas de diagnóstico de falhas em motores elétricos foram discutidas no capítulo 3 e grande parte dos estudos destacados são frutos de anos de colaboração científica e especialização técnica de profissionais. Após grande tempo de experiência um analista pode identificar sinais típicos de falhas em espectros de frequência de vibração ou corrente do estator de maneira ágil e a possibilidade de receber dados de diversas máquinas de maneira fácil permite a realização de diversos diagnósticos em um curto período de tempo. Uma vez na nuvem, os dados podem ser apresentados inclusive em *smartphones*, permitindo que um especialista apresente um parecer técnico sobre uma máquina a quilômetros de distância.

Está claro que o processo de monitoramento de condições de motores elétricos ganha muito em eficiência quando emprega um modelo de comunicação sem fio e disponibilização fácil dos dados. Mas e se, além da comunicação, etapas de diagnóstico e análise também fossem contempladas por algoritmos matemáticos? Existem diversos estudos envolvendo técnicas de inteligência artificial, aprendizado de máquina e similares para inferir, a partir de dados de operação do motor, a possibilidade de ocorrência de falha. Por exemplo Pandarakone (2019)

aplica, com sucesso, algoritmos baseados em *Deep Learning* e *Support Vector Machine* treinados para identificar falhas em rolamentos em um motor de indução. Independentemente de serem realizados por análise humana ou virtual, as principais etapas de um processo típico de diagnóstico podem ser sumarizadas como na Figura 28 proposta por Luo (2019):

Figura 28 - Fluxo de informação no monitoramento de condições de motores elétricos



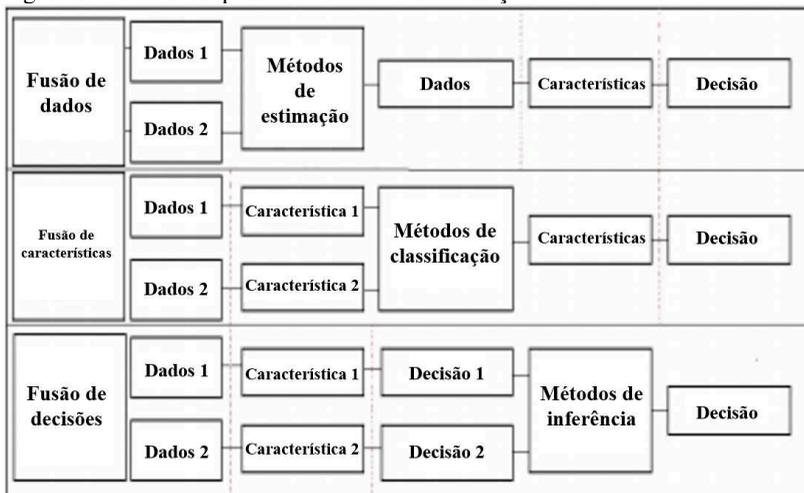
Fonte: Luo (adaptado), 2019.

Já foi mostrado anteriormente que existem inúmeros parâmetros de operação que podem servir de entrada para o fluxograma da Figura 28. No capítulo 3 foi mencionada a possibilidade de se utilizar sensores de temperatura instalados em diversos pontos da máquina para, através de modelos matemáticos, estimar a temperatura em componentes de interesse. Esse tipo de sistema, composto por sensores que medem a mesma grandeza física, é classificado por Luo (2019) como um sistema de múltiplos sensores homogêneos. De maneira equivalente, conjuntos de sensores que medem grandezas físicas diferentes são classificados como heterogêneos e abrem porta para a correlação de diferentes parâmetros de operação do motor. É fato que, quanto mais dados forem disponibilizados sobre a operação da máquina, maior a possibilidade de se identificar a ocorrência de falhas, no entanto é importante ter em mente que mesmo sinais de grandezas diferentes podem refletir um mesmo efeito e serem redundantes em termos de diagnóstico (LUO, 2019). Por exemplo, uma falha em rolamentos produz efeitos que são visíveis nos espectros de frequência das vibrações no mancal e da corrente de alimentação do estator, tornando essas informações redundantes uma em relação a outra para esse diagnóstico. Um dos objetivos do monitoramento de vários

parâmetros de operação é utilizá-los da maneira mais complementar possível, pois o cruzamento de informações sobre duas grandezas físicas abre uma nova dimensão para identificação de padrões e, conseqüentemente, pode auxiliar na tomada de decisão.

Esse pressuposto abre outro tipo de discussão, qual a etapa mais adequada da Figura 28 para se fazer a fusão de dados de diferentes fontes? Luo (2019) aborda três possíveis pontos de fusão de informações e sumariza-os no diagrama da Figura 29:

Figura 29 - Possíveis pontos de fusão de informações



Fonte: Luo (adaptado), 2019.

A primeira proposta é realizar a integração dos dados ainda sob forma das medições obtidas pelos sensores, tendo como principal vantagem a obtenção de maior acurácia dos dados lidos através da confirmação de diferentes leituras. Como mencionado por Luo (2019) e citado no tópico 4.1, para o monitoramento de condições de operação de motores elétricos, a identificação de variações que podem denotar instabilidade ou falhas em componentes do motor é mais importante do que a acurácia de leitura dos sensores em si. Nem por isso tal prática deve ser descartada, afinal métodos que se baseiam, por exemplo, no cálculo do torque elétrico (HENAO, 2014) ou na potência instantânea (KAPOOR, 2014) de maneira indireta se enquadram nessa categoria.

A segunda proposta apresentada é fazer a fusão das informações uma vez que já tenha sido feito algum tipo de processamento como, por

exemplo, a sobreposição de espectros de frequência de dados de vibração e corrente. Sob a óptica de soluções comerciais escalonáveis é uma prática que não necessita conhecer a relação matemática direta entre as duas ou mais características obtidas, diferentemente da fusão sob forma dos parâmetros medidos (LUO, 2019). Isso é importante, pois dispensa o conhecimento das características construtivas do motor para se extrair correlações de interesse, abrindo a porta para a aplicação em uma gama maior de motores elétricos, critério importante para fins comerciais.

Por último, o método de fusão das decisões, também chamado de inferência, faz a sobreposição de diagnósticos feitos individualmente a partir de cada parâmetro para a tomada de decisão sobre a necessidade de manutenção, podendo utilizar métodos de lógica difusa ou de ponderações sobre as conclusões obtidas. Segundo Luo (2019), a fusão no final da cadeia faz com que ocorra uma perda de informações, principalmente no que diz respeito a correlações de dados que se manifestam com menor intensidade, aspecto extremamente negativo quando almeja-se identificar com antecedência o surgimento de falhas.

5 SOLUÇÕES COMERCIAIS

O vasto mercado de monitoramento de condições de motores elétricos atraiu diversas empresas para desenvolver módulos de sensores que, instalados de maneira fácil na superfície de motores elétricos, pudessem prover informação suficiente para a realização de diferentes diagnósticos. Além da comunicação sem fio, a maioria das empresas oferece como parte da solução uma plataforma para visualização dos dados, facilitando a rápida difusão das leituras feitas entre os colaboradores das empresas que adquirem o produto. Todos os produtos analisados compreendem ao menos um acelerômetro e um sensor de temperatura e, na Tabela 11 são comparadas as dimensões do encapsulamento de cada solução, faixa de medições do acelerômetro, protocolo de comunicação utilizado e, por fim, vantagens e desvantagens. Em seguida cada solução é discutida individualmente.

Tabela 11 - Comparativo entre produtos identificados

EMPRESA	DIMENSÕES (cm)	FAIXA DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO MEDIDA (HZ)	PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO / OFERECE GATEWAY?	VANTAGENS	DESvantagens
ABB Ability Smart Sensor	13x7,7x1,6	10-1000	Bluetooth / Sim	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicável em motores de outras empresas - Há previsão de incluir técnicas de diagnóstico automatizadas no software - Magnetômetro para obter frequência de operação. 	- Não é possível substituir bateria
WEG Motor Scan	2,5x4,4x3,8	1-820	Bluetooth / Sim	<ul style="list-style-type: none"> - Há previsão de incluir técnicas de diagnóstico automatizadas no software - Conjunto pequeno de montagem simplificada - Aplicável em máquinas de outras empresas - Magnetômetro para obter frequência de operação 	- Não é possível substituir bateria
Siemens Simotic Connect	12,5x7,6x2,9	Não informado	Bluetooth; Wi-fi / Sim	<ul style="list-style-type: none"> - É possível substituir a bateria - Magnetômetro para obter frequência de operação 	<ul style="list-style-type: none"> - Só é aplicável em motores Siemens - Baixo nível IP (IP54)
SKF CWMA 8800	3,5x3,5x10	10-1000	Wireless Hart / Sim	<ul style="list-style-type: none"> - Aparenta possuir técnicas avançadas para diagnóstico de rolamentos no software - Aplicável em máquinas diversas 	- Não é possível substituir bateria
Schaeffler Optime	Não informado	Não informado	Não informado / Sim	<ul style="list-style-type: none"> - Aparenta formar uma malha de comunicação entre os sensores - Aplicável a máquinas diversas 	
AMC Vibro AVS 2000R	6,5x14x6,5	1-10000	Zigbee / Sim	<ul style="list-style-type: none"> - Faixa larga de medição de vibração - Comunicação via Zigbee com alcance de até 150m - Aplicável a máquina diversas 	<ul style="list-style-type: none"> - Transmissão dos dados não é feita diretamente para <i>smartphones</i>. - Generalidade das aplicações impossibilita diagnósticos automáticos
Tediasens LN-Series	5x5x2	0,3-10000	Zigbee / Sim	<ul style="list-style-type: none"> - Faixa larga de medição de vibração - Comunicação via Zigbee com alcance de até 150m - Aplicável a máquinas diversas 	<ul style="list-style-type: none"> - Generalidade das aplicações impossibilita diagnósticos automáticos
Dol Group Smart Kit	9,2x6x2,5	1-6600	Bluetooth / Não	<ul style="list-style-type: none"> - Microfone para medição de níveis acústicos 	- Conjunto consiste de dois dispositivos

Fonte: Autor.

5.1 ABB ABILITY SMART SENSOR

ABB Ability™ trata de uma solução para o monitoramento de condições de operação de equipamentos de diversas indústrias com base no ABB Ability™ Smart Sensor, conjunto de sensores encapsulados e integrados a um módulo de comunicação sem fio (ABB, 2020). Para a aplicação em motores elétricos, o conjunto é acoplado centralmente na carcaça do motor como indicado na Figura 31 e possui as características da Tabela 12.

Figura 30 - ABB Ability Smart Sensor™



Fonte: ABB, 2020.

Figura 31 - Montagem do ABB Ability Smart Sensor™ na carcaça do motor



Fonte: ABB,2020

Tabela 12 - Dados gerais ABB Ability Smart Sensor™

Dados – ABB Ability Smart Sensor		
Aplicações	Motores de Indução e Síncronos	
Aplicável a que tamanhos de carcaça?	IEC	56 - 500
	NEMA	42 - 449
Atende motores de velocidade variável?	Sim	
Atende motores de outros fabricantes?	Sim	
Temperatura do ambiente de operação (°C)	-40 até 80	
Classe IP	IP66	
Peso (kg)	0,26	

Fonte: ABB,2019.

O encapsulamento da Figura 30 contém um sensor de temperatura e um acelerômetro de três eixos alimentados por uma bateria de permanganato de lítio. O sistema utiliza comunicação Bluetooth e dependendo das condições de temperatura de operação e do ambiente, tem vida útil de 3 a 5 anos uma vez que a bateria não pode ser trocada [ABB, 2019]. Esses e outros dados técnicos estão dispostos na Tabela 13:

Tabela 13 - Dados técnicos ABB Ability Smart Sensor™

Dados técnicos - ABB Ability Smart Sensor			
Sensores	Temperatura	Faixa de medição (°C)	-40 até 85
		Resolução (°C)	0,05
		Acurácia (°C)	+/- 0,5
	Vibração	Amplitude (mm/s)	0,04 até 700
		Faixa de frequência (Hz)	10 até 1000
Comunicação	Tipo	Bluetooth	
	Alcance (m)	Celular	1 até 10
		Gateway	50
Bateria	É possível trocar?		Não
	Expectativa de vida (anos)		3 até 5

Fonte: ABB, 2019.

Assim como ilustrado no capítulo 4, os dados de operação dos motores são enviados para a nuvem via celular ou *gateway* para uma plataforma própria da empresa que, além de disponibilizar os dados para outros dispositivos, apresenta um parecer prévio sobre as condições de

operação da máquina, classificando-a em três categorias, ilustradas na Figura 32. Não são informadas as técnicas de diagnóstico por trás desse parecer, sendo apenas informado que leva em conta uma quantidade robusta de dados históricos de operação de motores de baixa tensão.

Figura 32 - Classificação de risco de operação dos motores

	VERMELHO Questão crítica - falha provável em breve. Agir o mais rápido possível.
	AMARELO A operação pode continuar, mas o motor deve ser observado de perto e deve passar por manutenção na próxima oportunidade possível.
	VERDE O motor está funcionando bem - a operação pode continuar.

Fonte: ABB, 2017.

Essa classificação, também conhecida como visor de semáforo, permite a ação rápida em casos de emergência (sinal vermelho) sem a necessidade de um especialista para chegar à mesma conclusão através de dados de vibração e/ou temperatura. Em casos de atenção (sinal amarelo), há tempo para programar uma pausa de acordo com as necessidades da produção e um especialista poderá analisar o histórico da máquina para orientar as ações de manutenção.

5.2 WEG MOTOR SCAN™

Lançado comercialmente em 2018 (WEG, 2018), o WEG Motor Scan™ também é um conjunto formado por acelerômetro de 3 eixos, sensor de temperatura, bateria e módulo de comunicação sem fio envolvidos por um material Epoxy e acoplados à carcaça do motor (WEG, 2020). A bateria de lítio usada para alimentar o sistema dá uma garantia de vida de até 3 anos dependendo das condições do ambiente e do motor.

Figura 33 - WEG Motor Scan™



Fonte: WEG, 2020.

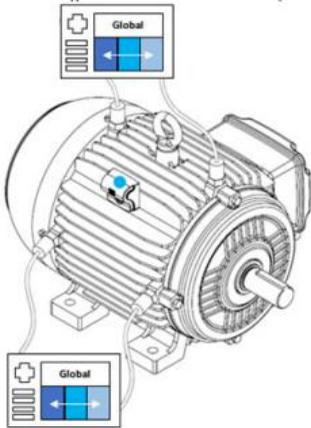
Figura 34 - Montagem do WEG Motor Scan™ na carcaça



Fonte: WEG, 2020.

Para a solução apresentada pela WEG e de outras empresas é preciso ter em mente que, devido ao posicionamento na lateral da carcaça, as leituras de vibração não trazem o mesmo resultado das leituras realizadas nos locais recomendados para o diagnóstico de falhas em rolamentos, ou seja, no mancal dos motores. No caso do WEG Motor Scan™ esse aspecto é abordado no manual geral de instalação do produto (WEG, 2020). Destaca-se que o objetivo final é identificar variações significativas dos parâmetros, como ilustrado na Figura 35, onde pode haver diferença entre a medida feita pelo WEG Motor Scan® e os acelerômetros instalados nos mancais da máquina.

Figura 35 - Posicionamento e leitura do WEG Motor Scan™ em comparação com acelerômetros



Fonte: WEG, 2020.

De construção e montagem mais simples quando comparado à solução proposta pela ABB, o WEG Motor Scan™ também pode ser aplicado e máquinas diversas para observância de variações no parâmetros de operação.

Tabela 14 - Dados gerais WEG Motor Scan™

Dados gerais - WEG Motor Scan		
Aplicações	Motores de Indução e Síncronos	
Tamanho da carcaça	IEC	63-450
Atende motores de velocidade variável?	Sim	
Temperatura do ambiente de operação (°C)	-40 até 80	
Classe IP	IP66	
Peso (kg)	0,06	

Fonte: WEG, 2020.

Como todos os dados são enviados para a nuvem, além de analisar individualmente o desempenho de cada motor, é possível ter um panorama sobre a frota inteira de motores conectados. Critérios de alarme podem ser definidos para as leituras de vibração e temperatura para uma categorização das máquinas com base na classificação de visor de

semáforo (WEG, 2020), criando assim um panorama geral de todos os motores monitorados, como ilustrado na Figura 36:

Figura 36 - Classificação de motores em operação



Fonte: WEG, 2020.

5.3 SIEMENS SIMOTIC CONNECT™

Em 2017, a empresa alemã Siemens lançou o produto Simotic Connect 400™, um conjunto de sensores integrados a um módulo de comunicação que permite a avaliação de maneira digital dos motores da linha Simotics™. A primeira desvantagem evidente é a aplicação restrita a linha de motores da própria empresa, o segundo ponto negativo é o grau de proteção IP54 do produto (SIEMENS, 2019), inferior aos concorrentes ABB Ability Smart Sensor™ e WEG Motor Scan™.

Figura 37 - Siemens Simotic Connect™ montado na carcaça de um motor



Fonte: Siemens, 2019.

Assim como as outras soluções, o conjunto é montado nas aletas laterais da carcaça, em uma posição predeterminada do invólucro da máquina onde colas ou adesivos industriais são o suficiente para aderir o componente no motor (SIEMENS, 2020). Os parafusos vistos na Figura

37 são apenas para remover a tampa, o que pode ser visto como uma vantagem pois permite a troca das baterias de Lítio do sistema, como mostrado na Figura 38. Dependendo do modo de operação, estima-se uma vida útil de dois anos para as baterias utilizadas.

Figura 38 - Conjunto aberto e bateria



Fonte: Siemens, 2019.

Não são reveladas informações técnicas sobre os sensores utilizados e o produto da Siemens contém, além de um acelerômetro e um sensor de temperatura, um sensor de fluxo magnético. Pela revisão feita no capítulo 3, sabe-se que um dos problemas de utilizar o campo magnético como parâmetro para monitoramento das condições do motor é o fato de ele estar intimamente ligado à geometria da máquina em questão. Isso pode justificar o fato de a empresa ter desenvolvido uma solução inicialmente aplicável apenas às suas máquinas, no entanto existem evidências de que a empresa ruma para uma solução de maior modularidade. Grahn (2018) apresenta um extensivo estudo acerca do uso da solução da Siemens para outros motores elétricos, abordando assuntos como a estimação da geometria do motor e até um método para a criação de um *digital twin* do motor a partir dos dados de placa do motor analisado. Os resultados foram pouco satisfatórios.

5.4 SKF CWMA 8800™

A SKF é uma empresa sueca destaque no setor de rolamentos que lançou em 2015 um conjunto contendo acelerômetro e sensor de temperatura facilmente acoplável à carcaça de máquinas e com módulo de comunicação (Wireless HART™) sem fio integrado (SKF, 2015). Apesar de ter sido lançado antes do produto ABB Ability Smart Sensor™, o SKF CWMA 8800™ não causou o mesmo impacto no mercado, provavelmente pelo enfoque dado apenas ao diagnóstico das condições

de rolamentos. Isso também faz a sua construção diferir um pouco das soluções analisadas até agora, tendo um formato com menor área de contato com a máquina, visando fácil instalação no mancal de motores.

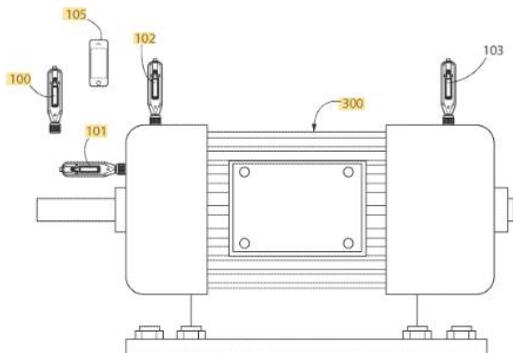
Figura 39 - SKF CWMA 8800™



Fonte: SKF, 2015.

Assim como a solução da Siemens, o conjunto é alimentado por baterias de Lítio que podem durar até 5 anos dependendo das condições de operação. A SKF comercializa o produto juntamente a gateways para fazer a transferência dos dados para a rede da empresa que adquirir o sistema. O software CMSW 8810™ também é comercializado e permite a análise dos dados lidos pelos sensores, entre visualizações básicas dos dados e espectros de frequência, a empresa também possui uma série de patentes abordando técnicas de diagnóstico a partir de dados obtidos via acelerômetros (THOMSON, 2017) (THOMSON, 2016) (MURPHY, 2013). Murphy (2016) propõe a aplicação de mais de um sensor no mesmo motor em uma patente sobre um método de sincronização dessa pluralidade de sensores que, apesar de não ser restrita a motores elétricos, é ilustrada através da Figura 40 como uma das possíveis formas de aplicação.

Figura 40 - Pluralidade de sensores instalados em um motor elétrico



Fonte: Murphy, 2016.

5.5 SCHAEFFLER OPTIME™

Produto ainda não disponível no mercado, o Schaeffler Optime™ será lançado oficialmente no dia 01/07/2020 (SCHAEFFLER, 2020), tendo poucas informações técnicas disponíveis sobre o módulo de sensores que será comercializado pela empresa alemã. O que se sabe é que o conjunto contém ao menos um acelerômetro, um sensor de temperatura, um módulo de comunicação sem fio e possui aspecto ornamental semelhante ao SKF CWMA 8800.

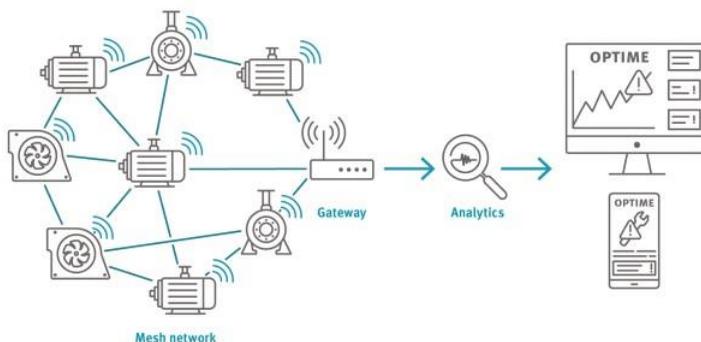
Figura 41 - Schaeffler Optime™



Fonte: Schaeffler, 2020.

Outra semelhança com o produto da SKF está na interação entre os dispositivos medidores. Assim como foi identificada uma patente da empresa sueca que descrevia a sincronização de diferentes conjuntos de sensores, a solução Schaeffler Optime™ também viabiliza a formação de uma malha de comunicação entre os dispositivos (SCHAEFFLER, 2020). Não está explícito no conteúdo divulgado, mas usando os próprios módulos de sensores como transmissores de informações coletadas em outros módulos, é possível reduzir a quantidade de gateways necessários na planta para o envio de informações para a nuvem. Tudo indica que a empresa também ofereça uma solução para fácil análise dos dados coletados e gestão da frota de motores nos quais os sensores foram instalados.

Figura 42 - Malha de comunicação entre sensores



Fonte: Schaeffler, 2020.

5.6 AMC VIBRO AVS 2000R™

A AMC Vibro é uma empresa polonesa de soluções para sensoriamento de máquinas, seu produto AVS 2000R™ é composto por dois acelerômetros de um eixo cada, um sensor de temperatura e um módulo de comunicação via Zigbee (AMC VIBRO, 2020), o conjunto é alimentado por uma bateria que pode durar até 8 anos (duas medições realizadas por dia). Essa vida útil apresentada não é uma vantagem significativa pois a realização de apenas 2 medições por dia pode não ser o suficiente para identificar em estado de operação crítica a tempo de intervir em determinadas máquinas. A escolha do protocolo de comunicação, no entanto, apresenta algumas vantagens, como um alcance até 3 vezes maior e menor susceptibilidade a interferências por obstáculos quando comparado com Bluetooth e Wi-Fi (NEWSTEO, 2020). A

desvantagem da comunicação via ISM 868 reside no fato de não ser possível realizar uma comunicação direta entre os sensores e com dispositivos que conhecidamente possuem apenas Bluetooth, como *smartphones*.

Figura 43 - AVS 2000R™



Fonte: AMC Vibro, 2020.

Os sensores da empresa também podem se comunicar com um gateway que possui protocolos de comunicação OPC UA e Modbus TCP, permitindo interação direta com sistemas de controle das máquinas. Os dados podem ser analisados em uma aplicação online, essa livre de custos e contratação e que não possui descrição detalhada de suas funcionalidades. Além disso é um produto indicado para diferentes tipos de maquinário, como bombas, motores e compressores, positivo por abranger uma maior quantidade de processos, mas negativo por ser incapaz de prover diagnósticos precisos sobre as condições de operação das máquinas que monitora.

Figura 44 - Comunicação do gateway AMC



Fonte: AMC Vibro, 2020.

5.7 TEDIASENS LN SERIES™

Tediasens é uma empresa alemã que oferece soluções de monitoramento de vibrações para equipamentos diversos, desenvolvendo sistemas sob medida como forma de serviço. Seu sistema de monitoramento sem fio é constituído por um módulo (LOGGING-NODE LN-I) que contém um acelerômetro de 3 eixos, um sensor de temperatura, uma bateria que pode durar até 10 anos e um módulo de comunicação sem fio seguindo padrão ZigBee (TEDIASENS, 2020). Entre suas vantagens estão as dimensões pequenas e larga faixa de medição de frequência de vibração, além das aplicações de monitoramento de máquinas a empresa também oferece o produto para testes de impacto e aceleração de corpos.

Figura 45 - Tediasens LN Series™



Fonte: Tediasens, 2020.

Além do módulo com acelerômetro e sensor de temperatura já montados, a empresa possui um produto chamado LOGGING-NODE LN-X, no qual podem ser conectados até 4 sensores instalados em diferentes pontos das máquinas para que todos os dados sejam enviados de maneira fácil para um software de análise. Assim é viabilizada uma forma fácil de fazer a medição de parâmetros particulares à aplicação do motor em questão. O dispositivo possui dimensões maiores do que o conjunto de medição e uma antena para aumentar o alcance da transmissão sem fio, como visto na Figura 46. Uma vez no software da empresa para análise dos dados medidos, alarmes podem ser definidos para níveis de vibração, temperatura e outros sinais obtidas.

Figura 46 - LOGGING NODE™



Fonte: Tediasens, 2020.

5.8 MONNIT™

Monnit é uma empresa americana que trabalha com sistemas de IoT em geral para a indústria, oferecendo sensores, gateways e software para visualização dos dados. Ao invés de comercializar um módulo com diferentes tipos de sensores integrados, a empresa opta por comercializar uma quantidade significativa de sensores diferentes, sempre conectados a um módulo de comunicação sem fio. Além de acelerômetros e sensores de temperatura, entre as empresas analisadas até agora, a Monnit é a única a oferecer um sensor de comunicação sem fio para fazer leitura de tensão e corrente de alimentação (MONNIT, 2020). A sua instalação evidentemente é mais complicada quando comparada com o de sensores montados sobre a carcaça, mas a variedade de diagnósticos possíveis através da análise da corrente do estator faz dessa uma solução de potencial comercial.

Figura 47 - Medidor de corrente trifásico Monnit



Fonte: Monnit, 2020.

Apesar da instalação dificultada para a medição da corrente de alimentação, o conjunto possui uma antena que permite uma transmissão de dados a uma distância de aproximadamente 300 metros (MONNIT, 2020), diminuindo assim a quantidade de gateways necessários e dispensando a formação de uma malha de dispositivos para transmitir os dados medidos. De qualquer forma a empresa também oferece uma grande variedade de gateways e softwares para análise dos dados. Suas baterias podem ser trocadas e possuem vida útil de até 10 anos, período esse que depende do da frequência de transmissão de dados.

5.9 DOL GROUP™

Dol Group é uma empresa indiana que desenvolveu uma solução para o monitoramento de condições de operação de motores elétricos. Seguindo moldes semelhantes às outras empresas já discutidas, seu diferencial é contemplar medições de níveis sonoros através de um microfone junto ao acelerômetro. Como característica negativa, o conjunto compreende dois itens, um encapsulamento para o acelerômetro e o microfone somado a um encapsulamento para alimentação do primeiro item e medição de temperatura, sendo a alimentação realizada por um fio como ilustrado na Figura 48.

Figura 48 - Montagem da solução da DOL Group



Fonte: DOL Group, 2020.

O conjunto se comunica via Bluetooth e os dados podem ser analisados em *smartphones* ou softwares providos pela empresa. Entre as funcionalidades dos programas estão a análise de espectros de frequência, geração de relatórios automáticos e definição de alertas para limites preestabelecidos dos parâmetros monitorados.

6 CONCLUSÕES

A manutenção preditiva é o futuro e também o presente das equipes de manutenção modernas e, em um contexto onde a aquisição e análise dos dados de operação de motores são realizadas mais facilmente, é uma questão de tempo para que mesmo indústrias de pequeno porte incorporem esse tipo de estratégia. A economia proporcionada através do tempo de trabalho reduzido bem como na redução de paradas na produção justifica o investimento em sistemas de monitoramento automatizado, onde as informações podem ser difundidas rapidamente pela indústria. A acessibilidade dos dados de operação em dispositivos descentralizados como *smartphones* se apresenta como uma necessidade do mercado e é condição de contorno para qualquer empresa se situar competitivamente no setor e na indústria 4.0.

Para motores de indução de baixa tensão, os rolamentos e as bobinas do estator são os componentes mais susceptíveis a falhas e, talvez, a principal motivação para o monitoramento contínuo dos motores elétricos. O crescimento no uso de inversores de frequência tem intensificado a ocorrência de alguns tipos de falhas em rolamentos e nas bobinas do estator e observa-se uma tendência de desenvolver métodos de diagnósticos de falhas que sejam aplicáveis tanto a motores de velocidade variável como a motores alimentados diretamente pela rede. Desenvolver as soluções mais modulares possíveis é ponto chave para obter espaço no mercado, afinal, mesmo sendo fabricantes de motores elétricos, a ABB e a WEG fizeram com que a sua solução fosse aplicável a motores de outras empresas. Corporação como a Siemens, que oferece a sua solução apenas para os seus motores já apresenta indícios de expandir a aplicação para motores de outros fabricantes.

Existe um evidente *tradeoff* entre variedade de aplicações e profundidade de diagnóstico, afinal, quanto mais vasta a gama de aplicações dos conjuntos de sensores, mais complicada é a elaboração de um diagnóstico sobre as condições de operação da máquina a partir dos dados lidos. Também é evidente que algumas linhas industriais possuem motores tão importantes que justifiquem uma aparelhagem personalizada para o monitoramento, mas o desafio está em oferecer uma solução modular que seja aplicável mesmo em máquinas de menor porte. Nesse sentido, as fabricantes de motores elétricos WEG, ABB e Siemens saem na frente em relação a alguns concorrentes na capacidade de oferecer diagnósticos de motores a partir dos dados obtidos. O *know-how* de anos de atuação no setor somado à crescente quantidade de informações medidas em campo poderá permitir, dentro de alguns anos, a realização

de diagnósticos com base na correlação entre os dados de operação e a aplicação do motor. Permitindo, dessa forma, a oferta de uma interface de gestão e priorização de inspeção dos ativos em plantas industriais, como pode se identificar em alguns dos serviços oferecidos de maneira complementar ao conjunto de medição.

Se as fabricantes de motores se destacam pela gama de diagnósticos possíveis, outras empresas como a AMC Vibro e a Tediases escolheram um caminho alternativo para se destacar. Ambas as empresas oferecem um módulo de medição com faixa de leitura de vibração mais larga e com protocolo de comunicação Zigbee, que apesar de diminuir a vida útil da bateria possui um alcance até três vezes maior para transmissão de dados quando comparados ao Bluetooth 4.0. A faixa larga de medidas de vibração possibilita o diagnóstico de falhas ainda em estágio insipiente, objetivo final da manutenção preditiva.

Dentro de um modelo típico de monitoramento das condições de operação de motores elétricos existe uma série de pontos para futuros desenvolvimentos em técnicas de medição, processamento e análise dos dados. Tem sido empregado sensores cada vez menores (MEMS) e capazes de serem agrupados em um conjunto único alimentado por bateria e conectados a um módulo de comunicação. As soluções do mercado mostram que, para se posicionar competitivamente, espera-se ao menos a medição de temperatura e vibração sobre a carcaça das máquinas através de um módulo pequeno e facilmente instalável. Algumas empresas como WEG, ABB e Siemens apresentam meios para medição de fluxo magnético e a solução da empresa DOL Group apresenta um microfone para medição de ruídos.

Entre as tendências na comunicação dos sensores, a maioria das empresas transmite diretamente os dados dos sensores para o processamento em software, no entanto existem indícios de que uma etapa de pré-processamento pode poupar a bateria do conjunto na etapa de envio devido a quantidade de dados transmitidos. Essa economia de energia, no entanto, deve ser suficiente para compensar o gasto energético com o processamento. Alternativamente, o conceito de malhas de dispositivos de medição, como apresentado pela Schaeffler, não apenas reduz a quantidade de *gateways* necessários como também abre uma perspectiva para a aplicação de mais de um sensor na mesma máquina, visando uma análise mais precisa sobre suas condições ou modelagens para formação de um *digital twin*. É evidente que, em um produto onde o consumo de energia é condição de contorno de projeto, a sincronização e a transmissão de dados de outros módulos é mais um fator de consumo de energia que deve ser ponderado. Diferentes protocolos de comunicação

são empregados pelos fabricantes do setor, sendo o Bluetooth o mais utilizado pelo baixo consumo de energia e acessível diretamente a qualquer usuário que possua um smartphone.

A medição do fluxo magnético é possivelmente a técnica comercial mais próxima de obter uma estimativa da corrente de alimentação do estator através da carcaça do motor, informação que pode abrir a porta para uma grande quantidade de diagnósticos (JIANG, 2017). Apesar de poderosa, a utilização do fluxo magnético como parâmetro para diagnóstico depende diretamente da geometria do motor, restringindo o seu uso pelos fabricantes de motores às suas máquinas de fabricação própria. Técnicas de modelagem térmica e elétrica da máquina a partir de dados de placa apenas já foram tentadas sem sucesso e podem ser alvo de novas tentativas nos próximos anos. Nas soluções de ABB, WEG e Siemens o uso de magnetômetros ainda se restringe, aparentemente, à determinação da frequência de operação da máquina.

Por outro lado, já existe um conhecimento bem fundamentado acerca de técnicas de diagnóstico de falhas em rolamentos com base nos dados de vibração medidos na carcaça. Por exemplo a ABB e a WEG indicam que em breve seu software incluirá métodos de diagnóstico de rolamentos e a SKF possui algumas patentes no assunto. Com ou sem técnicas avançadas de diagnóstico, a maioria das empresas oferece como parte de suas soluções de software o estabelecimento de limites aceitáveis para vibração e temperatura, alertando o usuário na ocorrência de ultrapassagens.

Talvez uma das características mais interessantes desse mercado é a variedade de empresas com diferentes competências inseridas: fabricantes de motores, componentes elétricos e empresas especializadas em sensores variados têm travado uma verdadeira corrida para desenvolver conjuntos menores e agregando mais valor aos seus clientes. Isso somado ao crescente número de artigos científicos publicados no tema provavelmente se refletirá em muitos avanços técnicos e comerciais nos próximos anos.

REFERÊNCIAS

- Cyrino, Luis** (2017). Curva de banheira e a taxa de falhas. <https://www.manutencaofoco.com.br/curva-da-banheira/>, acessado em 18/06/2020 às 19:23.
- Queiroz, A. R. S., Senger, E. C., Queiroz, L. C. L., Rangel, E., & de Paula, V. S.** (2017). Maintenance Strategy for Electrical Equipment Based on Integrated.
- Balogh, Z., Gatial, E., Barbosa, J., Leitao, P., & Matejka, T.** (2018). Reference Architecture for a Collaborative Predictive Platform for Smart Maintenance in Manufacturing.
- Mobley, R. K.** (2002). An Introduction to Predictive Maintenance.
- Motaghare, O., Pillai, A. S., & Ramachandran, K. I.** (2018). Predictive Maintenance Architecture.
- Bazurto, A. J., Quispe, E. C., & Mendoza, R. C.** (2016). Causes and failures classification of industrial electric motor.
- Nejat, P., Jomehzadeh, F., Mohammad, M.T.** (2015). A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO2 emitting countries).
- Basak, D., Tiwari, A., & Das, S. P.** (2006). Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines - A Review.
- Jigyasu, R., Sharma, A., Mathew, L., & Chatterji, S.** (2018). A Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Methods for Induction Motor.
- Imoru, O., Jimoh, A. A., & Hamam, Y.** (2014). Origin and manifestation of electrical machine faults-A review.
- Zhang, P., Du, Y., Habetler, T., Iu, B.** (2011). A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors.

Kim, Y.-H., Kim, H.-J., Moon, J.-W., Kim, Y.-H., & Jung, S.-Y. (2017). A study on the estimation of bearing life of electric motor using ISO 281 and accelerated life test.

Dalvand, F., Kalantar, A., Shokoohi, S., & Bevrani, H. (2014). Time-domain bearing condition monitoring in induction motors using instantaneous frequency of motor voltage.

Henao, H., Capolino, G.-A., Fernandez-Cabanas, M., Filippetti, F., Bruzzese, C., Strangas, E., ... Hedayati-Kia, S. (2014). Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques.

Maruthi, G. S., & Hegde, V. (2016). Application of MEMS Accelerometer for Detection and Diagnosis of Multiple Faults in the Roller Element Bearings of Three Phase Induction Motor.

Analog devices (2020) ADXL322. <https://www.analog.com/en/products/adxl322.html#product-overview>, acessado em 23/06/2020 às 18:36.

Nachi (2007). Rolamento Fixo de Esferas. [http://nachi.com.br/catalogos/Rolamento Fixo de Esferas.pdf](http://nachi.com.br/catalogos/Rolamento_Fixo_de_Esferas.pdf), acessado em 23/06/2020 às 18:55.

Zhou, W., Habetler, T. G., & Harley, R. G. (2007). Stator Current-Based Bearing Fault Detection Techniques: A General Review.

Cusído, J., Romeral, L., Ortega, J. A., Rosero, J. A., & García Espinosa, A. (2008). Fault Detection in Induction Machines Using Power Spectral Density in Wavelet Decomposition.

Kapoor, S. R., Khandelwal, N., & Pareek, P. (2014). Bearing fault analysis by signal energy calculation based signal processing technique in Squirrel Cage Induction Motor.

Gioncia, <https://pt.dreamstime.com/fotografia-de-stock-estator-de-rebobina%C3%A7%C3%B5es-do-motor-el%C3%A9trico-image21992542>, Acessado em 28/04/2020 às 18:48.

Arkan, M., Perović, D. K., & Unsworth, P. (2001). Online stator fault diagnosis in induction motors.

Penman, J., Sedding, H. G., Lloyd, B. A., & Fink, W. T. (1994). Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors.

Calebrese, L. Z. C., Karakus, Y., Dickens, K., & Yin, W. (2017). Inverter fed motor stress grading system design consideration.

Guastavino, F., Porcile, F., Ratto, A., Cordano, D., & Secondo, G. (2014). Electrical aging test and repetitive partial discharge inception voltage on random wire wound winding insulation.

Williamson, S. J., Wrobel, R., Yon, J., Booker, J. D., & Mellor, P. H. (2017). Investigation of equivalent stator-winding thermal resistance during insulation system ageing.

Hoseini, S. R. K., Farjah, E., Ghanbari, T., & Givi, H. (2016). An extended Kalman filtering approach for estimation of winding temperature in switched reluctance motors.

Huber, T., Bocker, J., & Peters, W. (2014). A Low-order Thermal Model for Monitoring Critical Temperatures in Permanent Magnet Synchronous Motors.

Övül Eski, Comparison between Squirrel Cage Rotor and Wound Rotor, <https://tr.pinterest.com/pin/394557617327125149/>, acessado em 08/06/2020 às 23:08.

Antonino-Daviu, J., Quijano-Lopez, A., Climente-Alarcon, V., & Garin-Abellan, C. (2016). Robust detection of rotor winding asymmetries in wound rotor induction motors via integral current analysis.

Stefani, A., Bellini, A., & Filippetti, F. (2009). Diagnosis of Induction Machines' Rotor Faults in Time-Varying Conditions.

Bindu, S., & Thomas, V. V. (2014). Diagnoses of internal faults of three phase squirrel cage induction motor — A review.

Luo, G., Hurwitz, J. E. D., & Habetler, T. G. (2019). A Survey of Multi-Sensor Systems for Online Fault Detection of Electric Machines.

Stefanini (2018), <https://stefanini.com/pt-br/trends/artigos/quarta-revolucao-industrial>, acessado em 11/05/2020 às 20:10

Santos, H. F. dos, Rigoni, M., Elias, R. de A., Feler, L. A., Wengerkievicz, C. A. C., Batistela, N. J., Sadowski, N., Kuo-Peng, P., Bastos, J. P. A., & Freitas, L. M. de. (2017). Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 16(1), 70-89.

Santos, Diego (2008), Um estudo da influência do processo de desgaseificação do alumínio, injetado sob pressão em rotores para motores elétricos.

National Instruments (2019). Medição de vibração com acelerômetros, <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html>, acessado em 13/05/2020 às 20:40.

Aydemir, A., & Akin, T. (2020). Self-Packaged Three Axis Capacitive Mems Accelerometer.

Endevco. What are the advantages and disadvantages of capacitive and piezoresistive accelerometers? <https://endevco.com/Our-Resources/ask-the-experts/What-are-the-advantages-and-disadvantages-of-capacitive-and-piezoresistive-accelerometers>, acessado em 13/05/2020 às 22:02.

Helal, I. A., Vuong, T.-H., David, J., Bellaaj, N. M., & Pietrzak-David, M. (2015). Vibration monitoring based on MEMS accelerometers.

Edvard (2016). Practical tips for installation and using of thermistor motor protection. <https://electrical-engineering-portal.com/thermistor-motor-protection>, acessado em 17/05/2020 às 12:10.

COLLINS, D. (2020). What function do thermistors and KTY sensors serve in motors and gearmotors? <https://www.motioncontroltips.com/what-function-do-thermistors-kty-sensors-serve-in-motors-garmotors/>, acessado em 17/05/2020 às 12:47.

Mohammed, A., & Djurovic, S. (2018). Stator Winding Internal Thermal Stress Monitoring and Analysis Using in-situ FBG Sensing Technology.

Koshin Electric Corporation. http://www.kohshin-ele.com/en/products/pages/ha_24rp_ck.html, acessado em 18/05/2020 às 18:05.

Cai, H., Zhang, H., & Ni, C. (2011). Speed sensorless induction motor driver system using a novel motor sensor coil.

Orkisz, M., Wnek, M., Kryczka, K., & Joerg, P. (2008). Variable frequency drive as a source of condition monitoring data.

Tsakalagos, L. (2013). Introduction to MEMS & NEMS :Micro and Nanoscale Electro Mechanical Systems.

Chang, H.-C., Kuo, C.-C., & Li, Y.-S. (2016). An Intelligent Defects Identification for Motors Using Partial Discharge Signals.

Wildermuth, S., Ahrend, U., Byner, C., Rzeszucinski, P., Lewandowski, D., & Orman, M. (2015). Condition monitoring of electric motors based on magnetometer measurements.

Shimanouchi, T., Toyoda, O., & Nakazawa, F. (2013). A wireless motor-condition, precise analysis system using a highly efficient vibration-energy harvester.

Almeida, Orlan (2019). Tecnologia LoRa: O que é, distância e teste prático. <https://easyiot.com.br/blog/tecnologia-lora/>, acessado em 21/06/2020 às 15:23.

Shahzad, K., & Oelmann, B. (2014). A comparative study of in-sensor processing vs. raw data transmission using ZigBee, BLE and Wi-Fi for data intensive monitoring applications.

WEG (2019). Gateway WEG Motor Scan chega ao mercado, <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/gateway-weg-motor-scan-chega-ao-mercado>, acessado em 18/05/2020 às 22:42.

Pandarakone, S. E., Gunasekaran, S., Asano, K., Mizuno, Y., & Nakamura, H. (2019). A Study on Machine Learning and Artificial Intelligence Methods in Detecting the Minor Outer-Raceway Bearing Fault.

ABB (2020). ABB Ability™ Smart Sensor - Motores que avisam quando é a hora do reparo, <https://new.abb.com/motors-generators/pt/servicos/servicos-avancados/smart-sensor>, acessado em 23/05/2020 às 10:01.

ABB (2019) DATA SHEET ABB Ability™ Smart Sensor. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106930A9867&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, acessado em 23/05/2020 às 10:10.

ABB (2017) SERVICE NOTE Sensor Inteligente ABB Ability™. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106713A3853&LanguageCode=pt&DocumentPartId=&Action=Launch>, acessado em 23/05/2020 às 11:29.

ANPEI (2018) WEG lança solução para indústria 4.0. <http://anpei.org.br/weg-lanca-solucao-para-industria-4-0/>, acessado em 23/05/2020 às 15:45.

WEG (2018) WEG apresenta suas novidades na FISPAL 2018 <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/feiras-e-eventos/weg-apresenta-suas-novidades-na-fispal-2018>, acessado em 03/07/2020 às 10:48.

WEG (2020) WEG Motor Scan Produto: 14445601. <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/WEG-Motor-Scan/WEG-Motor-Scan/p/14445601>, acessado em 23/05/2020 às 15:55.

WEG (2020) WEG Motor Scan Manual geral de instalação e operação Installation and operation manual.

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0b/h4b/WEG-weg-motor-scan-manual-geral-de-instalacao-e-operacao-14603136-manual-english-portuguese-spanish-web.pdf>, acessado em 26/05/2020 às 19:58.

SIEMENS (2019) Update: Release for sale SIMOTICS CONNECT 400 for line motors. <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109760264/update%3A-release-for-sale-simotics-connect-400-for-line-motors?dti=0&lc=en-WW>, acessado em 25/05/2020 às 20:53.

SIEMENS (2020) How to mount SIMOTICS Connect 400. <https://www.youtube.com/watch?v=RShjaqjapxo>, acessado em 25/05/2020 às 20:58.

GRAHN, P. (2018) Utilization of a tailor-made condition monitoring device for third party motors.

SKF (2015), SKF Wireless Machine Condition Sensor CMWA 8800. https://www.skf.com/binary/144-485811/0901d196802508d5-CM-P8-10243-4-EN-SKF-Wireless-Machine-Condition-Sensor_data-sheet.pdf, acessado em 26/05/2020 às 20:20.

THOMSON, A. (2017). Method and data processing device for severity assessment of bearing defects using vibration energy. Pedido de patente número US9989439B2.

THOMSON, A. (2016). Method, computer program product & system. Pedido de patente número US20160069775A1.

MURPHY, J.D., TORSTEN, B. (2013). Method of monitoring a health status of a bearing with a warning device in a threshold mode. Pedido de patente número WO2013123183A1.

MURPHY, J. (2016). Synchronized measurements for a portable multi-channel wireless sensor system. Pedido de patente número US9759636B2.

SCHAEFFLER (2020) HIGH-SCALE MONITORING AT LOWEST EXPENSES. OPTIME - Plug. Play. Predict. <https://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/en/products-and-solutions/industrial/product->

[portfolio/maintenance_products/optime/index.jsp](#), acessado em 27/05/2020 às 20:34.

AMC VIBRO (2020) AV SENSOR 2000R wireless industrial diagnostic system. https://amcvibro.com/wp-content/uploads/2017/09/Brochure_AV_S_EN_25.03.2020.pdf, acessado em 27/05/2020 às 21:23.

NEWSTEO (2020), The Newsteo radio transmission protocol on 868 MHz <https://www.newsteo.com/pt/datalogger-2/arquitectura-dos-sistemas/transmissao-de-radio-868-mhz/>, acessado em 27/05/2020 às 21:25.

TEDIASENS (2020), LOGGING-NODE – Wireless long-term Measurement Data Acquisition OEM. <https://www.elovis.com/en/products/radio-systems-data-transmission-vibration-measurement-systems/tediasens-ln-series/>, acessado em 29/05/2020 às 18:10.

MONNIT (2020). ALTA INDUSTRIAL WIRELESS THREE PHASE CURRENT METER - 150 AMP. <https://www.monnit.com/Products/Sensor/Three%20Phase/MNS2-9-IN-3P-150>, acessado em 29/05/20 às 18:45.

DOL GROUP (2020). Industrial Revolutionary Technology. <http://www.dolgroup.in/smk/#eluid82f60900>, acessado em 29/05/2020 às 19:27.

Jiang, C., Li, S., & Habetler, T. G. (2017). A review of condition monitoring of induction motors based on stray flux.

SKF (2020). Bearing Frequencies. <http://www.jp.nsk.com/app02/BearingGuide/m/html/en/FreqS.html>, acessado em 18/06/2020 às 12:35.