

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

RAFAEL POMORSKI LINESSIO

**ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM MOTORES ELÉTRICOS
UTILIZANDO UM ACELERÔMETRO ÓPTICO BIAxIAL**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2016

RAFAEL POMORSKI LINESSIO

**ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM MOTORES ELÉTRICOS
UTILIZANDO UM ACELERÔMETRO ÓPTICO BIAIXIAL**

Monografia de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Valmir de Oliveira

CURITIBA
2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo discernimento nos momentos de decisão.

Aos meus pais, Roberto Linessio e Olga Pomorski Linessio, e o meu irmão Roberto Linessio Junior pelas palavras de incentivo e paciência nos momentos de ausência.

Agradeço em especial ao meu orientador Professor Dr. Valmir de Oliveira pela dedicação ao longo dos anos em compartilhar os conhecimentos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

A UTFPR, por disponibilizar a estrutura física e os equipamentos para a realização das atividades em laboratório.

RESUMO

LINESSIO, Rafael Pomorski. **Análise de vibrações em motores elétricos utilizando um acelerômetro óptico biaxial**. 2016. 40 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho tem como objetivo testar um acelerômetro óptico biaxial para o monitoramento de vibrações em máquinas elétricas. Na fundamentação teórica são explorados os conceitos de falhas elétricas e mecânicas. São ainda apresentadas as técnicas convencionais para o monitoramento de máquinas elétricas como, por exemplo, análise do sinal de corrente, monitoramento de temperatura, por emissão acústica e por último a análise de vibrações. O acelerômetro proposto tem como elemento sensor as redes de Bragg em fibra óptica, onde a oscilação da massa inercial provoca a alteração do comprimento de onda de Bragg conforme o deslocamento da base do sensor. O acelerômetro óptico biaxial permite a medição da aceleração em duas direções ortogonais, onde a frequência natural para o eixo x é 747,5 Hz e para o eixo y é 757,5 Hz. Os ensaios realizados para validar a resposta do acelerômetro óptico biaxial para o monitoramento das frequências de vibrações em máquinas elétricas, foram desenvolvidas em laboratório. No ensaio foi utilizado um motor de indução, operando com o rotor com a barra quebrada, onde foi acoplado um gerador síncrono para prover a carga ao motor.

Palavras chave: Acelerômetro óptico. Vibrações em motores elétricos. Sensores ópticos. Redes de Bragg.

ABSTRACT

LINESSIO, Rafael Pomorski. **Vibration analysis in electric motors using a biaxial optical accelerometer**. 2016. 40 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This study aims to test of na biaxial optical fiber accelerometer to monitor vibrations on electrical machines. On fundamentals are explored of electrical na mechanical failures. Are presented standard techniques for monitoring of electrical machines, such as, current signal analysis, temperature monitoring, acoustic emission and vibration analysis. The accelerometer proposed uses fiber Bragg gratings to measure the displacement of the na inertial mass, where cause the change of Bragg wavelength relatively to a displacement of the support base, where cause the change of Bragg wavelength relatively to a displacement of the support base. The biaxial optical accelerometer allows the measurement of the acceleration in two ortogonal directions, where the natural frequency for the x -axis is 747,5 Hz and for y -axis is 757,5 Hz. The tests performed to validate the response of biaxial optical accelerometer for monitoring frequency vibrations in electrical machines were developed in the laboratory. In the tests was analyzed an induction motor operating with broken rotor bar where was also used a synchronous generator to provide the load for motor.

Keywords: Optical accelerometer. Vibrations in electric motors. Optical sensors. Fiber Bragg grating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemático indicando as principais partes construtivas de um motor de indução do tipo gaiola de esquilo.....	16
Figura 2 – Excentricidade do rotor em relação ao estator (a) Excentricidade estática. (b) Excentricidade dinâmica.....	19
Figura 3 – Diagrama em blocos do sistema de monitoramento de falhas em motores de indução pela assinatura da análise de corrente.	24
Figura 4 – Esquemático de uma rede de Bragg.	27
Figura 5 – (a) Estrutura externa para o posicionamento e suporte da fibra óptica. (b) Sistema mecânico, indicando o diâmetro inferior da mola concêntrica de 4 mm.	29
Figura 6 – Fotografia do acelerômetro óptico biaxial.	30
Figura 7 – Espectro de reflexão das redes de Bragg.	30
Figura 8 – Esquemático do posicionamento das FBGs em relação a massa inercial.	31
Figura 9 – Gráfico indicando a frequência natural para o eixo x e para o eixo y	32
Figura 10 – Fotografia do arranjo experimental do motor acoplado ao gerador síncrono e o posicionamento do acelerômetro óptico sobre o motor de indução.	34
Figura 11 – Fotografia do rotor, utilizado nos ensaios, com a barra rompida.	34
Figura 12 – Análise do rotor com defeito com carga de 75%: (a) Sensor óptico eixo x . (b) Sensor óptico eixo y	36
Figura 13 – Análise do rotor com defeito com carga de 100%: (a) Sensor óptico eixo x . (b) Sensor óptico eixo y	36

LISTA DE SIGLAS

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
MCA	<i>Motor Circuit Analysis</i> (Análise do circuito do motor)
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i> (Análise do sinal de corrente do motor)
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier)
FBG	<i>Fiber Bragg grating</i> (Redes de Bragg em fibra óptica)

LISTA DE SÍMBOLOS

F	Força magnética em Newtons (N)
i	Corrente elétrica circulante no fio em Ampère (A)
l	Comprimento da bobina em metros
B	Vetor densidade do fluxo magnético
n_s	Velocidade síncrona do motor em RPM
f_s	Frequência da rede elétrica em Hz
p	Número de polos do motor
s	Escorregamento do motor
f_{br}	Frequência da barra do rotor com defeito em Hz
n_{ef}	Índice de refração do núcleo da fibra óptica
Λ	Periodicidade da FBG
λ_B	Comprimento de onda de Bragg definido em nm
Δl	Coefficiente relativo a deformação de uma FBG
ΔT	Coefficiente relativo variação de temperatura de uma FBG

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	PROBLEMA	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
1.3	OBJETIVOS.....	13
1.3.1	Objetivo Geral	13
1.3.2	Objetivos Específicos	14
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	VIBRAÇÕES EM MOTORES ELÉTRICOS	17
2.1.1	Falhas Elétricas.....	18
2.1.1.1	Excentricidade do rotor	19
2.1.1.2	Falhas no rotor	20
2.1.1.3	Falhas no estator.....	20
2.1.2	Falhas Mecânicas	21
2.1.2.1	Vibração na base	21
2.1.2.2	Vibração nos rolamentos	22
2.1.2.3	Desbalanceamento do motor	23
2.2	TÉCNICAS DE ANÁLISE DE DEFEITOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS.....	23
2.2.1	Análise do Sinal de Corrente Elétrica (MCSA).....	24
2.2.2	Análise Termográfica	24
2.2.3	Análise por Emissão Acústica.....	25
2.2.4	Análise de Vibrações	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA	27
3.2	SENSIBILIDADE TÉRMICA E MECÂNICA DE UMA FBG	28
3.3	ACELERÔMETRO ÓPTICO BIAxIAL	28
3.3.1	Princípio de Funcionamento	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	ENSAIO DO MOTOR DE INDUÇÃO COM FALHA NO ROTOR.....	33
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
	REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

No campo da eletrotécnica um dos segmentos de estudo são as máquinas elétricas. As máquinas elétricas são constituídas pelos motores elétricos e pelos transformadores. Os conceitos físicos de ambos os sistemas são similares, já que a circulação da corrente elétrica por um condutor promove a geração de um campo magnético. A interação da variação do campo magnético com os outros componentes do sistema, possibilita a variação da tensão em um transformador e a rotação de um motor (FITZGERALD, 2006).

Os motores elétricos ainda são classificados conforme o tipo de excitação, os quais são designados de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). Os motores CA podem ser classificados como motores síncronos, de indução ou também denominados assíncronos. Nesta classificação os motores de indução, tipo gaiola de esquilo, são os mais utilizados na indústria devido a sua robustez, baixo custo de manutenção e fácil implementação a diferentes tipos de cargas, principalmente quando acionado por um inversor de frequência. Estas vantagens refletem nas estatísticas, as quais revelam que pelo menos 25% do consumo de energia elétrica no Brasil corresponde aos motores de indução trifásicos (BORTONI, *et al.*, 2005; BINDU, *et al.*, 2014). Em virtude da elevada aplicabilidade deste tipo de máquina elétrica, surge a necessidade de identificar as falhas antecipadamente com o intuito de aumentar a durabilidade e diminuir o tempo de parada em virtude de uma manutenção não programada.

A identificação das falhas podem ser realizadas de maneira *off-line* quando há necessidade de retirar o equipamento do local e realizar os ensaios em laboratório para diagnosticar os possíveis defeitos e *on-line*, quando o equipamento é analisado simultaneamente durante a sua operação em campo. O que justifica que o monitoramento *on-line*, apresenta vantagens significativas quando comparado com o método *off-line*, quando relacionado ao tempo de intervenção e aos custos de manutenção.

As técnicas *off-line*, são baseadas em teste de isolamento do enrolamento do estator, teste de resistência e análise do circuito do motor (MCA), já as técnicas de análise *on-line* estão relacionadas a análise do sinal de corrente estatórica do motor (MCSA), análise termográfica, análise de emissão acústica e de vibrações. Dentre as

técnicas *on-line* as mais importantes são o monitoramento pela análise do sinal de corrente e de vibrações. Ambas as técnicas permitem o monitoramento não-invasivo do equipamento, o que é uma característica fundamental para a diminuição dos custos de manutenção. O espectro obtido pela transformada rápida de Fourier (FFT), revelam as condições de operação do equipamento ao longo do tempo, de forma que a comparação dos espectros, permitem a identificação dos defeitos pela variação da amplitude e o deslocamento das componentes em frequência (BETTA, *et al.*, 2001).

Uma característica importante a ser considerada é a aplicação cada vez mais frequente dos inversores de frequência, com o intuito de realizar o controle de velocidade e torque do motor. Isto acaba por induzir harmônicos ao sinal de corrente e consequentemente afetando a análise pelo método MCSA. Desta forma pode-se afirmar que análise de falhas pelo método de vibração torna-se uma solução viável e promissora.

As principais falhas nos motores de indução estão relacionados principalmente ao rotor, estator e rolamentos. Aproximadamente 10% referem-se a problemas no rotor, 38% a problemas no estator e 40% aos defeitos nos rolamentos (THOMSON, *et al.*, 2001, BINDU, *et al.*, 2014). A análise de vibrações permitem identificar as falhas de cada um destes componentes, já que os mesmos estão relacionados diretamente em uma determinada frequência no espectro.

Neste trabalho é apresentando a análise de vibrações no motor de indução, utilizando como elemento sensor um acelerômetro óptico biaxial, baseado nas redes de Bragg (FBG) em fibra óptica. Para isso foi analisado o defeito no rotor de um motor de indução, onde foi produzido um desbalanceamento do eixo.

1.1 PROBLEMA

O caso de estudo será realizado em laboratório utilizando um motor de indução, em que acoplado a um gerador síncrono fornecerá carga ao motor e para a análise de defeitos, uma barra do rotor foi propositalmente rompida provocando um desbalanceamento do sistema. Apesar que a falha em rotores equivaler a apenas 10% de todo o sistema, a análise dos defeitos no rotor permite indiretamente identificar a falha nos demais componentes do motor. A deterioração em rolamentos e falhas nos enrolamentos podem ser identificados pela variação da vibração do rotor. Por exemplo, falhas nos rolamentos, como o desgaste das esferas, do caminho interno ou

externo, promovem a vibração excessiva do eixo do rotor. As falhas no isolamento do enrolamento do estator provocam a falha na atração da força magnética entre o rotor e o estator e da mesma forma provocando um desequilíbrio do conjunto.

No contexto acima apresentado pretende-se verificar a eficácia da utilização de um acelerômetro óptico biaxial na detecção de defeitos no rotor de motores elétricos, de forma *on-line*.

1.2 JUSTIFICATIVA

O grau de importância na detecção de defeitos em motores elétricos está relacionado a diminuição dos custos de manutenção e conseqüentemente a maior disponibilidade dos equipamentos em produção. Com isso é aplicado um dos métodos de análise a qual é dada através das vibrações, pois o mesmo permite obter as componentes em frequência ao longo do tempo de funcionamento do equipamento, de forma a identificar a evolução de um possível problema.

Para um diagnóstico eficaz, é preciso de uma monitoração contínua, com o intuito de minimizar os efeitos que possam degradar o motor. Contudo, para esta identificação é necessário, possuir um sistema robusto, já que em alguns tipos de falhas a evolução dos defeitos podem ser mascarados por ruídos e mudanças das condições de operação.

Neste trabalho o enfoque será dado na detecção de falhas utilizando o sensoriamento óptico, o qual é uma das técnicas promissoras, quando há necessidade de mensurar variáveis em ambientes com elevado ruído eletromagnético e com elevada sensibilidade.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral validar a detecção de vibrações em motores elétricos empregando um acelerômetro óptico biaxial, utilizando as redes de Bragg em fibra óptica.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para o desenvolvimento deste trabalho, alguns objetivos específicos foram estabelecidos, com o propósito de fundamentar cada etapa deste trabalho. São eles:

- Analisar as falhas elétricas e mecânicas nos componentes dos motores elétricos que provocam vibrações;
- Validar a aplicação do acelerômetro óptico biaxial na detecção de defeitos em rotores nos motores de indução.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos onde são descritos os componentes de um motor de indução e os fatores que podem produzir uma vibração excessiva ao conjunto além dos ensaios em laboratório.

Capítulo 1 - Introdução: serão apresentados o tema, o problema, os objetivos da pesquisa, a justificativa e a estrutura geral do trabalho.

Capítulo 2 - Fundamentação Teórica: são apresentados a estrutura e os conceitos físicos de funcionamento dos motores de indução. São citadas algumas das principais falhas elétricas e mecânicas responsáveis pelas causas de vibrações. São ainda explorados os métodos de análise de defeitos em motores, além da análise de vibrações.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos: são apresentados uma breve descrição da metodologia empregada no desenvolvimento do elemento sensor aplicado na análise de vibrações neste trabalho.

Capítulo 4 - Resultados e Discussões: são apresentados os resultados e discussões obtidos através dos ensaios em motores de indução, analisando a capacidade do acelerômetro óptico em identificar defeitos como, por exemplo, o desbalanceamento no rotor.

Capítulo 5 - Considerações finais: são expostas as conclusões a respeito dos ensaios em motores de indução utilizando o acelerômetro óptico biaxial baseado em redes de Bragg em fibra óptica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As máquinas elétricas rotativas são divididas pela funcionalidade empregada, dadas como: motor ou gerador. O sistema é denominado motor, quando a energia elétrica da fonte de alimentação é convertida em energia mecânica de rotação. Por outro lado, quando o eixo é excitado por uma fonte de energia externa como, por exemplo, o movimento da água ou do vento, tem a capacidade de produzir uma determinada tensão elétrica, funcionando desta forma como gerador (FITZGERALD, 2006).

Os motores elétricos são classificados ainda conforme a excitação: CC ou CA. Os mesmos princípios formam a base da operação tanto das máquinas CA como CC, ou seja, estas máquinas diferem apenas no aspecto construtivo, contudo os conceitos físicos são similares.

A lei de Faraday rege o funcionamento dos motores elétricos. Esta lei afirma que a corrente elétrica induzida por um campo magnético em um circuito fechado é proporcional a taxa de variação temporal do número de linhas de fluxo magnético que atravessam a área delimitada pelo circuito. A força em um condutor na presença de um campo magnético é dada pela equação (1):

$$F = i(l \times B) \text{ [N]} \quad (1)$$

onde, F é definido como força magnética definida em Newtons (N), i a corrente elétrica dada em Ampère (A), l o comprimento da bobina dado em metros (m) e B o vetor densidade de fluxo magnético com a unidade em Tesla (T). A indução de uma força em um fio ou bobina condutora, por uma corrente na presença de um campo magnético é chamado ação motor. Este é o princípio de operação dos motores para a determinação das forças que o colocam em movimento.

Entre a diversidade dos motores elétricos o motor de indução trifásico, destaca-se devido ao modo simples de funcionamento, com a tecnologia de fabricação sedimentada, rendimento satisfatório e baixa necessidade de manutenção. Estas características são sedimentadas pela vasta aplicação na indústria como, por exemplo, em siderúrgicas, petroquímicas e em usinas de geração de energia elétrica. Nos países industrializados 65% do consumo de eletricidade são responsáveis pelos

motores elétricos, e 90% deste consumo é em função dos motores de indução com a configuração gaiola de esquilo (MARUTHI, *et al.*, 2005; CHAPMAN, 2013). O motor de indução do tipo gaiola de esquilo é uma máquina elétrica de corrente alternada constituída por duas principais partes: o estator e o rotor.

O estator é constituído de um núcleo cilíndrico de aço ferromagnético laminado, de forma similar como aplicado aos transformadores para diminuir as perdas no ferro ocasionadas pelas correntes parasitas e histerese. No estator de um motor de indução trifásico são colocados três conjuntos de bobinas posicionados de forma equidistante, de forma que cada bobina é conectada a uma fase da rede de alimentação trifásica.

O rotor do motor com a configuração “gaiola de esquilo” também é formado por barras de aço ferromagnético, com a mesma finalidade aplicada ao estator, de forma a estarem conectadas nas extremidades pelos anéis de curto-circuito. Também nas extremidades do rotor estão fixados os rolamentos que permitem o giro do rotor (CHAPMAN, 2013).

Na Figura 1 são indicadas as principais partes de um motor de indução do tipo gaiola de esquilo. O estator é composto pela carcaça, enrolamento trifásico e as barras de material ferromagnético que define o fluxo magnético. O rotor é constituído pelo eixo, que transmite a potência mecânica a carga acoplada e as barras e anéis de curto-circuito. Outros componentes como terminais, tem a finalidade de conectar os enrolamentos do estator a rede elétrica, a tampa defletora e o ventilador provê a ventilação forçada e a carcaça oferece a proteção mecânica da estrutura e a dissipação do calor.

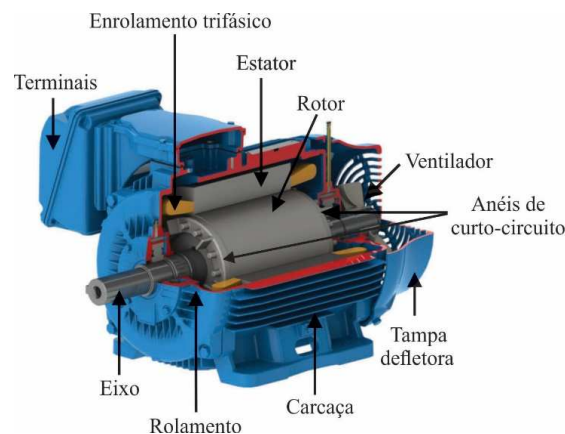


Figura 1 – Esquemático indicando as principais partes construtivas de um motor de indução do tipo gaiola de esquilo.
Fonte: Adaptado de WEG (2015).

O princípio de funcionamento do motor de indução trifásico tem como início a aplicação de uma tensão trifásica alternada aos enrolamentos do estator. Quando no enrolamento é percorrida uma corrente elétrica, é criado um campo magnético. Este campo magnético atravessa o rotor, onde irá induzir tensões nas barras do rotor, que por estarem curto-circuitadas geram correntes, e conseqüentemente um campo no rotor, de polaridade oposta à do campo girante do estator (CHAPMAN, 2013; WEG, 2015).

A velocidade do campo magnético, é definida como velocidade síncrona do motor, a qual é dada pela equação (2):

$$n_s = \frac{120 * f_s}{p} \text{ [RPM]} \quad (2)$$

em que, n_s é a velocidade síncrona do motor em RPM, f_s é a frequência da rede elétrica aplicada ao estator em Hz, e p o número de polos do motor. Através da equação (2), quanto maior o número de polos, menor será a velocidade síncrona desenvolvida. Para um motor de 2 polos a velocidade síncrona em 60 Hz é 3600 RPM e para um motor de 4 polos a velocidade síncrona é 1800 RPM.

Contudo, há um limite superior para a velocidade síncrona do motor. Se o rotor girar na velocidade síncrona, as barras do rotor estariam estacionárias em relação ao campo magnético do estator e não haveria uma tensão induzida no rotor. Portanto a velocidade do rotor sempre estará abaixo da velocidade síncrona.

Quando ao rotor do motor é acoplado uma carga, a mesma provocará uma diferença de velocidade ainda maior em relação a velocidade síncrona, motivo pelo qual os motores de indução são denominados assíncronos. Este conceito é definido como, s , escorregamento. Ou seja, quanto maior for o torque contrário aplicado ao eixo, pelo sistema acoplado, maior será o escorregamento.

2.1 VIBRAÇÕES EM MOTORES ELÉTRICOS

Os problemas em máquinas elétricas geralmente estão relacionados a defeitos de projetos, condições de instalação inadequadas, sobrecarga, tempo de utilização elevado e vibração excessiva. O monitoramento da vibração e o diagnóstico das componentes em frequência dos motores elétricos, permitem analisar

preventivamente os defeitos de forma a reduzir os custos de manutenção e otimizar o desempenho.

Na área de manutenção a forma de executar as mesmas é definida como corretiva, preventiva e preditiva. A manutenção corretiva é realizada quando um componente falha e em alguns casos é necessário a parada total do equipamento. A manutenção preventiva, é baseada em parâmetros de tempo de aplicação dos componentes conforme as especificações dos fabricantes. Já a manutenção preditiva baseia-se nos métodos de análise como, por exemplo, temperatura, emissão acústica, contaminação dos lubrificantes e vibrações. Com estes métodos pode-se avaliar ao longo do tempo a evolução das falhas. Neste estudo será dado ênfase na análise de vibrações, em que pode-se identificar o aparecimento das componentes em frequência específicas relativas aos principais defeitos nos motores elétricos.

Em um motor de indução trifásico, aproximadamente, 40-50% das falhas são relacionadas a problemas nos rolamentos, 30-40% são ocorrências de falhas no estator e 5-10% são falhas provenientes do rotor (BONNETT, *et al.*, 2008; BINDU, *et al.*, 2014). As falhas nos motores de indução são divididas em duas categorias, as falhas elétricas e as falhas mecânicas. As falhas elétricas, específicas de máquinas elétricas, estão relacionadas a excentricidade do rotor, falhas no estator, e problemas nos enrolamentos, e falhas ocasionadas no rotor provenientes pela barra danificada e anéis de curto-circuito quebrados. As falhas mecânicas, típicas de máquinas rotativas, estão vinculadas ao desbalanceamento, problemas em rolamentos e fatores influenciados pela fixação do motor a base de forma inapropriada (TSYPKIN, 2011; ÁGOSTON, 2015)

2.1.1 Falhas Elétricas

As falhas elétricas estão relacionadas a alteração da força de atração entre o estator e o rotor, ocasionadas também pela excentricidade do rotor, problemas na estrutura física do rotor como, por exemplo, rompimento de barras e fatores relacionados também a falhas no isolamento do enrolamento do estator.

2.1.1.1 Excentricidade do rotor

Os rotores dos motores não são perfeitamente concêntricos em relação ao estator, pequenas variações de excentricidade, dentro dos limites de operação são toleráveis. Contudo quando esta falha é pronunciada é capaz de gerar amplitudes e frequências de vibrações prejudiciais ao motor, como também a produção de ruído e elevação de temperatura em componentes associados ao conjunto como, por exemplo, em rolamentos. Em casos extremos a excentricidade pode causar o atrito entre o rotor e o estator de forma a danificar o isolamento e os condutores do enrolamento do estator (RODRÍGUEZ *et al.*, 2008). A excentricidade é definida como a diferença do centro de rotação entre o estator e o rotor e está relacionado diretamente ao balanceamento do rotor.

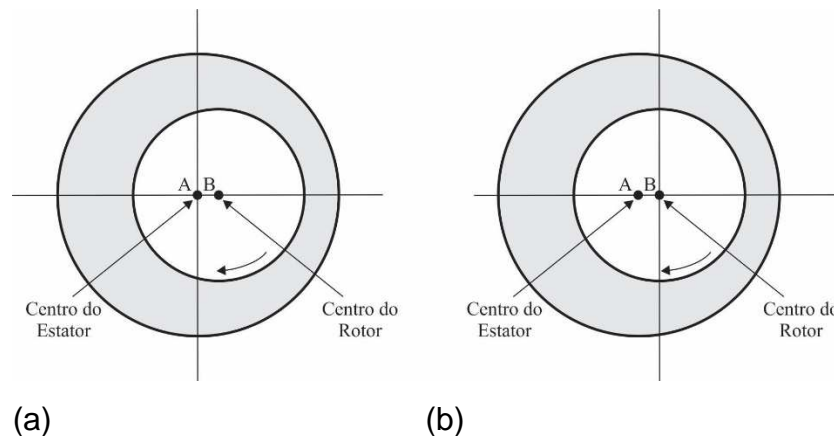


Figura 2 – Excentricidade do rotor em relação ao estator
(a) Excentricidade estática. (b) Excentricidade dinâmica.
Fonte: Adaptado de CORNE (2014)

Na Figura 2 a excentricidade estática ocorre quando o centro do rotor no ponto *B* é fixo em relação ao centro do estator no ponto *A*, ou seja, o rotor gira de forma fixa em algum ponto, com centro deslocado na posição central do estator. A excentricidade dinâmica ocorre quando o centro do rotor, ponto *B*, rotaciona em relação ao ponto central do estator, no ponto *A*, variando a posição ao longo da rotação.

As frequências de vibração do motor produzidas pela excentricidade natural estão relacionadas a frequências de alimentação do motor e também a frequência de rotação do rotor, onde esta componente está vinculada ao número de polos do motor. As componentes em frequência esperadas para um motor de 2 polos são, 60 Hz, 120 Hz, 180 Hz e 240 Hz e para um motor de 4 polos são 30 Hz, 60 Hz, 90 Hz, 120 Hz e 180 Hz (RODRÍGUEZ *et al.*, 2008; SOUZA *et al.* 2015)

2.1.1.2 Falhas no rotor

As falhas no rotor ocorrem, em menor percentual que os demais componentes do motor em torno de 10% do total de falhas. As falhas podem ser ocasionadas pelo excessivo aquecimento devido a insuficiência de ventilação, principalmente quando o motor está posicionado em ambientes insalubres, também ocasionados por problemas na fabricação do rotor como, por exemplo, bolhas de ar ou soldas com defeitos. Outro fator a ser considerado são as falhas nos rolamentos que podem ocasionar o desbalanceamento do rotor (BONNETT, *et al.*, 1992).

Como consequência direta sobre o rotor, um dos principais defeitos estão relacionados a quebra de uma ou mais barras do rotor. Este defeito tem como consequência a geração de vibrações mecânicas, elevação da temperatura em rolamentos e também nos enrolamentos do estator, e também a produção de ruído. Quando uma das barras é rompida, pode não ocasionar a parada total da máquina, contudo a corrente será distribuída ao longo das outras barras, o que pode, como consequência causar a sobrecarga e sobreaquecimento, onde as quais podem ser danificadas, ocasionando desta forma uma possível falha geral ao sistema.

A barra rompida do roto pode ser identificada no espectro em frequência pela equação (3):

$$f_{br} = 2f_s(1 \pm s) \text{ [Hz]} \quad (3)$$

onde f_{br} é a componente em frequência referente a barra com defeito dado em Hz, f_s é a frequência de alimentação do motor em Hz e, s , o escorregamento provocado pela carga aplicada ao eixo do motor. É importante considerar que a identificação da componente referente ao defeito de barra quebrada, é possível somente com a carga aplicada ao eixo do rotor, em virtude do escorregamento produzido.

2.1.1.3 Falhas no estator

As falhas relacionadas ao estator, são derivadas de fatores, como, problemas térmicos, mecânicos, elétricos e do ambiente e que se encontra o motor. Estes fatores podem afetar o isolamento do enrolamento, provocando a fuga de corrente entre as fases ou entre a fase e a terra, o que gera o desbalanceamento do campo magnético da região afetada.

O fator temperatura tem como referência que o aumento de 10°C ocasiona a redução pela metade da vida útil do isolamento. O desbalanceamento entre as fases, o que por regra uma variação da tensão de 3,5% irá acarretar um aumento de 25% na fase com maior corrente. A partida do motor, afeta diretamente o isolamento dos enrolamentos, já que durante a partida a corrente tem um sobressalto de cinco a oito vezes a corrente normal de operação. De forma indireta, a obstrução da ventilação do motor, provoca a abrupta elevação da temperatura, já que a dissipação do calor é transmitida por convecção para a carcaça do motor (BONNETT, *et al.*, 1992).

Fatores mecânicos, que afetam o isolamento do enrolamento, em um caso crítico, é a colisão do rotor com os enrolamento do estator, provocado por falhas nos rolamentos, deflexão do eixo e elevada excentricidade entre o rotor e o estator (BONNETT, *et al.*, 1992).

O fator elétrico, está relacionado ao material utilizado no isolamento do enrolamento, o qual deve suportar a variações de corrente. Se estas variações abruptas forem excessivas, o efeito corona pode afetar os isolamentos de forma a atacar os componentes orgânicos do material isolante, deteriorando-os (WEG, 2016).

O ambiente em que o motor está localizado, também é um dos fatores que afetam o isolamento dos enrolamentos, já que em um ambiente hostil, partículas podem adentrar ao motor pelo sistema de ventilação forçada e ocasionar o rompimento do material isolante (BONNETT, *et al.*, 1992).

2.1.2 Falhas Mecânicas

As falhas mecânicas, podem ser provocadas por fatores internos como, por exemplo, defeitos em rolamentos, e por fatores externos como a influência da fixação do motor a base.

2.1.2.1 Vibração na base

A fundação é o elemento estrutural, base natural ou preparada, destinada a suportar os esforços produzidos pelos equipamentos instalados, permitindo a operação destes com estabilidade, desempenho e segurança. O projeto das

fundações deve considerar as estruturas adjacentes para evitar influência de um equipamento sobre o outro, a fim de que não ocorra a propagação de vibrações.

Uma fixação inadequada, promoverá a amplificação das frequências de vibração natural do motor. Estas amplificações conseqüentemente afetam todos os componentes do motor o degradando de forma prematura (ÁGOSTON, 2015).

2.1.2.2 Vibração nos rolamentos

As falhas nos rolamentos representam em torno de 40% das falhas nos motores de indução. Diversos são os fatores que podem provocar o desgaste deste componente, entre eles destacam-se sobrecarga, desalinhamento e montagem incorreta. Assim como também o desgaste por partículas abrasivas, desgaste por lubrificação inadequada, desgaste por vibração, desgaste por penetração de umidade e descargas de corrente elétrica sobre o rolamento.

O desgaste por partículas abrasivas está relacionado a presença de componentes de desgaste, ou até mesmo de contaminação do lubrificante com agentes externos. Os fatores vinculados a lubrificação inadequada, podem ser referenciados ao excesso de lubrificante e a falta do mesmo. Quando em excesso, devido a uma vedação ineficiente do rolamento, pode permitir a saída do lubrificante e conseqüentemente permitindo a entrada de agentes erosivos. Outro fator relevante por falta de lubrificante é a variação da temperatura já que a mesma é aumentada devido ao aquecimento gerado pelo atrito entre as partes constituintes do rolamento. Os fatores relacionados a vibração, ocorrem quando o rolamento é exposto a vibrações quando parado, ou quando em funcionamento do motor, o mesmo excede os valores definidos pelo fabricante. O desgaste associado por penetração de umidade, são derivados de componentes com presença de água, substâncias corrosivas em contato com o rolamento por um longo período de tempo. A influência dos fatores elétricos, como a passagem de corrente elétrica pelo rolamento, pode provocar a deterioração do lubrificando gerando falhas. As falhas elétricas podem ser provenientes de problemas no isolamento do enrolamento do estator, onde pode permitir a fuga de corrente para a terra, através dos mancais, os quais estão conectados a terra.

Ao analisar o defeito em rolamentos, é importante considerar que os fatores, como, falhas em rotores e nos estatores afetam diretamente este componente. A

grande incidência de defeitos nos rolamentos, deve-se ao fato de ser um componente mecânico, que qualquer alteração na sua constituição física poderá provocar o desgaste prematuro do mesmo.

Os diagnósticos de defeitos em rolamento estão vinculados a geometria do rolamento e a frequência de rotação do rotor, produzindo componente relacionadas as frequências de vibração para cada tipo de falha.

2.1.2.3 Desbalanceamento do motor

Esta falha principalmente está relacionada a variação da excentricidade de um equipamento ou componente acoplado ao eixo do motor. Este defeito afeta principalmente os rotores dos motores.

A análise dos motores deve-se considerar que o desbalanceamento dos componentes acoplados a uma mesma estrutura, por provocar o fenômeno conhecido como batimento. Este fenômeno ocorre quando duas frequências de operação próximas coincidem no tempo, podendo amplificar os níveis de vibração e conseqüentemente provocando danos ao rotor e acoplamentos (ÁGOSTON, 2015).

2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE DEFEITOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

As técnicas de análise em máquinas elétricas diferem em relação a variável que está sendo analisada. A divisão entre as técnicas *off-line* e *on-line* atuam de forma a identificar através de diferentes parâmetros a evolução dos defeitos. Entre as técnicas empregadas a *on-line* se destaca, como uma alternativa viável já que o monitoramento é realizado durante a operação do equipamento em campo. Desta forma tem como vantagem a diminuição dos custos de análise e um rápido diagnóstico, já que as possíveis falhas são detectadas em condições normais de operação.

Entre as técnicas de monitoramento *on-line* destacam-se:

- Análise do sinal de corrente elétrica (MCSA);
- Análise termográfica;
- Análise por emissão acústica;
- Análise de vibrações;

2.2.1 Análise do Sinal de Corrente Elétrica (MCSA)

A análise da assinatura de corrente do motor, é um dos principais métodos de detecção de defeitos em motores de indução (JUNG, *et al.*, 2006). A identificação dos defeitos no motor, ocorre pela identificação do sinal de corrente do estator pela análise espectral. A detecção das falhas ocorre através do monitoramento de uma das três fases de alimentação do motor. O diagrama em blocos do sistema de aquisição do sinal é apresentado na Figura 3.

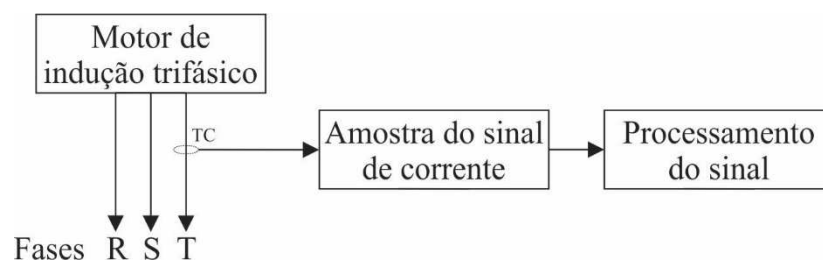


Figura 3 – Diagrama em blocos do sistema de monitoramento de falhas em motores de indução pela assinatura da análise de corrente.
Fonte: Autoria própria

Conforme indicado na Figura 3 a aquisição do sinal de corrente ocorre através de um transformador de corrente, TC. Este transformador permite obter a amostra do sinal de corrente de forma proporcional ao que é consumido pelo motor.

2.2.2 Análise Termográfica

A análise termográfica é um dos métodos de análise não invasivos, aplicado em na manutenção preditiva em virtude do seu baixo custo. A termografia é uma técnica que não necessita o contato do elemento sensor com o equipamento monitorado. As análises dos defeitos nas máquinas são realizadas pela detecção da distribuição da energia térmica emitida pela superfície do equipamento, através da radiação do infravermelho. A detecção da radiação do infravermelho é obtida por uma câmera sensível a este espectro de radiação, onde as imagens são decodificadas em uma escala de cores (GUIDE..., 2007).

O funcionamento das máquinas elétricas os padrões térmicos são modificados ao longo utilização do equipamento. O método de análise deste tipo de

monitoramento ocorre pela comparação entre o espectro de cores quando o equipamento é instalado e através do acompanhamento por períodos determinados, indicando um possível desgaste em um componente. Já que quando algum componente do sistema está sobrecarregado ou fadigado o mesmo apresenta como um dos sinais de desgaste a elevação da temperatura.

Alguns dos defeitos que podem ser identificados pela análise termográfica são as falhas nos rolamentos, barra do rotor quebrada, desalinhamento, desbalanceamento mecânico e o desbalanceamento da tensão de alimentação. Neste tipo de método é necessário estabelecer um padrão de referência, já que fatores externos como, a temperatura ambiente e a interferência térmica entre os componentes do motor podem prejudicar o diagnóstico do equipamento monitorado.

2.2.3 Análise por Emissão Acústica

A análise por emissão acústica em motores de indução é uma técnica que utiliza o ruído produzido pelos componentes da máquina para identificar possíveis falhas. Diversos componentes podem produzir ruídos no conjunto, entre as causas está, a fonte de alimentação com harmônicos provocando a variação da excitação do motor, excentricidade do rotor, rolamentos com defeitos ou provenientes da ventilação forçada e a excentricidade do rotor. Algumas destas fontes são próprias do motor, e não podem ser eliminadas como, por exemplo, o ruído produzido pela ventilação forçada e a excentricidade do rotor, já outras fontes, são provocadas pelo desgaste natural dos componentes, em virtude do tempo de utilização, como nos rolamentos. Outras origens do ruído são provenientes de circunstâncias externas, como a fonte de alimentação com elevada taxa de distorção harmônica, principalmente quando a máquina está conectada a um inversor de frequência (GAYLARD, *et al.*, 1995).

A aquisição do sinal emitido pelas máquinas é realizada através de um sensor piezoelétrico, um sistema de amplificação do sinal e uma unidade de processamento do sinal. Assim como a análise de temperatura, o nível de emissão acústica também é modificado ao longo do tempo.

2.2.4 Análise de Vibrações

A análise dos níveis de vibração em máquinas elétricas, é uma das técnicas empregadas para a identificação de falhas de maneira preditiva. O parâmetro de vibração é o indicador de como o motor foi projetado, montado, instalado, mantido e operado. Toda máquina apresenta níveis de ruídos e vibrações intrínsecos aos seus componentes. Contudo uma faixa dos limites de vibração se deve a possíveis defeitos que comprometem o desempenho do equipamento. O aumento dos níveis de vibração são o reflexo do agravamento destes defeitos.

Os níveis de vibração mecânica em máquinas elétricas girantes são estabelecidos pela NBR 60034-14. Esta norma é utilizada pelos fabricantes de máquinas elétricas, para manter os parâmetros dentro das condições especificadas.

As ordens de grandeza para os parâmetros de vibrações, definidos pela NBR 60034-14, estão relacionados ao deslocamento, velocidade e aceleração.

Por definição o deslocamento é uma grandeza que indica o quanto o sistema desvia de sua posição de equilíbrio. A unidade de deslocamento empregado é o micrometro (μm). O parâmetro velocidade indica o quão rápido o sistema está se movendo e a unidade é dada por milímetros por segundo (mm/s). Já a aceleração de um corpo está relacionada com as forças que causam a vibração. A unidade de aceleração no sistema internacional é o metro ao quadrado por segundo (m/s^2).

Na prática para a medição da vibração é utilizado o acelerômetro para a obtenção dos dados. Os acelerômetros constituem uma classe de transdutores cuja resposta é proporcional à aceleração produzida na base do sensor. Através da aceleração, com o artifício matemático da derivada pode-se obter as variáveis de velocidade e deslocamento. Os dados dos níveis de vibração, geralmente são obtidos pelos sensores no domínio do tempo, e transformados para o domínio da frequência através da transformada rápida de Fourier em um programa específico (GUIDE..., 2007).

As vibrações podem ser medidas em qualquer instante e as amplitudes das componentes determinadas poderão ser comparadas com espectros medidos em momentos diferentes, de forma a permitir identificar amplitudes e frequências específicas relacionadas a algum defeito.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são explorados os conceitos que envolvem a estrutura do acelerômetro óptico biaxial, assim como o seu funcionamento utilizado neste trabalho, para a medição da vibração em máquinas elétricas.

3.1 REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

As redes de Bragg em fibra óptica são empregadas em diversos segmentos quando envolve a análise de deformação ou também a medição da temperatura. Este avanço refere-se as características como as consolidadas técnicas de gravação e baixo custo de implementação, quando comparado com outros métodos como, por exemplo, o sistema interferométrico e por intensidade óptica.

As redes de Bragg consistem de uma modulação periódica longitudinal do índice de refração, n_{ef} , do núcleo da fibra óptica, com alteração de índices perpendiculares ao eixo longitudinal, com período, Λ , constante. A estrutura básica de uma rede de Bragg é apresentada na Figura 4.

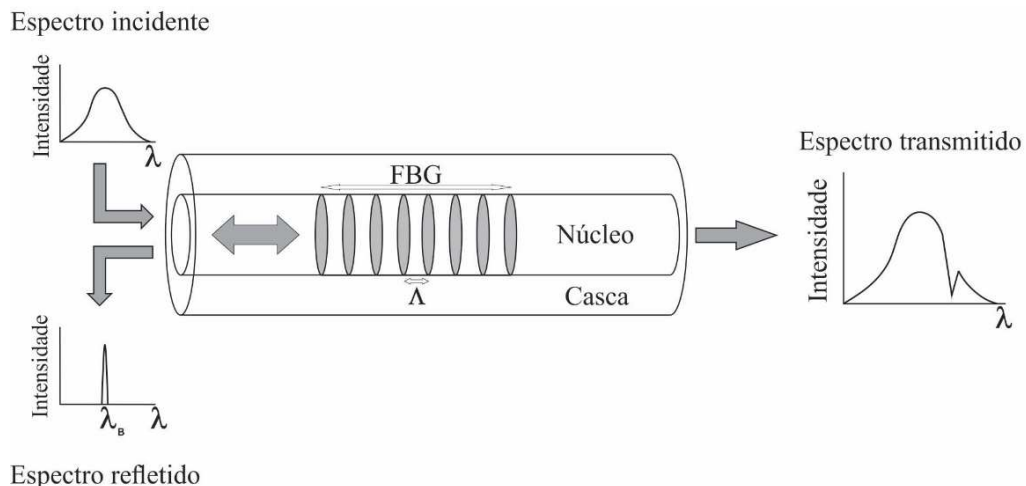


Figura 4 – Esquemático de uma rede de Bragg.
Fonte: Autoria própria

Conforme apresentado na Figura 4, a luz guiada ao longo do núcleo da fibra óptica será refletida por cada plano da rede de Bragg. Quando a condição de Bragg é satisfeita, a contribuição da luz refletida por cada plano da rede contribui construtivamente na direção contra propagante, formando uma banda de reflexão com

comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede. É através do espectro refletido, centralizado em um comprimento de onda de Bragg, que é realizada a medição dos parâmetros de um sistema. A parcela do espectro que não atende a condição de Bragg será transmitida.

3.2 SENSIBILIDADE TÉRMICA E MECÂNICA DE UMA FBG

A reflexão do comprimento de onda de Bragg, λ_B , refletido de forma construtiva pelo padrão de interferência gravado no núcleo da fibra óptica, é dependente do n_{ef} , índice de refração efetivo do núcleo e da, Λ , periodicidade da rede. O índice de refração efetivo, bem como o espaçamento periódico entre os planos da rede, será afetado pelas alterações de deformação e temperatura, os quais podem ser quantificados pela alteração do comprimento de onda de Bragg dada pela equação (4) (OTHONOS; KALLI, 1999):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{ef}}{\partial l} + n_{ef} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 22 \left(\Lambda \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} + n_{ef} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (4)$$

onde Δl é o coeficiente relativo a deformação e ΔT o coeficiente relacionado a variação de temperatura. A variação do comprimento de onda central do sinal refletido é a componente que será monitorada nos sensores baseados em FBGs.

A variação a deformação tem a sensibilidade de 1,2 μm por cada 1 μm de alongação relativa, e para a variação de temperatura a sensibilidade é de aproximadamente 13 $\mu m \cdot ^\circ C^{-1}$ da rede de Bragg no comprimento de onda de 1550 nm (OTHONOS; KALLI, 1999). Pode-se concluir que a alteração do comprimento de onda de Bragg é dada predominantemente pela temperatura em contraposição a deformação.

3.3 ACELERÔMETRO ÓPTICO BIAXIAL

O acelerômetro óptico biaxial é composto de duas estruturas físicas: a estrutura externa e o sistema mecânico massa-mola ambos desenvolvidos em alumínio, as quais são apresentados na Figura 5.

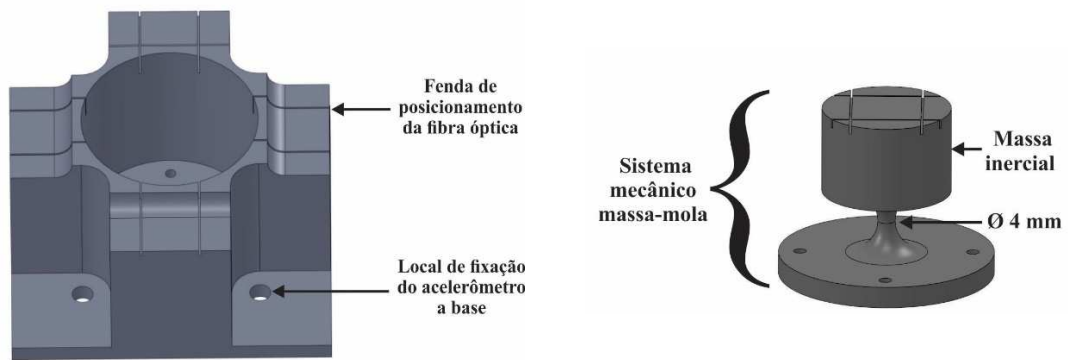


Figura 5 – (a) Estrutura externa para o posicionamento e suporte da fibra óptica. (b) Sistema mecânico, indicando o diâmetro inferior da mola concêntrica de 4 mm.
Fonte: Adaptado de ANTUNES (2012).

A estrutura externa, com massa de 466 g, tem como finalidade possibilitar o posicionamento e a fixação da fibra óptica, além de prover a fixação do sensor sobre a chapa metálica de suporte. O sistema mecânico massa-mola tem uma massa de 68 g, constituído de uma base com uma mola concêntrica com diâmetro de 4 mm e na parte superior uma massa sísmica, com diâmetro superior de 30 mm e altura de 20 mm, a qual também possibilita a fixação da fibra óptica e proporciona o deslocamento nas direções de sensibilidade. A configuração do sistema massa-mola permite medir o deslocamento relativo entre a massa sísmica e a base. O deslocamento relativo, entre a massa inercial e a base, é diretamente relacionado a aceleração da base, o qual é o princípio básico de funcionamento dos acelerômetros.

Para prover resistência mecânica ao acelerômetro óptico biaxial e também facilitar a fixação sobre a superfície monitorada, o sistema também é composto por um encapsulamento de aço com comprimento de 15,0 cm, largura de 15,0 cm e altura de 8,5 cm e uma base de alumínio. Esta estrutura do acelerômetro óptico biaxial é apresentado na Figura 6.

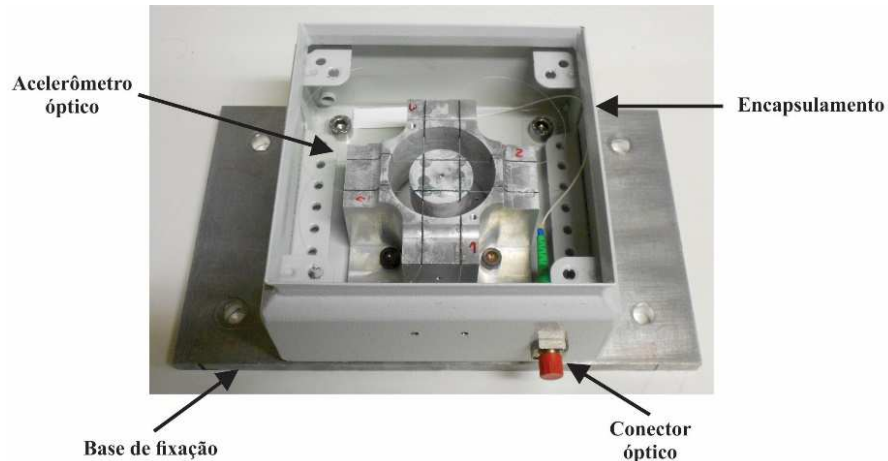


Figura 6 – Fotografia do acelerômetro óptico biaxial.
Fonte: Autoria própria.

A análise do deslocamento da base é mensurada pelas quatro redes de Bragg em fibra óptica, gravadas em ordem crescente de comprimento de onda conforme apresentado na Figura 7.

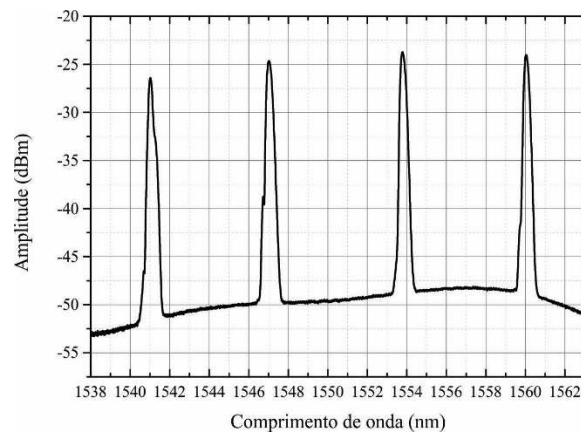


Figura 7 – Espectro de reflexão das redes de Bragg.
Fonte: Autoria própria.

Os comprimentos de onda de Bragg estão definidos em 1541,5 nm, em 1547,9 nm, em 1554,3 nm e em 1560,8 nm.

3.3.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do acelerômetro óptico biaxial é baseado no deslocamento relativo entre a base e a massa inercial. Este deslocamento relativo é mensurado pelas FBGs, onde a variação provoca a variação do comprimento de

onda de Bragg, e podem ser relacionadas diretamente ao valor da aceleração da base. Na Figura 8 é apresentado o posicionamento das redes de Bragg em relação a massa inercial.

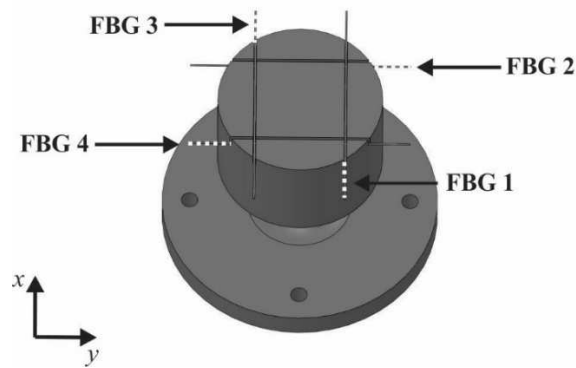


Figura 8 – Esquemático do posicionamento das FBGs em relação a massa inercial.
 Fonte: Autoria própria.

A obtenção do deslocamento relativo para o eixo x e para o eixo y é obtido através da variação do comprimento de onda, dado pelas equações (5) e (6):

$$\Delta x = \Delta \lambda_B(\text{FBG 1}) - \Delta \lambda_B(\text{FBG 3}) \quad (5)$$

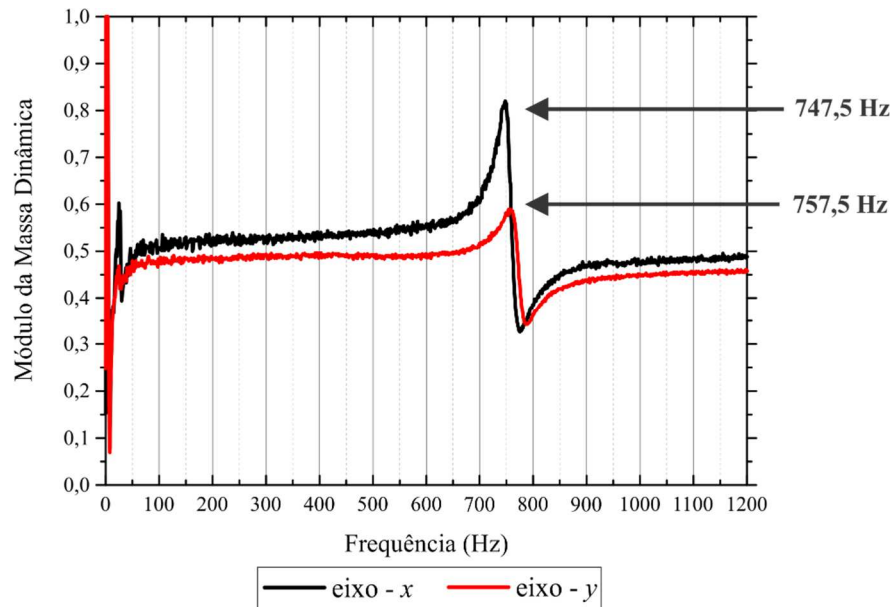
$$\Delta y = \Delta \lambda_B(\text{FBG 2}) - \Delta \lambda_B(\text{FBG 4}) \quad (6)$$

Devido a simetria do acelerômetro óptico, qualquer deslocamento ou rotação diferente dos eixos de sensibilidade será decomposto nos eixos x e y .

Uma das principais características do acelerômetro óptico é a compensação a variação da temperatura externa. Isto é justificado pelo motivo que as quatro FBGs estejam sujeitas a mesma variação de temperatura, de forma que o deslocamento do comprimento de onda de Bragg será similar em todas as redes. O aumento da temperatura provoca em todas as FBGs um deslocamento positivo do comprimento de onda de Bragg. Como é definido que a aceleração é dada pela diferença da variação dos comprimentos de onda de Bragg entre FBGs na mesma direção, conforme indicado nas equações (5) e (6), qualquer alteração de temperatura não terá reflexo no valor final da aceleração calculada.

Um quesito fundamental em um sensor é a determinação dos seus parâmetros modais, que inclui a frequência natural deste sistema. Para o acelerômetro óptico

biaxial a frequência natural para o eixo x é 747,5 Hz e para o eixo y é 757,5 Hz conforme apresentado na Figura 9.



**Figura 9 – Gráfico indicando a frequência natural para o eixo x e para o eixo y .
Fonte: Autoria própria.**

A simetria da frequência natural para ambas as direções, permite justificar a aplicação do acelerômetro para aplicações em vibrações em máquinas elétricas. Pode-se observar a linearidade da resposta até a frequência natural. A instabilidade na faixa de 0 Hz a 30 Hz é justificada pela influência da fixação do acelerômetro durante o processo de calibração.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões dos ensaios realizados com o acelerômetro óptico biaxial para a análise de vibrações em máquinas elétricas. O ensaio foi realizado em laboratório em que ao motor de indução foi acoplado a um gerador. Neste ensaio o gerador operou como carga para o motor. Para evidenciar as componentes de frequência referente a defeitos em motores elétricos, foi utilizado um rotor com uma das barras rompidas. Ao motor operando como o rotor avariado foi imposto uma variação de carga na ordem de 75% e 100% provido pelo gerador acoplado. Os dados do acelerômetro óptico foram adquiridos com o interrogador SM 130, resolução de 1 pm do fabricante Micron Optics a uma taxa de amostragem de 1,0 kHz. O processamento dos dados foram realizados através do programa CatmanEasy AP, do fabricante HBM.

4.1 ENSAIO DO MOTOR DE INDUÇÃO COM FALHA NO ROTOR

O ensaio entre o motor de indução e o gerador síncrono operando como carga, tem como objetivo compreender as componentes em frequência relacionadas à variação de carga impostas ao motor e também analisar os defeitos em rotores, onde neste ensaio, uma das barras do rotor foi rompida. A variação de carga e o rompimento da barra do rotor são condições semelhantes de operação e de defeitos dos motores na indústria. Desta forma pode-se validar a aplicação do acelerômetro óptico para a análise de defeitos em motores elétricos. Na Figura 10 é apresentado o gerador síncrono acoplado ao motor de indução. Para o posicionamento do acelerômetro óptico sobre o motor, foi desenvolvida uma base em alumínio fixada com parafusos na carcaça do motor de forma que as vibrações do motor sejam transmitidas integralmente ao acelerômetro.

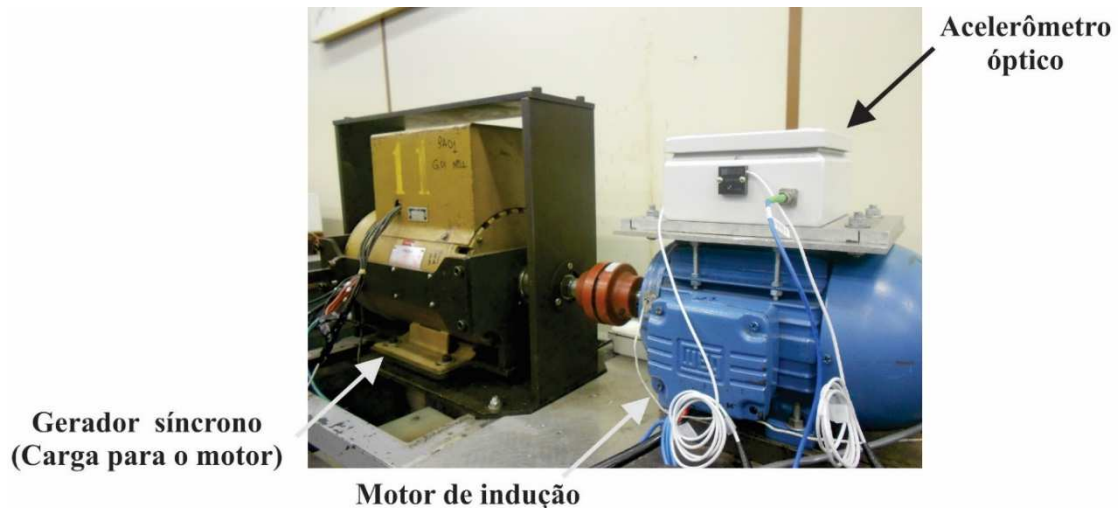


Figura 10 – Fotografia do arranjo experimental do motor acoplado ao gerador síncrono e o posicionamento do acelerômetro óptico sobre o motor de indução.
Fonte: Autoria própria.

O desbalanceamento do rotor foi obtido através do rompimento de uma das barras do rotor conforme indicado na Figura 11.

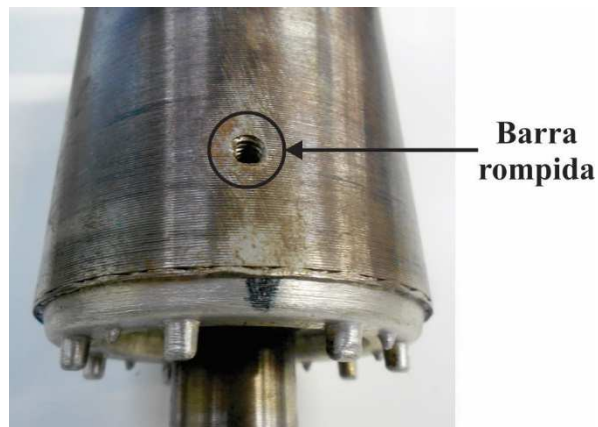


Figura 11 – Fotografia do rotor, utilizado nos ensaios, com a barra rompida.
Fonte: Autoria própria.

Este desbalanceamento causa o desequilíbrio das forças magnéticas de atração entre o rotor e o estator, uma vez que a barra danificada não possibilita a circulação de corrente no ponto rompido. A análise em frequência para identificação deste defeito pode ser realizada através da observação das componentes laterais em 120 Hz. Este desbalanceamento no sistema e a posição desta componente no espectro está relacionado a carga aplicada no eixo do motor, ou seja, quanto maior a carga, maior será o escorregamento produzido, como consequência maior será o deslocamento da componente devido a barra quebrada para frequências afastadas de 120 Hz.

Para a variação de carga ao eixo do motor, a estrutura do ensaio foi dividida entre o gerador e o motor. Ao gerador estão acoplados eletricamente, o varivolt, modelo VTE-020 do fabricante STP, e o retificador em que estão relacionados ao ajuste da tensão produzida pelo gerador. A carga resistiva, com resistência de $3,9 \Omega$, proporciona a carga sobre o gerador acoplado ao motor, além da utilização dos multimedidores, com a função de monitorar a tensão e corrente elétrica. Ao motor estão conectados os multimedidores, onde é realizado o monitoramento da corrente e da tensão elétrica de entrada no motor. A alimentação do conjunto foi realizada através da rede elétrica, 220 V e 60 Hz, em que um transformador possibilita o ajuste da tensão elétrica aplicada sobre o motor. A análise dos parâmetros como, por exemplo, o escorregamento foram obtidos pelo sistema supervisor *Elipse*.

No ensaio foi utilizado um motor de indução trifásico de 3 CV e 4 polos, do fabricante WEG, operando a uma velocidade de aproximadamente 1800 RPM. O motor foi acoplado mecanicamente ao gerador síncrono também de 4 polos do fabricante Kohlbach. Os ensaios foram realizados, impondo ao motor 75% e 100% de carga.

Os espectros apresentados na Figura 12 e Figura 13, são analisados pela janela de 110 Hz a 130 Hz, isto é justificado já que a componente em 120 Hz está presente em todos os motores, independentemente do número de polos e também não é alterada com a variação de carga aplicada ao motor. A componente em 120 Hz tem maior dependência com a força magnética atuando entre o entreferro do motor, que é definida como duas vezes a frequência de alimentação do motor. Isto justifica a amplitude praticamente constante da componente em 120 Hz em todos os espectros.

Na Figura 12 o ensaio é constituído pela alimentação do motor pela rede elétrica local, onde a frequência é 60 Hz. Observa-se os picos centralizados em 120 Hz. Com a aplicação de 75% da carga pode-se observar a resposta do acelerômetro óptico para as direções *x* e *y*.

A barra quebrada no rotor propicia o aparecimento de componentes laterais que podem ser observadas em 118 Hz, conforme destacado pelas setas. Esta componente é vinculada ao escorregamento devido a carga aplicada ao rotor. Os dados medidos com o sistema supervisor indicaram a velocidade do rotor em 59,05 Hz, gerando o escorregamento na ordem de 1,58% para a carga em 75%

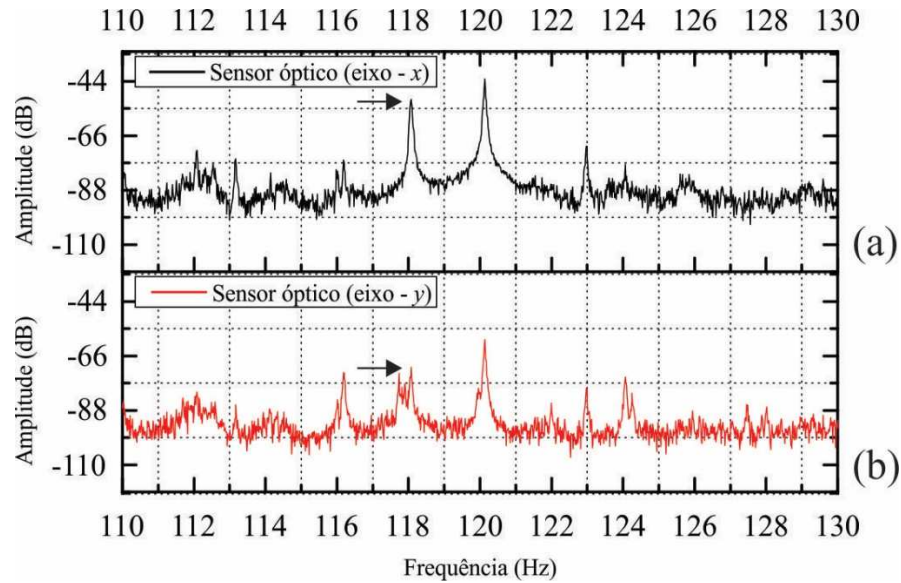


Figura 12 – Análise do rotor com defeito com carga de 75%: (a) Sensor óptico eixo x. (b) Sensor óptico eixo y.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 13 é apresentado o ensaio com a carga aplicada ao motor de 100 %. A análise pelo sistema supervisório mensurou a frequência de rotação do rotor em 58,13 Hz, gerando desta forma um escorregamento de 3,12%.

A componente em frequência em virtude da carga aplicada ao rotor é definida em aproximadamente 116 Hz, conforme destacado pelas setas no espectro de frequências da Figura 13.

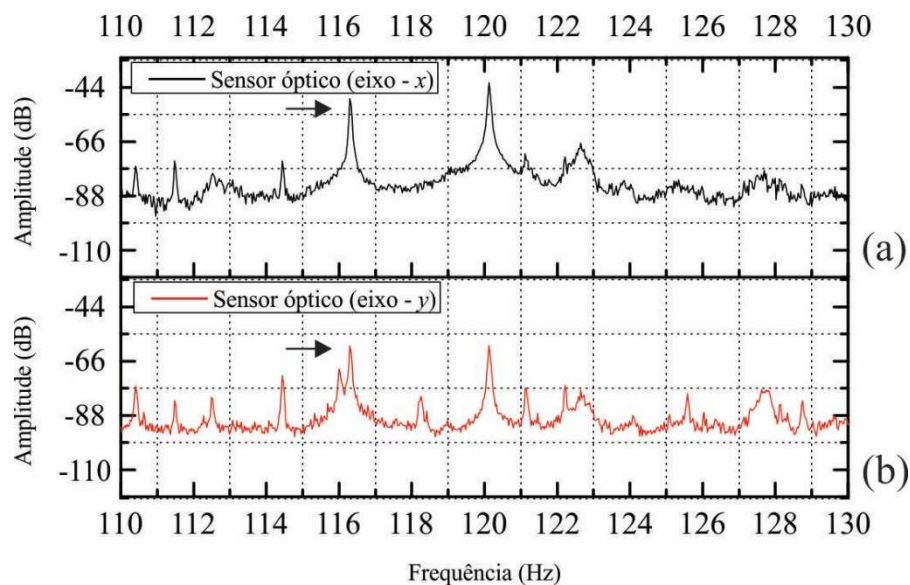


Figura 13 – Análise do rotor com defeito com carga de 100%: (a) Sensor óptico eixo x. (b) Sensor óptico eixo y.
Fonte: Autoria própria.

Em virtude de o escorregamento ser praticamente o dobro em função da variação da carga em 75% para 100%, conforme esperado, a componente em frequência devido a barra danificada é deslocada para frequências menores com o aumento da carga aplicada ao rotor do motor.

A amplitude da componente referente ao defeito na barra do rotor e o deslocamento das bandas laterais são influenciadas pela quantidade de barras rompidas, velocidade de rotação e pela carga aplicada ao eixo do rotor, conforme demonstrado nos ensaios e também o tipo e o tamanho físico do motor analisado são fatores que devem ser considerados. (LI, *et al.*, 2006; SOUZA, *et al.*, 2015)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado a implementação e os ensaios em um acelerômetro óptico biaxial para o monitoramento de vibrações em máquina elétricas. O enfoque dado aos motores de indução está relacionado a sua vasta aplicação na indústria. Pode-se considerar ainda que as análises de defeitos em máquinas elétricas rotativas são de interesse do grupo de Fotônica da UTFPR, o que motiva a implementação de novos dispositivos de sensoriamento.

O estudo direcionado aos componentes dos motores de indução como, por exemplo, rolamentos, estator e rotor, representam a maioria dos defeitos neste tipo de máquina elétrica. A necessidade de identificar as falhas nestes componentes possibilitou o surgimento de técnicas que se complementam na compreensão de falhas. As principais técnicas são a assinatura de corrente do motor, termografia, monitoramento de emissão acústica e por último a análise de vibrações.

A análise de vibrações foi a técnica utilizada neste trabalho para a compreensão dos fenômenos relacionados aos defeitos em motores elétricos. Para a aquisição dos dados, foi implementado um acelerômetro óptico biaxial utilizando as redes de Bragg em fibra óptica. A sensibilidade das redes de Bragg a variação de deformação e a temperatura, permitem empregar este método para a análise de vibrações, aliado as características do sistema óptico como, por exemplo, a imunidade a interferência eletromagnéticas, onde este é um fator relevante. Pode-se ainda citar a capacidade de multiplexação dos sensores de forma intrínseca em um único cordão óptico, diminuindo desta forma os custos de instalações em virtude da diminuição da infraestrutura de cabeamento quando comparado com os métodos convencionais.

A medição da vibração utilizando o acelerômetro óptico biaxial é baseada no deslocamento relativo entre a massa inercial e a sua base.

Para validação do acelerômetro óptico na detecção de defeitos, foi realizado um ensaio de um motor de 3 CV acoplado a um gerador síncrono ambos de 4 polos. Neste ensaio o gerador operou como carga ao motor. A detecção do defeito, provocado na barra do rotor de forma a gerar o desbalanceamento, foi identificado pelo acelerômetro óptico, revelando a componente lateral em 120 Hz. Pela análise da Figura 12 e Figura 13, pode-se observar que o aumento da carga sobre o eixo do rotor do motor, o escorregamento também será maior, e conseqüentemente a componente

em frequência relativo ao desbalanceamento é deslocado para componentes de frequências menores. Para 75% de carga foi observado a componente em aproximadamente 118 Hz e para 100% de carga em 116 Hz.

Os ensaios realizados permitem viabilizar o acelerômetro para a análise de defeitos em máquinas elétricas aliado as características dos sensores a fibra óptica. Contudo, para uma aplicação industrial, os custos envolvidos no processo de instrumentação ainda são elevados. O principal custo está na aquisição dos dados através do interrogador óptico. Dessa forma a instrumentação de motores de baixa capacidade com este tipo de sensor, não é viável economicamente, já que muitas vezes o custo de instrumentação supera o valor do motor. Entretanto, em máquinas que apresentam um custo mais elevado, e em ambientes em que a única solução confiável é a aplicação dos sensores a fibra óptica, a instrumentação óptica passa a ser uma alternativa viável e vantajosa economicamente.

A análise realizada com o acelerômetro óptico para a detecção de defeitos em máquinas elétricas, permite explorar os conhecimentos e as aplicações para a análise de vibrações em rolamentos e estatores. Outro ponto a ser considerado é a implementação de um novo sensor com novas dimensões. Isto é devido a limitação da frequência natural do acelerômetro proposto em 750 Hz, inviabilizando a medição de falhas em rolamentos, as quais, são vinculadas as características do componente. Um outro quesito importante segundo a NBR 60034-14 estabelece que a medição deve ser realizada em três direções distintas, sugerindo o desenvolvimento de um acelerômetro triaxial que atenda as características de frequência e sensibilidade.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 60034-14 Máquinas elétricas girantes Parte 14: Medição, avaliação e limites da severidade de vibração mecânica de máquinas de altura de eixo igual ou superior a 56 mm.** 2011.

AGOSTON, Katalin. **Fault detection of the electrical motors based on vibration analysis.** *Procedia Technology*, v. 19, p. 547–553, 2015.

ANTUNES, Paulo F. C.; MARQUES, Carlos A.; VARUM, Humberto; ANDRE, Paulo S. **Biaxial optical accelerometer and high-angle inclinometer with temperature and cross-axis insensitivity.** *IEEE Sensors Journal*, v. 12, p. 2399–2406, July 2012.

BETTA, Giovanni; LIGUORI, Consolatina; PAOLILLO, Alfredo; PIETROSANTO, Antonio. **A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis.** *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, v. 1, p. 572–577, 2001.

BINDU, S; THOMAS, Vinod V. **Diagnoses of internal faults of three phase squirrel cage induction motora review.** *International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies*, p. 48–54, Jan. 2014.

BORTONI, E. C.; HADDAD, J.; SANTOS, A. H. M.; AZEVEDO, E. M.; YAMACHITA, R. A. **Analysis of preventive and corrective maintenance on three-phase squirrel-cage induction motors performance.** *Industry Applications Conference Fourtieth IAS Annual Meeting*, v. 1, p. 46–51, Oct. 2005.

BONNETT, Austin H.; YUNG, Chuck. **Increased efficiency versus increased reliability.** *IEEE Industry Applications Magazine*, v. 14, p. 29–36, Jan 2008.

BONNETT, Austin H.; SOUKUP, George C. **Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors.** *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 28, p. 921–937, Jul. 1992.

CORNE, Bram; DEBRUYNE, Colin; BAETS, Patrick de; DESMET, Jan. **Stator current measurements as a condition monitoring technology - the-state-of-the-art.** *International Conference on Electrical Machines*, p. 1659–1665, Sept. 2014.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** AMGH Editora, 2013.

FITZGERALD, Arthur E. **MÁQUINAS ELÉTRICAS: Com introdução à eletrônica de potência.** 6. ed. Bookman, 2006. 648 p.

GAYLARD, A.; MEYER, A.; LANDY, C. **Acoustic evaluation of faults in electrical machines.** *Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives*, p. 147–150, Sept. 1995.

GUIDE for Induction Machinery Maintenance Testing and Failure Analysis. *IEEE Std 1415-2006*, p. c1–58, April 2007.

JUNG, Jee-Hoon; LEE, Jong-Jae; KWON, Bong-Hwan H. **Online diagnosis of induction motors using MCSA**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 53, p. 1842–1852, Dec. 2006.

LI, Weidong; MECHEFSKE, Chris K. **Detection of induction motor faults: a comparison of stator current, vibration and acoustic methods**. Journal of Vibration and Control, v. 12, p. 165–188, Feb. 2006.

MARUTHI, Gujjar S.; VITTAL, K. Panduranga. **Electrical fault detection in three phase squirrel cage induction motor by vibration analysis using MEMS accelerometer**. International Conference on Power Electronics and Drives Systems, v. 2, p. 838–843, Nov. 2005.

OTHONOS, Andreas; KALLI, Kyriacos. **Fiber Bragg Gratings - Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. Artech House, 1999.

RODRÍGUEZ, Pedro V. J.; BELAHCEN, Anouar; ARKKIO, Antero; LAIHO, Antti; ANTONINO-DAVIU, José A. **Air-gap force distribution and vibration pattern of induction motors under dynamic eccentricity**. Electrical Engineering, v. 90, -p. 209–218, May 2008.

SOUSA, Kleiton de M.; DREYER, Uilian J.; MARTELLI, Cicero; SILVA, Jean C. C. da. **Vibration measurement of induction motor under dynamic eccentricity using optical fiber Bragg grating sensors**. Microwave and Optoelectronics Conference, p. 1–5, Nov. 2015.

THOMSON, William T.; FENGER, Mark. **Current signature analysis to detect induction motor faults**. IEEE Industry Applications Magazine, v. 7, p. 26–34, July 2001.

TSYPKIN, Mikhail. **Induction motor condition monitoring: Vibration analysis technique – a practical implementation**. IEEE International Electric Machines & Drives Conference, p. 406–411, May 2011.

WEG. **Motores Elétricos - Guia de Especificação**. 2015. Acesso em: 17 jan. 2016. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>.