

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCOS CRESPIM

**ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DINÂMICA DE
UM ESTATOR DE UM MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO EMPREGANDO SENSORES DE
REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

MARCOS CRESPIM

**ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DINÂMICA DE
UM ESTATOR DE UM MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO EMPREGANDO SENSORES DE
REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica - COELT - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Kleiton De Moraes Sousa

Co-orientador: Prof. Dr. Jose Fabio kolzer

PATO BRANCO

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DINÂMICA DE UM ESTATOR DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO EMPREGANDO SENSORES DE REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA** do acadêmico **Marcos Crespim** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° 190 de 2018.

Fizeram parte da banca examinadora os professores:

Prof. Dr. Kleiton De Moraes Sousa

Prof. Dr. Jose Fabio kolzer

Prof. Dr. Ivo de Lourenço Junior

Prof. Me. Heitor José Tessaro

A ATA de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do
Curso de Engenharia Elétrica.

Dedico esse trabalho a minha família pelo suporte que se fez presente em todos os momentos da minha vida dentro e fora da Universidade, sem esse pilar provavelmente não teria conseguido chegar até aqui.

Ao meu irmão Valdecir Crespim (in memoriam), por toda a sua perseverança, fé, força e vontade em viver a vida mesmo nas dificuldades enfrentadas, sendo um exemplo para mim.

”Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo o propósito debaixo do céu”.

A fé é o pilar que sustenta todas as virtudes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde, força, fé, o socorro presente na hora da angústia, meu guia para superar as dificuldades e seguir o caminho que me trouxe até aqui.

Agradeço aos meus pais, Joaquim Crespim e Carolinda Crespim, e aos meus irmãos Maria, Doraci, Valmir e Marli Crespim pelo incentivo frente ao desafio aceito ao ingressar na universidade e não deixar-me desanimar em momentos difíceis e seguir até a conclusão.

Agradeço a todos os meus professores do curso de Graduação em Engenharia Elétrica, em especial, ao meu orientador Kleiton de Moraes Sousa pela orientação neste trabalho e, acima de tudo, por compartilhar seu conhecimento e experiências que possibilitaram alcançar os resultados apresentados. Ao professor José Fábio Kolzer, coorientador neste trabalho, pelo incentivo e colaboração para finalização do trabalho.

A todos os meus amigos que fiz durante essa jornada, em especial aos colegas das engenharias que de alguma forma contribuíram e agregaram durante toda a minha graduação.

A A.A.A.E UTFPR-PB por proporcionar-me experiências memoráveis e inesquecíveis, evoluindo o meu crescimento pessoal fazendo parte dessa Atlética, que mais pessoas tenham a oportunidade de sentir e vestir essa camisa com tanto amor.

RESUMO

CRESPIM, Marcos. Análise Da Deformação Dinâmica De Um Estator De Um Motor De Indução Trifásica Empregando Sensores de Redes De Bragg Em Fibra Óptica. 2018. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica - COELT, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Um motor de indução trifásico em funcionamento, através das forças mecânicas e elétricas, pode causar deformação no estator, podendo gerar problemas de vibração indesejáveis. Esses problemas geram desgastes nas máquinas reduzindo ou até colocando em risco sua confiabilidade, gerando um aumento no custo de manutenção. Este trabalho mostra uma forma de medição da deformação dinâmica do estator de um motor de indução trifásica com diferentes massas fixadas no eixo do rotor e acionado por diferentes frequências de alimentação, utilizando sensores em rede de Bragg em fibra óptica, instaladas entre os dentes do estator. A imunidade eletromagnética e o tamanho reduzido tornam as fibra ópticas adequadas para essa aplicação. As componentes de frequências da deformação do motor de indução foram previstas usando um modelo das forças presentes no entreferro, considerando a excentricidade estáticas e dinâmicas do rotor. Uma bancada para teste foi feita utilizando um motor de indução trifásico acionado por um inversor de frequência e instrumentado com sensores rede de Bragg em fibra óptica. Os sensores foram posicionados entre os dentes do estator, separados por um ângulo de 150° graus entre eles. A análise experimental mostra que as componentes de frequência do espectro apresentado pelos dois sensores são as mesmas que aquelas previstas na teoria. A excentricidade do motor foi realizada fixando massas desequilibradas no eixo do rotor. A amplitude da componente de frequência da vibração e rotação aumentou quando a massa desequilibrada no eixo do rotor aumentou. Os testes apresentados neste trabalho podem ser usado para determinar alguns parâmetros ou falhas do motor de indução, como por exemplo, uma barra de rotor quebrada.

Palavras-chave: Motor de indução, rede de Bragg em fibra óptica, excentricidade de motor, sensor óptico de deformação, excentricidade do rotor, medição de vibração..

ABSTRACT

CRESPIM, Marcos. Analysis of the dynamic stator deformation of a three-phase induction motor employing fiber Bragg grating optic sensors. 2018. 48 p. Course Conclusion Work of the Electrical Engineering Course of the Coordination of Electrical Engineering - COELT, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2018

A three-phase induction motor in operation, through mechanical and electrical forces, can cause deformation in the stator, which can generate undesirable vibration problems. These problems generate wear on the machines reducing or even jeopardizing their reliability, leading to an increase in maintenance cost. This work shows a way of measuring the dynamic deformation of the stator of a three-phase induction motor with different masses fixed to the rotor axis and driven by different feed frequencies, using fiber Bragg grating optic sensors installed between the stator teeth. Electromagnetic immunity and reduced size make fiber optics suitable for this application. The frequency components of the induction motor deformation were predicted using a model of the forces present in the air gap, considering the static and dynamic rotor eccentricity. A test bench was made using a 4-pole induction motor operated by a frequency inverter and instrumented with FBG strain sensor. The sensors were positioned between the stator teeth separated by a 150° angle between them. The experimental analysis shows that the components of the spectrum presented by the two sensors are the same as those predicted in theory. The eccentricity of the motor was performed by fixing unbalanced weights on the rotor shaft. The amplitude of the frequency component of the vibration and rotation increased when the unbalanced mass on the rotor axis increased. The tests presented in this paper can be used to determine some parameters or induction motor failures, such as a broken rotor rod, for example.

Keywords: Induction motors, fiber Bragg gratings, motor eccentricity, optical strain sensor, rotor eccentricity, vibration measurement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Fibra óptica com duas rede de Bragg gravadas no núcleo.	19
Figura 2:	Espectro associados a fibra óptica.	19
Figura 3:	Excentricidade da máquina e as variáveis envolvidas.	22
Figura 4:	Esquema das massas acopladas ao eixo do rotor do motor.	26
Figura 5:	Esquema da bancada para aquisição de dados.	27
Figura 6:	Dados da placa do motor de indução.	27
Figura 7:	FBG colada entre os dentes do estator para medição da deformação.	28
Figura 8:	Localização das fibras entre os dentes do estator no motor de indução.	29
Figura 9:	Espectro de frequência da deformação do estator com o sensor 1 sem carga	31
Figura 10:	Espectro da deformação do estator com o sensor 1 e sensor 2. . . .	32
Figura 11:	Sinal de vibração no domínio do tempo para a uma condição sem cargas.	33
Figura 12:	Espectro da deformação do estator com frequência de 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz para sensor 1.	35
Figura 13:	Espectro da deformação do estator com frequência de 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz para sensor 2.	36
Figura 14:	Espectro da deformação do estator com acoplamento de 18g, 195g e 275g no eixo da máquina com o sensor 1.	37
Figura 15:	Espectro da deformação do estator com 18 g, 195 g e 275 g acoplado no eixo da máquina com o sensor 2.	38
Figura 16:	Deformação da forma de onda no domínio do tempo sem carga e com acoplamento de massa no eixo do motor com o sensor 1 e sensor 2.	39

LISTA DE SÍMBOLOS

dB/Km	Decibel por kilometro.
FBG	Fiber Bragg Grating.
WDM	Wavelength Division Multiplexing.
n_{ef}	Índice de refração efetivo
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
Λ	Período da rede de Bragg
λ	Comprimento de onda
l	comprimento da rede de Bragg
φ	Posição angular entre roto e estator.
ω_r	Velocidade angular de rotação.
g	Comprimento do entreferro.
\bar{g}	Intervalo médio do entreferro.
d_E	Grau de excentricidade dinâmica.
e	Excentricidade.
Λ	Permeabilidade no entreferro.
b	Fluxo magnético.
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo.
j_s	Densidade linear de corrente.
p	Número de pólos eletromagnéticos.
ω_S	Frequência angular fundamental.
F	Força radial por unidade de área
V	Volts.
A	Âmpere.
CV	Cavalo Vapor.
Hz	Hertz
rpm	Rotação por minuto.
μm	Micrometro.
Y_o	Módulo de Youngs.
R	Raio interno do estator.
N	Raio natural do estator.

E	Modulo de elasticidade do material.
h	Comprimento do estator.
nm	Nanometro.
g	Gramas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVOS E METAS	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivo Específico	13
1.3	ESTADO DA ARTE	13
2	FIBRA ÓPTICA	16
2.1	HISTÓRIA DA FIBRA ÓPTICA	16
2.2	SENSORES EM FIBRA ÓPTICA	17
2.3	SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM REDES DE BRAGG	18
3	EXCENTRICIDADE EM MOTORES INDUÇÃO TRIFÁSICO	21
4	MATERIAIS E MÉTODO	26
5	RESULTADOS	31
5.1	ANÁLISE PARA DIFERENTES FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO	33
5.2	ANÁLISE PARA DIFERENTE CARGAS ACOPLADAS AO EIXO DA MÁQUINA	35
6	CONCLUSÕES	41

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento e descobertas de novas tecnologias em todos os setores industriais, temos um aumento a cada dia que passa, na demanda de energia elétrica que é gerada e devido a fatores geográficos, climáticos e a outros que influenciam na geração, conseqüentemente o aumento dos custos de energia e a sua disponibilidade ser limitada. A otimização da eficiência energética tornou-se objetivo de intensas pesquisas e estudos, buscando reduzir os custos de manutenção e melhorar cada vez mais a utilização de máquinas e equipamentos elétricos (SOUSA *et al.*, 2016).

Os motores elétricos são usados em uma ampla variedade de aplicações, como meio de conversão de energia elétrica em trabalho mecânico motriz. Bombas, elevadores e unidades da talha são apenas algumas das aplicações de motores de indução (KRAUSE *et al.*, 2002), são responsáveis pelo consumo de 65% da eletricidade usada pelos países industrializados e respondendo por mais de 90% das cargas motoras instaladas na indústria (BRITO, 2007).

Entre os diferentes modelos de motores elétricos, os motores de indução trifásicos, principalmente os do tipo gaiola-de-esquilo, são os mais utilizados, tanto em aplicações domésticas como industriais. O monitoramento e as condições de trabalho das máquinas elétricas, torna-se cada vez mais essencial tanto para os setores industriais como acadêmicos (SOUSA *et al.*, 2016).

As grandezas mais utilizadas para monitorar motores de indução trifásicos são correntes, tensões, temperaturas e vibrações. Mas em muitos casos, o nível de deformação em motores de indução trifásicos é suficiente para diagnosticar falhas mecânicas, como uma barra de rotor quebrada (BAYINDIR *et al.*, 2008) e (SOUSA *et al.*, 2017).

A deformação é afetada pelas forças eletromagnéticas e mecânicas no motor. A força eletromagnética é causada pela atração do rotor pelo estator da máquina que induzem tensão na direção do campo magnético girante. As forças mecânicas são causadas pela excentricidade entre o rotor e o estator. A excentricidade do motor é corrigida na fabricação, mas alguns fatores, tais como carga desequilibrada, rolamentos com falhas e ventilação forçada, afetam a excentricidade de fábrica. O motor desequilibrado provoca estresse mecânico excessivo para a máquina (FINLEY *et al.*, 2000).

Para a medição da deformação será instalada rede de Bragg em fibra óptica no interior do motor, entre dois dentes do estator, devido as suas características de imunidade eletromagnética e pequeno tamanho. A medição será dessa forma onde o motor de indução trifásico apresenta maior pressão de forças mecânicas e elétricas no entreferro da máquina elétrica (SOUSA *et al.*, 2016).

Os sensores ópticos têm grande variedade de aplicações e os sensores baseados nas propriedades das redes de Bragg em fibra óptica, encontram-se entre os sensores de fibra óptica como os mais utilizados, devido a uma característica importante que é o fato de perturbações externas como compressão, tração ou variações de temperatura alteram o comprimento de onda central refletido. Essa codificação espectral diminui problemas derivados de ruídos que afetam outros tipos de sensores e facilita a calibração (SILVA, 2005,).

No entanto, o uso de sensores FBG para medição de vibração é baseado em um acelerômetro externo. A medição de vibração externa é usada para detecção de desequilíbrio de tensão e componentes harmônicos em motores de indução (CORRES *et al.*, 2006). Os sensores FBG foram usados no sistema de monitoramento on-line para monitorar a vibração do motor por (WEI *et al.*, 2011).

Trabalhos que já utilizaram e apresentam aplicações com sensores FBG já foram realizados por (SOUSA *et al.*, 2012) para monitoramento de motores de indução trifásicos, por (THEUNE *et al.*, 2002) e (MARTELLI *et al.*, 2012) para geradores elétricos de potência, (SOUSA *et al.*, 2013) por meio de medição de temperatura e (RODRÍGUEZ *et al.*, 2007) para vibração. A principal contribuição do presente trabalho é a medição interna da deformação na superfície do estator e a possibilidade de identificar a deformação dinâmica sobre o estator de um motor de indução trifásico.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os motores de indução trifásicos em funcionamento podem causar uma deformação no estator, que pode levar a problemas que reduzem significativamente a confiabilidade da máquina, levando a um aumento no custo de manutenção. Utilizaremos um método para resolver esse problema através da realização de uma análise da deformação dinâmica em motores de indução trifásicos, trabalhando com variação de carga e utilizando sensores rede de Bragg em fibra óptica.

1.2 OBJETIVOS E METAS

A proposta do trabalho de conclusão do curso esta dividida em um objetivo geral e nos objetivos específicos.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é a montagem de uma bancada para fazer análise da deformação dinâmica de um estator de um motor de indução trifásico, empregando sensores de rede de Bragg em fibra óptica em diferentes situações de cargas.

1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Com a realização deste trabalho temos como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica atualizada sobre análise da deformação dinâmica, parâmetros de motores elétricos e utilização de sensores ópticos;
- Estudar a excentricidade dinâmica no estator com desequilíbrio em motores de indução trifásico com sensores ópticos por Sousa et al.: (2016);
- Montar uma bancada com um arranjo experimental para medição da deformação do estator;
- Instalação dos sensores rede de Bragg no estator do motor de indução trifásico;
- Acoplamento de carga no eixo do motor de indução trifásico em análise;
- Analisar e discutir os resultados obtidos.

1.3 ESTADO DA ARTE

O motor de indução, foi inventado por Nikola Tesla no ano de 1888, e a evolução desse tipo de motor ocorreu de forma bastante rápida, se tornando o principal tipo de conversor eletromecânico de energia utilizado em aplicações industriais. A grande utilização de motores de indução é devido as suas características de robustez, baixo custo e fácil adaptação a diversos tipos de carga, como esteiras, moinhos, bombas, ventiladores, elevadores entre outros. Além disso, os motores elétricos podem ser empregados em processos com velocidade constante ou variável. (VENERO; HIYODO, 2008).

A modelagem de motores é uma questão importante no estudo desse tipo de máquina. Uma das aplicações da modelagem de motores de indução é em sistemas que necessitam velocidade variável utilizando técnicas de controle vetorial. Outro exemplo de aplicação de modelos de motores de indução são em detecção de falhas. Uma falha em motores de indução pode ocasionar, por exemplo, um curto circuito entre espiras do enrolamento do estator. Qualquer falha em um motor de indução é um desequilíbrio que se reflete nas quantidades físicas, como o torque, fluxo do entreferro e correntes do estator (SOUZA, 2011).

Para aplicações em controle vetorial e detecção de falhas, é necessário que o modelo descreva o comportamento do motor independente da situação de operação como, por exemplo, variações de cargas e na tensão de alimentação do motor. Devido os parâmetros do modelo elétrico que variam em função do ponto de operação do motor, como por exemplo, temperatura, comportamento não linear do circuito magnético e fontes de alimentação não senoidal (SOUZA, 2011).

A detecção de falhas em motores de indução trifásicos tem sido largamente investigada nos últimos anos. Entretanto, a tecnologia nesse campo continua em permanente evolução e novas tecnologias estão surgindo a cada ano. O objetivo é obter melhor eficiência na detecção de falha com algoritmos simples de análise e sensores de baixo custo (HENAO *et al.*, 2003).

Os principais fatores que afetam o comportamento do motor podem ser de origem magnéticas e mecânica. As de origem magnéticas podem ser classificados como o deslocamento do centro magnético (excentricidade), defeitos nas barras do rotor, desequilíbrio da rede de alimentação, problemas no isolamento. As de origens mecânicas são classificadas devido ao desbalanceamento, desalinhamento, eixo empenado, folga mecânica e problemas nos mancais ou rolamentos (BACCARINI, 2005).

Análise de vibração tem sido usada pelas equipes da área de manutenção para detecção e diagnósticos de falhas em motores devido às suas potencialidades. Através da análise do espectro do sinal da vibração, pode-se detectar tanto os defeitos de origem elétrica quanto os de origem mecânica presentes no motor (FINLEY *et al.*, 2000).

Os problemas de vibração pode variar de um simples incômodo para uma indicação de falha iminente no motor. Com sólido conhecimento dos fundamentos de motor e análise de vibração, é possível identificar a causa raiz do problema e corrigir de forma mais significativa, ou verificar o impacto do aumento da vibração sobre a confiabilidade e longevidade do motor (FINLEY *et al.*, 2000).

O método Viena (Kral et al., 2000), (Wieser et al., 1998a) e (Wieser et al., 1998b) foi desenvolvido para detecção de barras quebradas. A técnica utiliza sinais de entrada de transdutores e encoders. Somente uma subrotina adicional é necessária para a tarefa de análise do diagnóstico. O método calcula o conjugado desenvolvido pelo motor de indução através dos modelos de tensão e de corrente. A diferença entre os dois conjugados é usada para o diagnóstico da falha.

Em (SOUSA *et al.*, 2016) é usada a medição da deformação em motores de 2 polos e 4 polos, operando em condição sem carga e em condição de excentricidade do eixo, usando sensores FGBs e instalados aonde o motor apresenta os maiores esforços devido as forças mecânicas e elétricas no entreferro.

2 FIBRA ÓPTICA

2.1 HISTÓRIA DA FIBRA ÓPTICA

Em 1969, a primeira fibra gradiente foi fabricada pela corporação Nippon Sheet Glass e Nippon Electric. Mas essas fibras ainda tinham uma atenuação de 100 dB/Km causado principalmente por impurezas químicas do vidro. Após estudos e melhoramentos, foi apresentada em 1976 uma atenuação para menor que 1 dB/Km , disponível no Japão, USA e Grã-Bretanha (KREUZER, 2006).

Até os anos de 1970, a principal aplicação das fibras ópticas era em instrumentos endoscópicos que são usados frequentemente em procedimentos clínicos para observar o interior do corpo humano com um meio de transmitir luz e imagem (MENDEZ, 2007).

Houve também um interesse crescente na possibilidade de usar as fibras ópticas em sistemas de comunicação, devido a sua elevada largura de banda, o que possibilitaria um número mais elevado de utilizadores simultâneos suportados por um único canal de transmissão comparando aos sistemas de comunicação tradicionais (RIBEIRO, 1996).

Ken O. Hill, 1978, descobriu o efeito da fotossensibilidade em fibra de sílica dopada com germânio. Durante um experimento foi colocada a exposição prolongada à luz ultravioleta que aumentou a atenuação do sinal transmitido pela fibra. A intensidade da luz refletida pela fibra aumentou significativamente com o tempo de duração da exposição, esse aumento na refletividade foi o resultado de um rede de índice de refração permanente sendo fotoinduzida na fibra (SILVA, 2005,).

A teoria e uso de redes de Bragg remonta ao final dos anos 1980, mas fortes investimentos comerciais não aconteceram até meados da década de 1990. A utilização de sensores ópticos foi impulsionada pelo alto crescimento das telecomunicações, onde foi percebido um grande aumento no número de empresas e grupos de pesquisa envolvidos com projeto de fabricação, encapsulamento e utilização das redes de Bragg em fibra óptica. O desinteresse na fotossensibilidade em fibras ópticas foi decorrente do efeito ser considerado como fenômeno presente somente em fibras especiais. Quase uma década mais tarde, foi observada a fotossensibilidade em diferentes tipos de fibras, todas com alta concentração de germânio, (STONE *et al.*, 1987).

Em 1988, um importante avanço na pesquisa de fotossensibilidade em fibras

foi relatado, demonstrando a fabricação de redes de Bragg no núcleo de fibra óptica pela exposição lateral, externa à fibra, de um padrão de interferência na região espectral do ultravioleta (MELTZ *et al.*, 1989).

Uma técnica de gravação de redes com máscara de fase, a mais difundida atualmente, foi apresentada por Hill, *et al.*, 1993, foi adaptada na fabricação de rede de Bragg, essa técnica é a mais simples e reproduzível das técnicas de fabricação de redes de Bragg. Com o melhoramento das fibras ópticas e das técnicas de gravação das rede de Bragg, sua utilização no desenvolvimento de dispositivos para aplicações em telecomunicação e sensoriamento tem se tornado mais acessível.

2.2 SENSORES EM FIBRA ÓPTICA

A área de instrumentação e medição, no que refere-se ao desenvolvimento de sensores, tem-se expandido muito nos últimos anos. A necessidade de integração de sensores de elevada qualidade nos sistemas de medição e controle torna-se cada vez mais necessária. Em paralelo com o desenvolvimento acelerado de sensores baseados em tecnologia microeletrônica, outros sensores com técnicas ópticas tem progredido significativamente desde o aparecimento da fibra óptica (RIBEIRO, 1996).

Em geral, o mercado de sensores de fibra óptica está em um estágio de crescimento e ainda é difícil de avaliar e prever com precisão seu desenvolvimento. Além disso, os segmentos de mercado são fragmentados devido à variedade de aplicações em sensoriamento remoto e indústrias.

O mercado atual de sensores de rede de Bragg em fibra óptica é principalmente composto por três segmentos principais: Dispositivos sensores (redes de Bragg para aplicações em sensoriamento), a instrumentação (dispositivos de interrogação, multiplexadores, sistemas de aquisição de dados, softwares e interfaces gráficas) e a integração de sistemas e serviços de instalação (gerenciamento de projetos de engenharia relacionados com a implementação de soluções em sensoriamento).

Os sensores ópticos têm grande variedade de aplicações. Embora existam outros sensores elétricos, baseados em transdutores capacitivos e piezoelétricos, para essas mesmas finalidades, seu uso em ambientes de alta-tensão ou com forte campo eletromagnético é prejudicado. Os dispositivos com sensores à base de fibra óptica demonstram ser uma ferramenta ideal para inspeção de estruturas, devido à imunidade a campos eletromagnéticos, potencial para transmissão de sinais a longas distâncias, flexibilidade e pequeno tamanho (SILVA, 2005,).

Através da flexibilidade pode ser usado como um único elemento sensor por fibra ou várias redes com diferentes comprimentos de onda de Bragg podem ser gravados na mesma fibra sem que perturbe o desempenho da outra, chamados sensores quase-distribuídos. As redes de Bragg em fibra óptica se tornaram dispositivos ideais para serem aplicados no sensoriamento de estruturas em diferentes campos e pontos de atuação (SILVA, 2005,).

O princípio da fibra óptica está baseado na reflexão interna total da fibra que a luz percorre. Para que a luz seja guiada dentro do núcleo da fibra óptica, ela deve encontrar as condições necessárias para a reflexão interna total. A diferença entre o índice de refração dos materiais empregados na fabricação da fibra e do ângulo do feixe de luz incidente, onde o índice de refração do núcleo da fibra é maior do que o índice do meio que a envolve. Segundo a lei de Snell-Descartes, se o ângulo do feixe de luz incidente na fibra for maior do que o ângulo limite (ângulo o qual o raio refratado é tangente a superfície de separação entre os dois meios), o feixe de luz incidente não passará para o meio de menor índice de refração, fazendo com que a propagação do sinal seja totalmente refletida no interior da fibra óptica (HALLIDAY DAVID; WALKER, 2007).

2.3 SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM REDES DE BRAGG

Os sensores baseados nas propriedades das redes de Bragg em fibra óptica ou *FBG* (*Fiber Bragg Grating*), encontram-se como os sensores de fibra óptica mais utilizados nos últimos anos (HILL; HILL, 1978). Em termos funcionais, as redes de Bragg têm comportamento semelhante ao filtro eletrônico rejeita faixa. As técnicas de produção permitem que elas sejam utilizadas, como por exemplo sensores, filtros espectrais, espelhos de realimentação em lasers de largura de linha estreita, dispositivos multiplexadores por divisão de comprimento de onda *WDM* e na geração de pulsos curtos (HOSHI; KASHYAP, 1999).

As redes de Bragg em fibra ópticas usam um método que é baseado em um interferômetro de divisão de amplitude que permite que a superposição de dois feixes, incidente transversalmente sobre a fibra, resulte em um padrão de interferência em seu núcleo. A rede de Bragg em fibra óptica em sua forma mais simples é constituída pela interferência dos feixes e é responsável pela modulação periódica do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica, com índice efetivo denominado n_{ef} .

A alteração no índice é feito perpendicular ao longo do eixo longitudinal da fibra, com um período Λ constante. Os planos paralelos de maior e menor índice de refração formam uma rede de Bragg (HILL; MELTZ, 1997), o comprimento de onda próximo

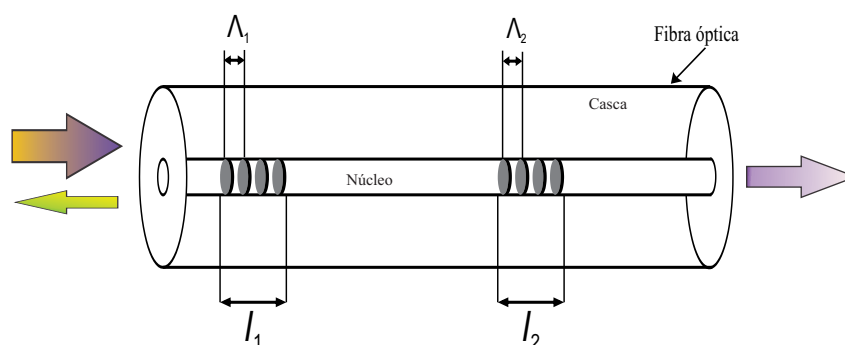


Figura 1: Fibra óptica com duas rede de Bragg gravadas no núcleo.

Fonte: Adaptado de Sousa (2011).

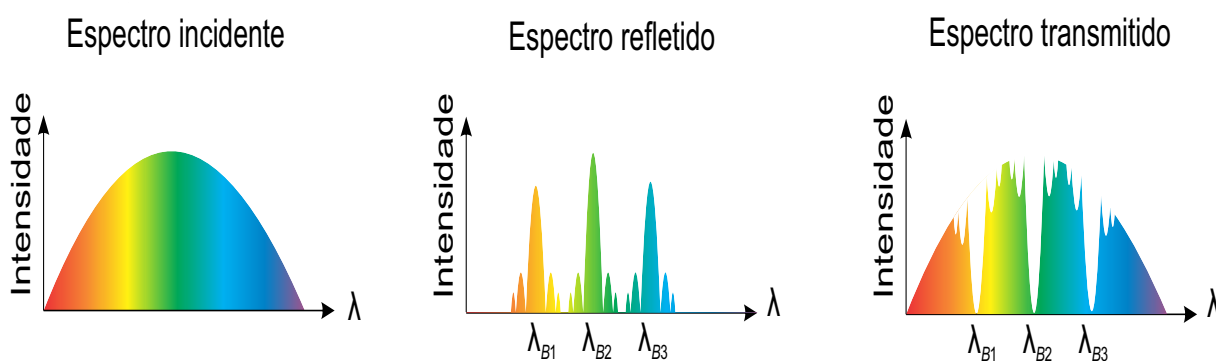


Figura 2: Espectro associados a fibra óptica.

Fonte: Adaptado de Sousa (2011).

ao centro do espectro refletido λ_B , chamado de comprimento de onda de Bragg, é dado pela equação:

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda \quad (1)$$

onde o Λ é o período da rede de Bragg e n_{ef} é o índice de refração efetivo da FBG, cada um dos planos irá espalhar a luz confinada na fibra, se a condição de Bragg não for satisfeita, a luz refletida em cada plano subsequente torna-se progressivamente fora de fase e eventualmente a intensidade de luz refletida é cancelada. 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 (OTHONOS, 1997).

Na figura 1 é apresentada uma fibra óptica com uma rede de Bragg gravada no núcleo da fibra, como exemplo de dimensão e do tamanho das medidas, um comprimento de onda λ de $1547,5 \text{ nm}$, o comprimento da rede de Bragg l de 5 mm e com o período da rede de Bragg Λ de $0,522 \text{ }\mu\text{m}$.

Na figura 2 são apresentados três espectros de intensidades de comprimentos de ondas. O espectro refletido pela rede satisfaz a condição de Bragg, formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central conforme os parâmetros da rede de

Bragg. O espectro transmitido não satisfaz a condição de Bragg, a intensidade de luz que não é refletido, será transmitido pela fibra. Um espectro incidente na rede mostra os comprimentos de onda na fibra. Portanto, o espectro incidente, satisfaz o princípio de conservação de energia e a intensidade de luz que não é refletido, será transmitido pela fibra óptica.

Um método da gravação de redes de Bragg em fibra óptica esta baseada na propriedade de alterar o índice de refração no núcleo da fibra por meio da absorção óptica da luz ultravioleta. A fotossensibilidade permite a construção de rede, obtido através da alteração permanente do índice de refração do núcleo da fibra óptica. A modulação periódica do índice de refração atua como um espelho seletivo de comprimentos de onda que satisfazem à condição de Bragg, obtendo-se assim as redes de Bragg (HILL; FUJII; JOHNSON, 1978).

A gravação de redes de Bragg em fibras ópticas fotossensíveis pode ser possível através de algumas técnicas. O método de gravação por Máscara de Fase emprega elementos ópticos difrativos (máscara de fase) para modular espacialmente o feixe de luz ultravioleta de gravação (KASHYAP, 1999). A máscara de fase reduz sensivelmente a complexidade do sistema de gravação das rede de Bragg. A simplicidade em operar com apenas um elemento ótico garante um método que apresenta robustez e estabilidade. Este processo de gravação é utilizado pelo Grupo de Dispositivos Fotônicos e Aplicações da UTFPR - Campus Curitiba. As redes utilizadas neste trabalho foram cedidas gentilmente pelo grupo de Curitiba.

3 EXCENTRICIDADE EM MOTORES INDUÇÃO TRIFÁSICO

Os problemas causados por vibrações mecânicas em máquinas elétricas geram altos custos as indústrias. Tais custos são devidos principalmente às paradas para manutenção corretiva em mancais, rolamentos e a diminuição da vida útil dos equipamentos. Assim o monitoramento destas vibrações, bem como sua análise são de grande importância para a indústria, principalmente para motores de maiores potências, seja pelo seu custo ou pela sua importância no processo industrial.

A excentricidade do motor é corrigido durante o projeto e fabricação, mas alguns fatores, tais como carga desequilibrada, rolamentos defeituosos e ventilação forçada, podem afetar o equilíbrio de fábrica. O motor desequilibrado provoca estresse mecânico excessivo na máquina (FINLEY *et al.*, 2000).

Em um motor concêntrico ideal, para que a excentricidade do estator e do rotor coincidam no mesmo ponto, as forças radiais são anuladas e a força líquida resultante agindo sobre os dois corpos cilíndricos é igual a zero, e a única força no motor é o dobro da frequência elétrica de alimentação (RODRÍGUEZ *et al.*, 2007). Entretanto, quando existe uma anormalidade de desequilíbrio, a distribuição da tensão será assimétrica e produz novas componentes de forças (RODRÍGUEZ *et al.*, 2007). Essa excentricidade em motores de indução trifásicos são classificados como estático e dinâmico.

A excentricidade estática é causada devido a um desalinhamento entre o eixo do rotor e o centro do estator, quando o eixo do rotor gira em torno de um eixo fixo. Essa excentricidade muitas vezes originada devido a tolerância de fabricação. O desequilíbrio estático excessivo geralmente ocorre quando os rolamentos estão gastos ou mal posicionado. As tolerâncias em usar tipos similares de rolamentos, mesmo sendo feito pelo mesmo fabricante, com o peso do rotor agindo com forças diferente um cada rolamentos pode levar a essa situação. É pouco provável que os rolamentos em ambas as extremidades da máquina tem o mesmo desvio de desgaste. Por questões de simplicidade, é geralmente modelada a excentricidade por posicionar o rotor e o estator paralelas umas as outras e mantendo uma diferença constante ao longo do comprimento axial da máquina.

A excentricidade dinâmica ocorre quando o rotor não roda em torno de um eixo fixo, enquanto ainda gira em torno do eixo do estator. Os desequilíbrios estáticos e dinâmicos podem coexistir em um motor de indução trifásicos. As causas mais comuns

de desequilíbrio dinâmicos são as tolerâncias de fabricação e os desgastes mecânicos. Além disso, durante o desequilíbrio dinâmico, forças significativas são produzidas e tendem a puxar o rotor mais longe da posição concêntrica.

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

O comprimento do entreferro de um rotor é constante para um motor de indução trifásico concêntrico e não varia com a posição angular φ e a velocidade de rotação ω_r . Para um motor que apresente excentricidade dinâmica e uniforme axial, o comprimento do entreferro g pode ser expresso como (DORRELL, 1995) e (DORRELL *et al.*, 1997).

$$g(\varphi, t) = \bar{g}(1 - d_E \cos(\omega_r t - \varphi)) \quad (2)$$

onde \bar{g} é o intervalo médio do entreferro, o d_E é o grau de excentricidade dinâmica obtido pela razão entre a distância linear entre o centro do rotor e do centro do estator e o entreferro médio como mostra a figura 3.

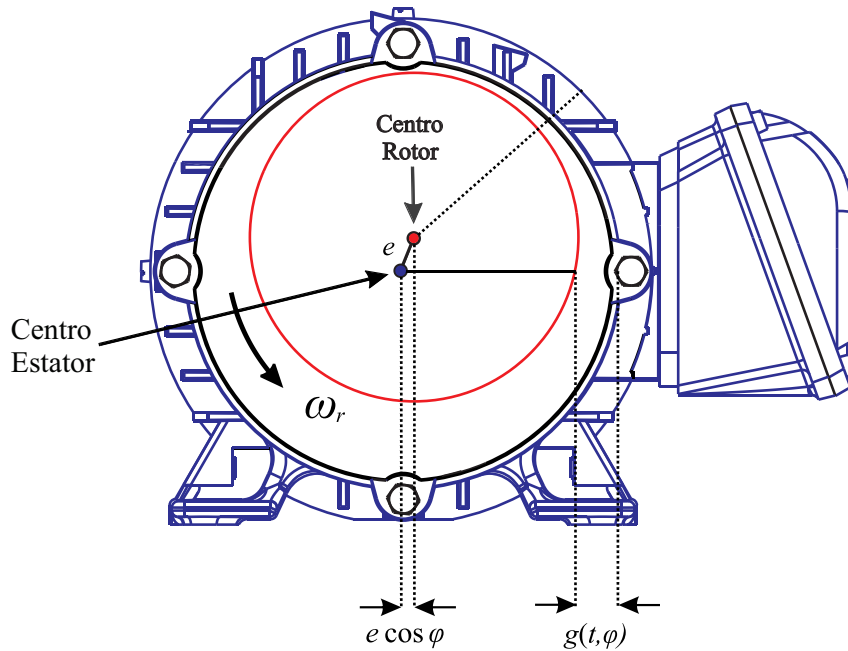


Figura 3: Excentricidade da máquina e as variáveis envolvidas.
Fonte: Adaptada de Sousa et al (2016)

Para obter a expressão da permeabilidade do entreferro, necessitamos aplicar a Lei de Ampère, onde é necessário obter primeiramente a inversa da equação (2). Para pequenos valores de excentricidade e , a permeabilidade no entreferro Λ pode ser aproximado

por:

$$\Lambda(\varphi, t) = \frac{1}{g}(1 - d_E \cos(\omega_r t - \varphi)) \quad (3)$$

assumindo que existe um fluxo magnético através do entreferro, mesmo que haja excentricidade, o fluxo magnético no entreferro b é dada por:

$$b(\varphi, t) = \Lambda(\varphi, t) \int \mu_0 j_s(\varphi, t) d\varphi \quad (4)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo e $j_s(\varphi, t)$ representa a densidade linear de corrente do estator:

$$j_s(\varphi, t) = J \sin(\omega_s t - p\varphi) \quad (5)$$

onde p é a número de pólos do motor e ω_s é a frequência angular fundamental. Substituindo a equação (3) e (5) na equação (4) temos:

$$b(\varphi, t) = \frac{1}{g}(1 - d_E \cos(\omega_r t - \varphi)) \int \mu_0 J \sin(\omega_s t - p\varphi) d\varphi \quad (6)$$

resolvendo a integral indefinida temos:

$$\begin{aligned} b(\varphi, t) &= B_s^p \cos(\omega_s t - p\varphi) \\ &+ B_s^{p-1} \cos[(\omega_s - \omega_r)t - (p-1)\varphi] \\ &+ B_s^{p+1} \cos[(\omega_s + \omega_r)t - (p+1)\varphi] \end{aligned} \quad (7)$$

onde,

$$B_s^p = \frac{\mu_0 J_s}{pg} \quad (8)$$

e

$$B_s^{p+1} = \frac{\mu_0 J_s}{2pg} d_e \quad (9)$$

e

$$B_s^{p-1} = \frac{\mu_0 J_s}{2pg} d_e \quad (10)$$

A força radial por unidade de área F no estator e rotor são proporcionais a densidade de fluxo no entreferro da gaiola em qualquer ponto do motor. A força radial é expressa por:

$$F(\varphi, t) = \frac{1}{2\mu_0} b^2(\varphi, t) \quad (11)$$

com algumas manipulações algébricas e reescrevendo a equação (7) na equação (11) temos

uma força radial por unidade de área:

$$F(\varphi, t) = \frac{1}{2\mu_0} [(B_s^p)^2 \cos(4\pi f_s t + 2p\varphi) \quad (12a)$$

$$+ B_s^{p-1} B_s^{p+1} \cos(4\pi f_r t - 2\varphi) \quad (12b)$$

$$+ B_s^p B_s^{p-1} \cos(2\pi f_r t + 2p\varphi) \quad (12c)$$

$$+ B_s^{p-1} B_s^p \cos(4\pi f_s + 2\pi f_r)t - \varphi) \quad (12d)$$

$$+ B_s^{p+1} \cos(4\pi f_s - 2\pi f_r)t - \varphi)] \quad (12e)$$

$$+ (B_s^{p+1})^2 \cos(2(2\pi f_s + 2\pi f_r)t - 2(p+1)\varphi) \quad (12f)$$

$$+ (B_s^{p-1})^2 \cos(2(2\pi f_s - 2\pi f_r)t - 2(p+1)\varphi) \quad (12g)$$

onde a velocidade angular fundamental é dada por,

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (13)$$

e a velocidade angular de rotação é dada por,

$$\omega_r = 2\pi f_r \quad (14)$$

Na equação (12) são apresentadas as componentes de frequência da deformação do estator. A componente de frequência $2f_s$, apresentada em (12a) é resultado da força eletromagnética no entreferro e depende apenas da frequência da fonte de alimentação. A expressão (12b) apresenta a componentes de frequência $2f_r$, que é o dobro da velocidade do rotor. A componente de frequência f_r apresentada em (12c), é o mesmo que a velocidade do rotor. Os componentes de frequência apresentadas e (12a) e (12c) depende do número de pólos eletromagnéticos do motor.

Outras componentes de frequências que aparecem, são uma combinação da velocidade do rotor e a frequência da fonte de alimentação. Estes componentes de frequências são $2f_s \pm f_r$, apresentadas em (12d) e (12e), e $2(f_s \pm f_r)$, apresentadas em (12f) e (12g).

A forma de onda do fluxo no entreferro tem componentes, que variam periodicamente devido ao campo rotativo do estator e da velocidade do rotor. A força que atua em qualquer ponto do estator varia periodicamente. Como o fluxo magnético é proveniente de um sinal senoidal, a força em determinado ponto do estator também é senoidal (VERMA; BALAN, 1994). Da equação (12) pode-se notar que a excentricidade dinâmica produzirá frequências de força adicionais e conseqüentemente, a deformação do estator apresentará as mesmas frequências.

É importante notar que a equação (12) são obtida sob aproximações e tem

simplificações. Por exemplo, quando o ferro do estator apresenta saturação, tem uma variação do comprimento do entreferro devido as ranhuras do estator, a forma não cilíndrica das ranhuras do estator, que são usados para acomodar os enrolamentos, causa variação no entreferro e conseqüentemente também no fluxo magnético. Além disso, as ranhuras levam á distribuição não senoidal de densidade de fluxo no entreferro, que da origem a componente de frequência harmônica no espectro de vibração. Modelos mais complexos podem ser obtidos por simulação de análise de elementos finitos, conforme apresentados em (VALAVI *et al.*, 2014).

Um motor que opera na carga nominal terá maior força atuando sobre seu eixo, o que leva a variação na excentricidade da máquina, como também na densidade de valores de corrente do estator, devido a maior corrente necessária nesta condições. Entretanto, vale ressaltar que o objetivo desde estudo não é determinar as amplitudes das tensões induzidas, mas as suas frequências. A amplitude varia de acordo com o tipo de motor, sua potência, seu tamanho e sua condição de carga (VERMA; GIRGIS, 1975).

4 MATERIAIS E MÉTODO

Um método experimental será utilizado neste trabalho para as medições com sensores em fibra óptica na máquina. Os testes serão realizados sob condições sem carga, com variação da frequência de alimentação e com acoplamento de massas fixadas no eixo do rotor. Obteremos as resposta de deformação do estator do sistema mecânico (no domínio da frequência e no tempo) para uma condição ideal e com carga fixada no eixo do motor como é apresentada na figura 4.

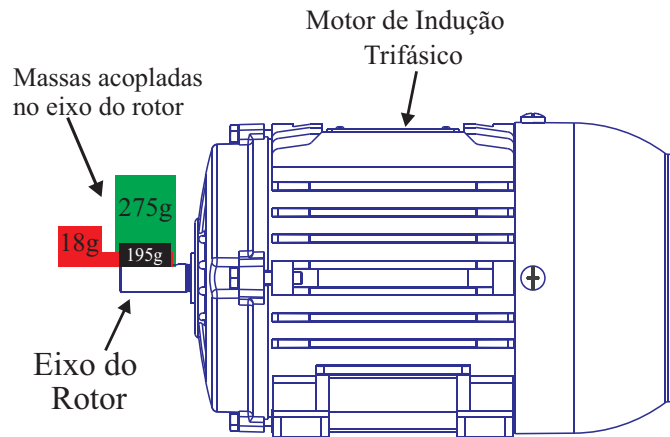


Figura 4: Esquema das massas acopladas ao eixo do rotor do motor.

Fonte: Autoria própria.

Uma bancada foi montada como mostra a figura 5 para os ensaios, utilizado um motor de indução trifásico, acionado com auxílio de um inversor de frequência, modelo Altivar 31 fabricado pela Telemecanique com capacidade para trabalhar com 5,5 kW/7,5 CV, 220/240 V e corrente máxima de 36,8 A.

Os testes foram realizados com um motor de indução trifásico 220/330 V, tipo rotor gaiola de esquilo, marca WEG, 5.0 CV, 4 pólos, frequência de 60 Hz, velocidade de 1800 rpm, ligado em triângulo com 220 V em cada bobina da máquina, a figura 6 mostra os dados da placa do motor utilizado nos ensaios.

Para a aquisição dos comprimentos de onda dos sensores de rede de Bragg em fibra óptica foram utilizados um interrogador SM 125 óptico, 4 canais, fabricado pela Micronoptic, que faz a conversão dos dados analógico para digital, tendo uma taxa de amostragem de 1 kHz.

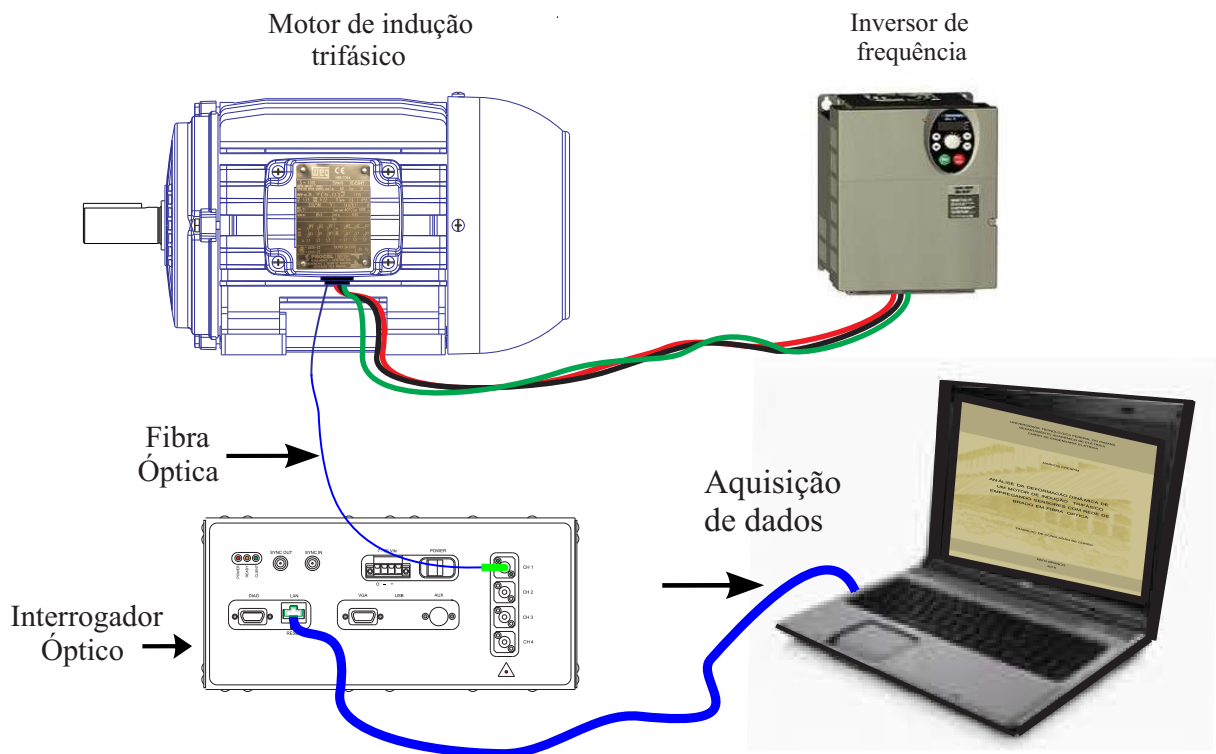


Figura 5: Esquema da bancada para aquisição de dados.
Fonte: Autoria própria.

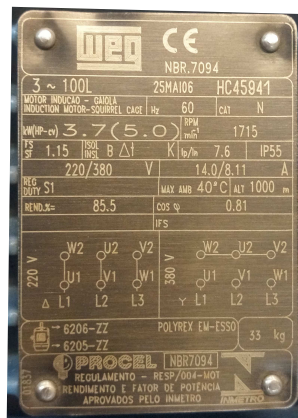


Figura 6: Dados da placa do motor de indução.
Fonte: Autoria própria.

Para fazer a comunicação com o interrogador óptico e os sensores de fibra óptica, foi utilizado o programa CatmanEasy da HBM, ajustado um ganho de 25 dB e um *Noise Threshold* de 50% para detectar os picos das ondas e para melhorar a qualidade e sensibilidade do sinal em cada um dos sensores.

Após a aquisição dos dados pelo interrogador óptico, foram exportados pelo programa CatmanEasy para o programa MatLab e através da Transformada rápida de Fourier (FFT, em inglês fast Fourier transform), foi possível obter os espectros de frequências dos sinais coletados.

Para a análise da deformação, uma fibra óptica com dois sensores de rede de Bragg foram colados entre os dentes do estator da máquina. Os sensores ficaram espaçados a uma distância de 150 graus entre eles como é apresentada na figura 7. Esse ângulo foi medido após a colagem da fibra óptica e devido a distância de gravação de um sensor para o outro e o tamanho do diâmetro do estator influenciaram nesse resultado de 150 graus.

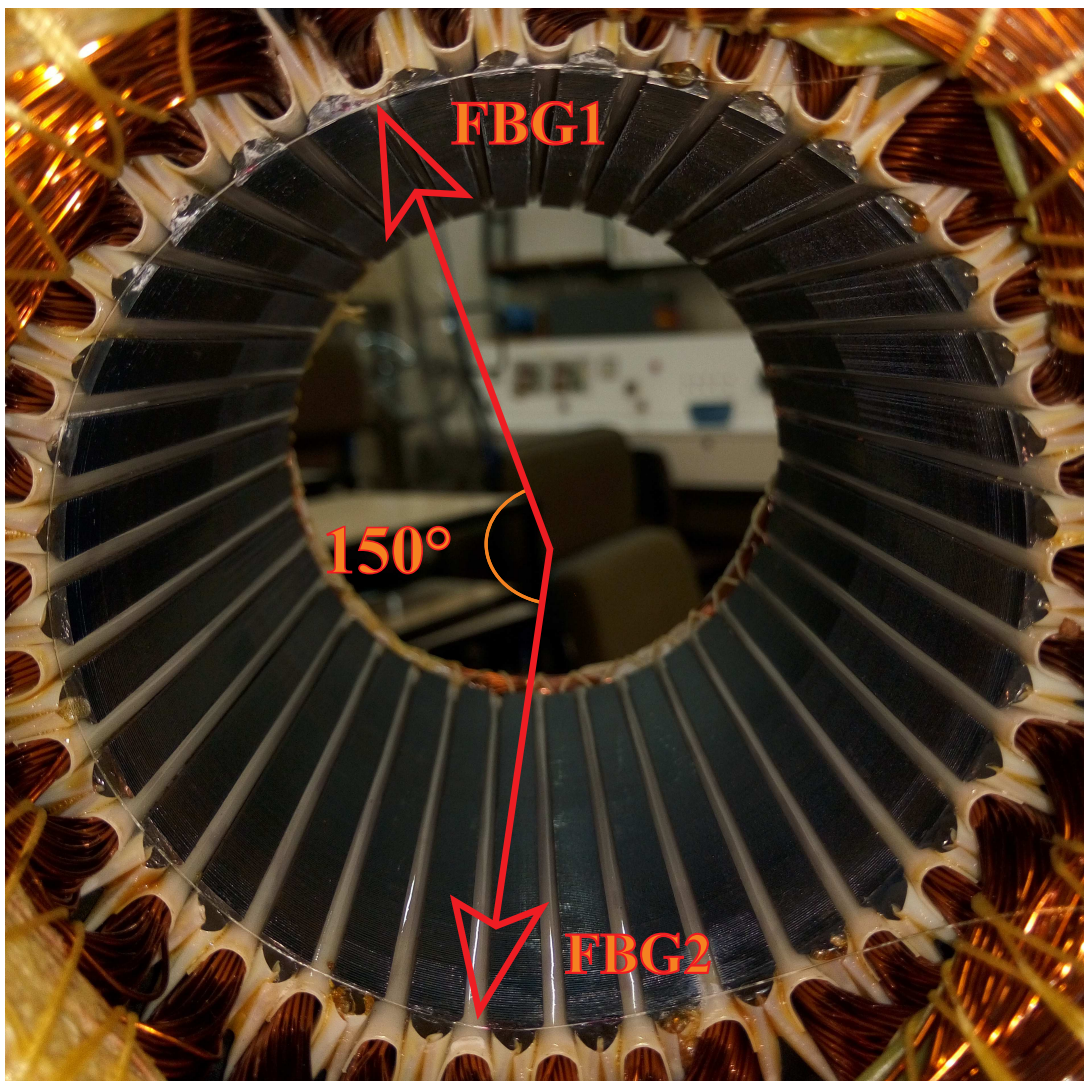


Figura 7: FBG colada entre os dentes do estator para medição da deformação.
Fonte: Autoria própria

Devido a fibra óptica ser de pequena dimensão e a sua fragilidade quando está sem as proteções, deve-se tomar muito cuidado para não quebrar a fibra óptica na hora da colagem no estator e perder os sensores, mas devido as suas características da pequena dimensão e imune a interferências eletromagnéticas, é possível a instrumentação do motor para medir as deformações na superfície do estator.

Dada a pequena dimensão do sensores de fibra óptica, cerca de $250 \mu\text{m}$ de diâmetro, não podem ser observados a olho nu na figura 7, apenas aonde esta sinalizada

com uma seta indicando o lugar que estão os sensores na fibra óptica. Na parte superior do motor está o sensor 1 de 1533 nm e na parte inferior do motor está o sensor 2 de 1553 nm .

A fibra óptica entra pela caixa de ligação do motor junto com os fios de alimentação trifásica e percorre entre as bobinas e a carcaça da máquina. Para a medição da deformação descritas na equação (12), as redes de Bragg foram colocadas entre os dentes do estator, porque a maior pressão de forças estão na direção axial. Portanto, a deformação causada foi medida quando a onda do fluxo magnético estava passando pelo ponto de medição. Foram instaladas entre os dentes como mostra a figura 7.

A distância entre cada dente é de 7 mm e uma cola de cianoacrilato foi usada para fixação dos sensores. A deformação dos dentes depende da geometria e do módulo de Youngs Y_o do material e da força F aplicada, dada pela equação 15 (SCHLENSOK *et al.*, 2008).

$$Y_o = \frac{RN}{Eh}F \quad (15)$$

onde R é o raio interno do estator, cujo N é o raio natural do estator, E é o módulo de elasticidade do material e h é o comprimento do estator. Estes parâmetros estão apresentados na figura 8.

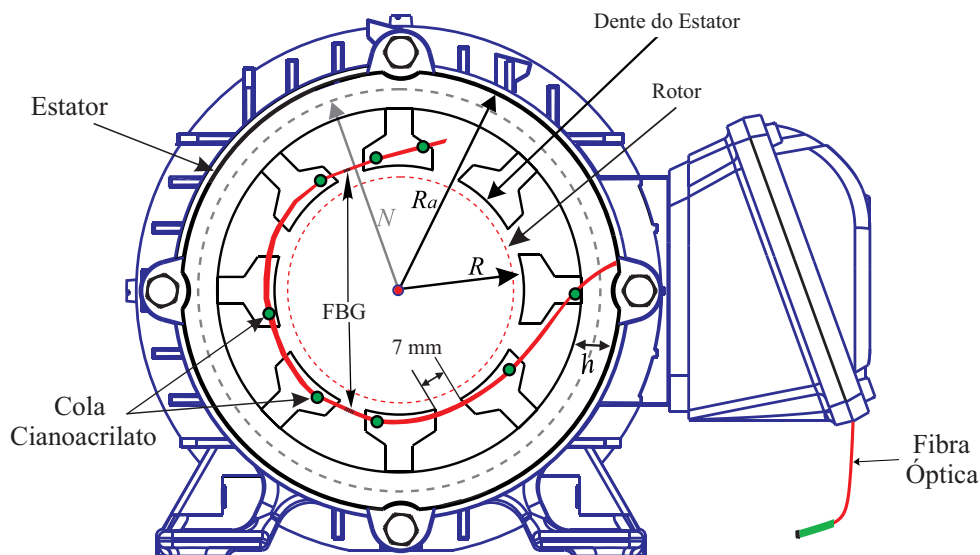


Figura 8: Localização das fibras entre os dentes do estator no motor de indução.

Fonte: Autoria própria.

Na literatura encontram-se trabalhos que através de análise por simulação usam elementos finitos para determinar a deformação do estator, que pode chegar na ordem de $0,1\ \mu\text{m}$ (SCHLENSOK *et al.*, 2008). Portanto, é necessário utilizar equipamentos que são muito sensíveis a deformação e imune a interferência eletromagnética. O sensor

em fibra óptica é ideal para essa aplicação nessas condições.

Os sensores de redes de Bragg em fibra óptica utilizadas neste trabalho foram gravadas com um laser *Excimer* alterando o índice de refração da máscara de fase na unidade de dispositivos de refração fotônico na UTFPR. Os sensores tem um comprimento de onda de 1533 nm e de 1553 nm. A FBGs tem reflexividade média maior que 70% e é um parâmetro importante devido as dimensões do motor.

5 RESULTADOS

Utilizando a transformada rápida de Fourier foi encontrado as componentes das frequências da deformação do estator, medido pelos sensores rede de Bragg, podemos observar na figura 9 as componentes das frequências em 30 Hz, 60 Hz, 90 Hz, 120 Hz, 150 Hz e 180 Hz do sensor 1 para a condição sem carga acoplada ao eixo do rotor. Os gráficos gerados com o programa MatLab foram feitos com 8192 pontos de comprimento do vetor.

Essas frequências são esperadas, de acordo com a equação 12, e são as combinações das frequências de forças mecânicas e magnéticas. A componente de frequência $2f_s$ depende apenas da frequência da fonte de alimentação da rede elétrica.

Para um motor de indução com um número diferente de pólos magnéticos, o espectro de deformação continuará a apresentar a componente de frequência fundamental de 120 Hz para uma frequência de alimentação da rede de 60 Hz.

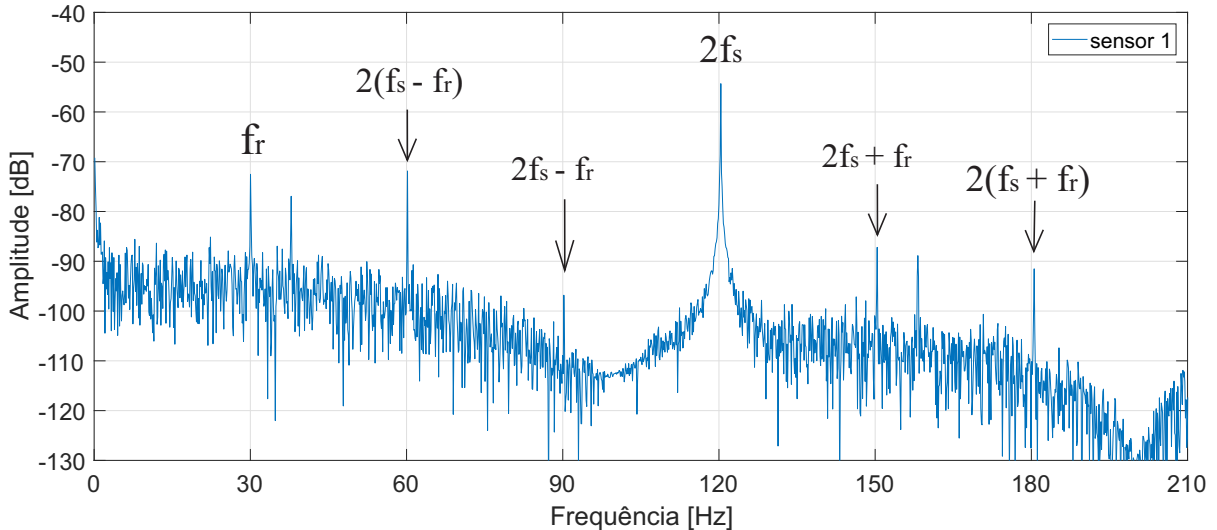


Figura 9: Espectro de frequência da deformação do estator com o sensor 1 sem carga

Fonte: Autoria própria

A vantagem de usar sensores de rede de Bragg em fibra óptica para esta aplicação é que eles podem medir diretamente os efeitos da deformação sobre a superfície do estator, dentro do motor. Assim, a deformação do sinal não estava sujeito a quaisquer parâmetros externos da máquina e a componente de 120 Hz é predominante, pois depende apenas da fonte de alimentação.

Os sensor 1 e o sensor 2 foram analisados separados, devido a forma como foi colado no estator e um deles ficou mais tracionado que o outro, mudando o índice de refração do sensor.

Na figura 10 mostra os resultados obtidos através dos dois sensores, estão plotados no mesmo gráfico para mostrar as semelhanças e diferenças e as suas respectivas respostas dos espectros de deformação com frequência de alimentação de 60 Hz e sem carga e acoplado ao eixo.

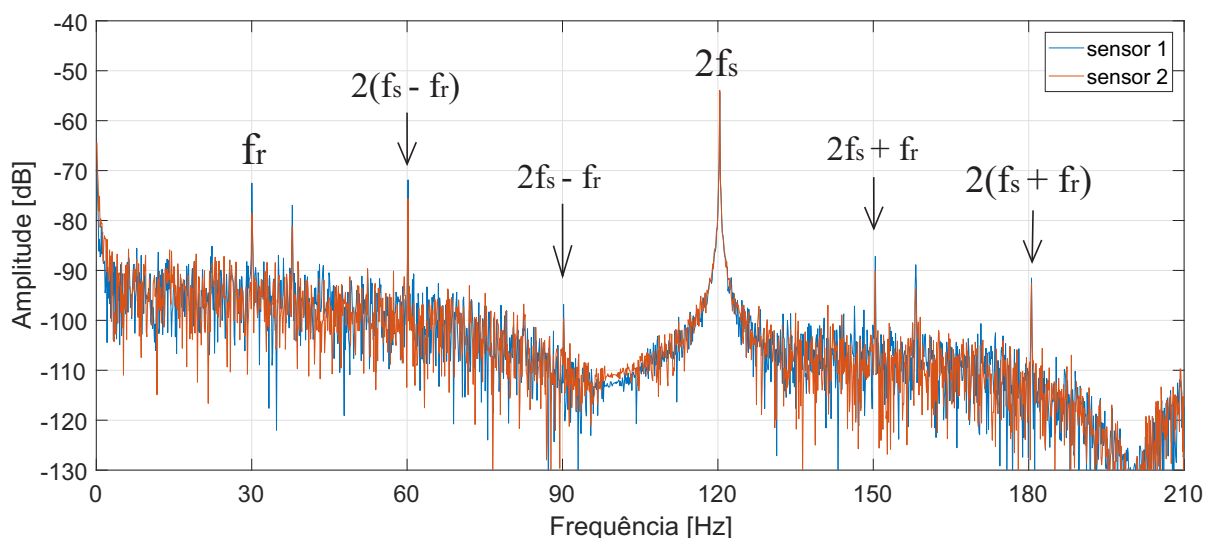


Figura 10: Espectro da deformação do estator com o sensor 1 e sensor 2.
Fonte: Autoria própria

Na componente de frequência de 120 Hz, os dois sensores estão com a mesma amplitude -52 dB, onde essa componente mostra apenas a frequência fundamental de alimentação $2f_s$ para os dois sensores de acordo com a equação 12 e não depende dos pólos magnéticos do motor para essa componente, apenas da frequência fundamental de alimentação.

Na componente de 30 Hz tem uma diferença na amplitude dos sensores, sendo que o sensor 1 tem uma amplitude de -72 dB, enquanto o sensor 2 tem uma amplitude de -77 dB. O sensor 1 ficou mais tracionado quando foi realizado a colagem dos sensores, tendo uma maior sensibilidade na refração dos picos de ondas da FBGs devido a velocidade de rotação e esforços mecânicos no motor, ele apresenta uma amplitude maior.

As componentes de 60 Hz, 90 Hz, 150 Hz e 180 Hz, possui a mesma proporção da diferença nas amplitude dos picos porque essas componentes são influenciadas pelas combinações das frequências fundamental, rotação e esforços mecânicos.

Para verificar o efeito das fases dos sensores FBGs instalado no estator, a figura 11 apresenta os resultados no domínio do tempo, para um motor operando sem cargas e

frequência de alimentação da rede elétrica de 60 Hz.

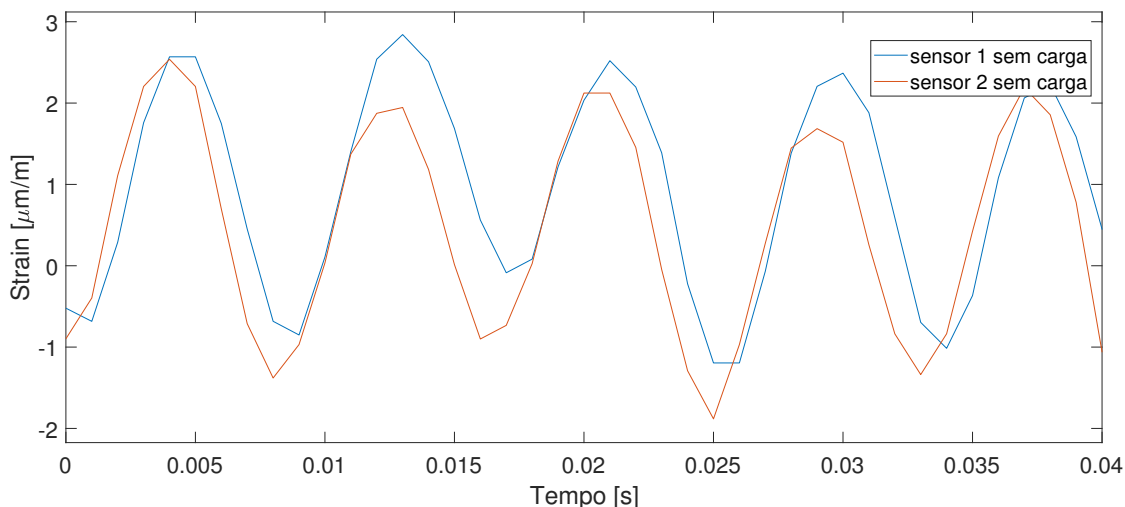


Figura 11: Sinal de vibração no domínio do tempo para a uma condição sem cargas.

Fonte: Autoria própria

A fase entre as FBGs apresenta o mesmo ângulo de 150 graus da separação geométrica dos sensores que está no interior do estator do motor. O sinal no domínio do tempo apresenta uma componente de frequência de 120 Hz, que é duas vezes a frequência da fonte de alimentação.

Em um motor de indução os enrolamentos do estator estão dispostos de modo a produzir uma rotação campo magnético senoidal, com distribuição no entreferro. Isso pode ser identificados na forma de onda apresentada na Figura 11, onde a rotação do campo magnético induz a mesma deformação da forma de onda para os dois sensores FBGs, mas fora de fase com o tempo, devido às suas posições angulares.

5.1 ANÁLISE PARA DIFERENTES FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO

Um inversor de frequência foi utilizado para alimentar o motor de indução trifásico com diferentes frequências de alimentação com 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz. A figura 12 mostra o espectro e as componentes resultante do sensor 1 para uma condição de operação sem carga no eixo do motor.

Como já era esperado da teoria, as componentes de frequência observadas $2f_s$, são a metade das frequências de alimentação da rede de energia elétrica, ou seja a componente de 60 Hz na figura 12a é para à frequência de alimentação de 30 Hz. A amplitude dessa componente tem pequenas variações mas se mantém próximo de -50 dB se comparado com as frequências de alimentação de 40 e 60 Hz.

A componente de rotação f_r tem um pico de amplitude muito pequena, cerca de -70 dB e que seria na componente de 15 Hz para a alimentação do motor de 30 Hz, essa componente não aparece devido a rotação do motor esta bem baixa.

A alimentação do motor de indução trifásico com frequência de 40 Hz resulta no surgimento da componente de 80 Hz ($2f_s$), conforme é apresentado na Figura 12b. A amplitude da componente se mantém próximo de -50 dB porque não depende da rotação do motor.

As componente de rotação f_r alimentado com uma frequência de 40 Hz, já apresenta um pico de amplitude cerca de -70 dB na componente de 20 Hz que é a componente de rotação e esforços mecânicos para a frequência de alimentação de 40 Hz, pois a velocidade de rotação é maior do que na frequência de alimentação de 30 Hz.

A alimentação do motor de indução trifásico com frequência de 60 Hz resulta no surgimento da componente de 120 Hz ($2f_s$) e apresenta uma amplitude próximo de -50 dB é apresentado na figura 12c, a componente de rotação está presente na componente de frequência de 30 Hz conforme a equação 12.

Na condição a vazio e na frequência nominal do motor, como não há carga fixada no eixo da máquina e a velocidade nominal, as forças eletromagnéticas tendem a mantém centralizado o eixo do rotor, a componente de rotação 30 Hz tem uma amplitude de -72 dB.

No sensor 2 é realizada a mesma análise que no sensor 1 das frequências de alimentação de 30 Hz para a figura 13a, de 40 Hz para a figura 13b e de 60 Hz para a figura 13c para uma condição ideal e sem carga no motor. As componentes de frequência f_s mantém a amplitude próximo de -50 dB para as três diferentes frequências, essa componente depende apenas da frequência de alimentação.

As componentes frequências de velocidade f_r para a frequência de alimentação de 30 Hz apresentam amplitudes de -76 dB na componente de 15 Hz. Para a frequência de alimentação de 40 Hz, apresenta uma amplitude maior e o pico da componente em 20 Hz é de -74 dB. Para a frequência de alimentação de 60 Hz apresenta um amplitude de -80 dB na componente de 30 Hz, tem uma amplitude menor, por estar na velocidade nominal do motor, sem carga fixada e com o eixo mais centralizado.

A figura 13 aparece uma amplitude na componente de frequência 0 Hz, essa amplitude é devido ter considerado o valor do comprimento de onda do sensor nos dados do vetor para gerar os gráficos com através da FFT.

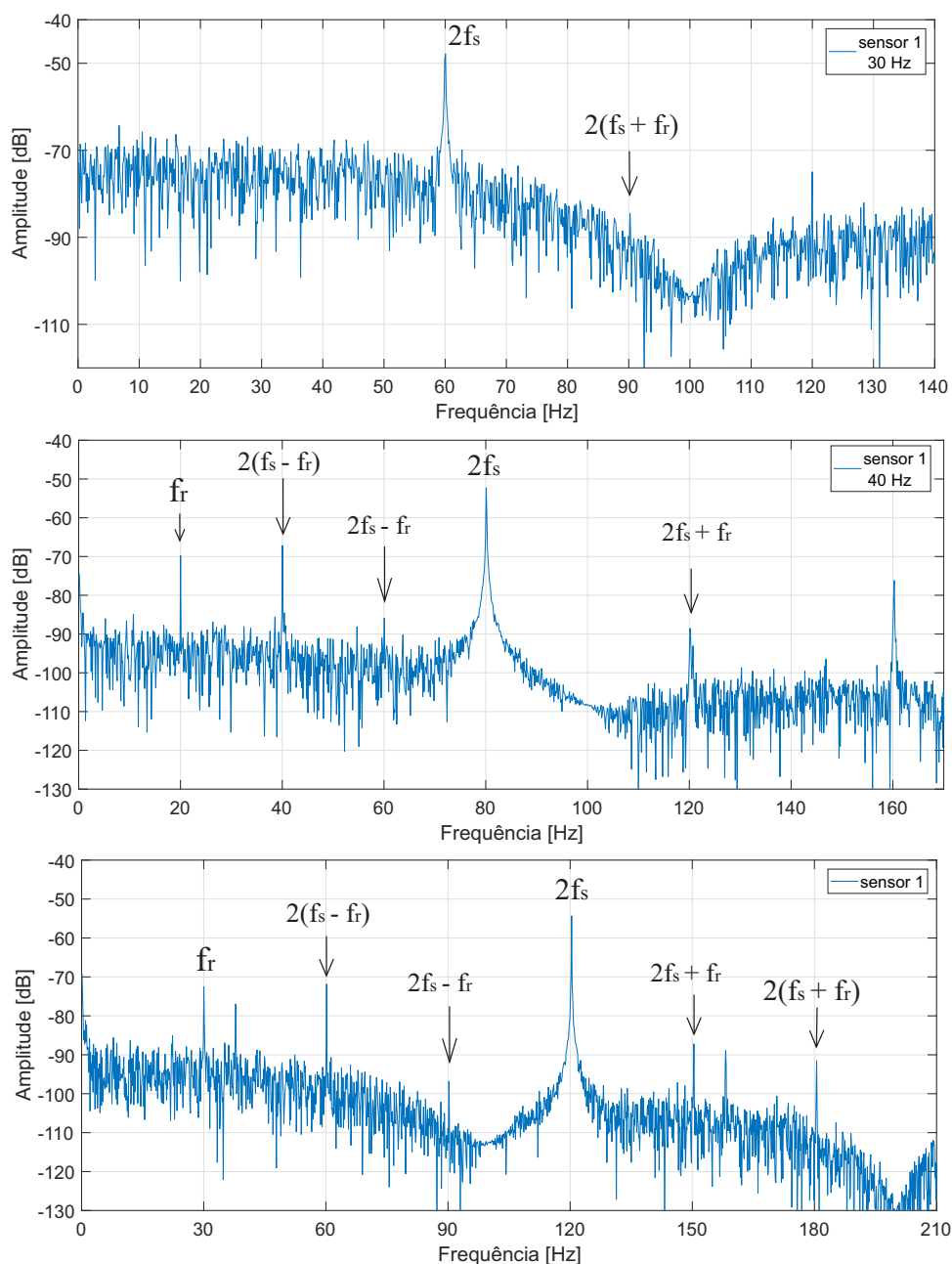


Figura 12: Espectro da deformação do estator com frequência de 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz para sensor 1.

Fonte: Autoria própria.

5.2 ANÁLISE PARA DIFERENTE CARGAS ACOPLADAS AO EIXO DA MÁQUINA

Para uma alimentação de 60 Hz e com variações de massas fixadas no eixo do rotor, apenas as amplitudes das componentes de frequência de 30 Hz tem uma alteração mais significativa e é apresentada na figura 14 para o sensor 1 e na figura 15 para o sensor 2.

O componente 120 Hz tem a mesma amplitude para as quatro experimentos de diferentes cargas, isso porque a componente de 120 Hz tem uma dependência da força

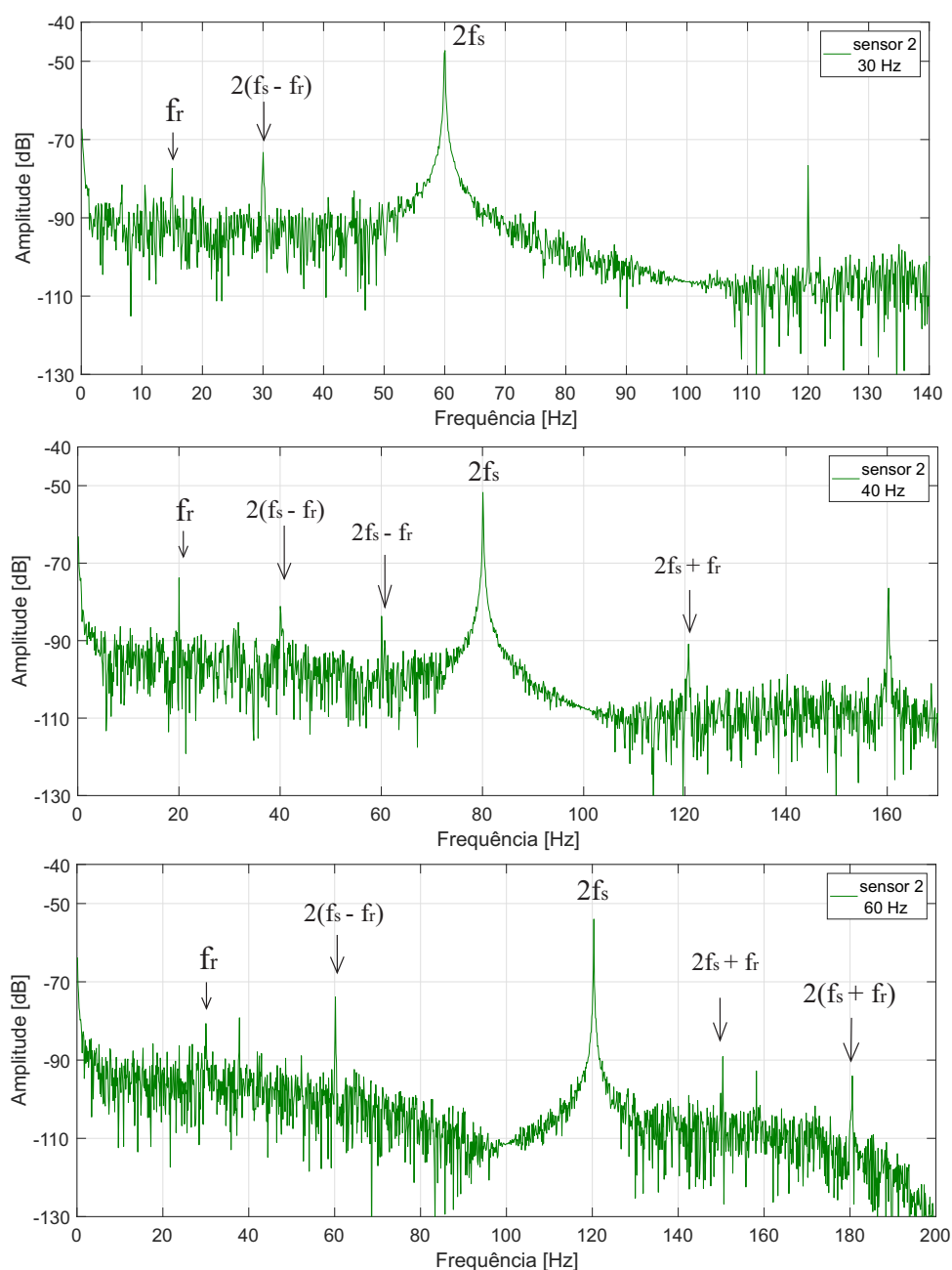


Figura 13: Espectro da deformação do estator com frequência de 30 Hz, 40 Hz e 60 Hz para sensor 2.

Fonte:Autoria própria.

magnética que atua sobre o entreferro do motor, que é sempre o dobro da frequência da fonte de alimentação ($2f_s$). Este componente não varia com a carga do motor. Quando a carga do motor aumenta, no estator o fluxo magnético (a corrente do estator) aumenta em conformidade. No entanto, isto leva a um aumento da corrente induzida do rotor.

O fluxo magnético tende a se equilibrar, com exceção da fluxo magnético de excitação. Isto estabelece o campo magnético no motor que é necessário para gerar um fluxo magnético aproximadamente igual à corrente aplicada. Quando uma carga é aplicada no motor, as correntes do estator e do rotor aumentam juntas, para se equilibrar em

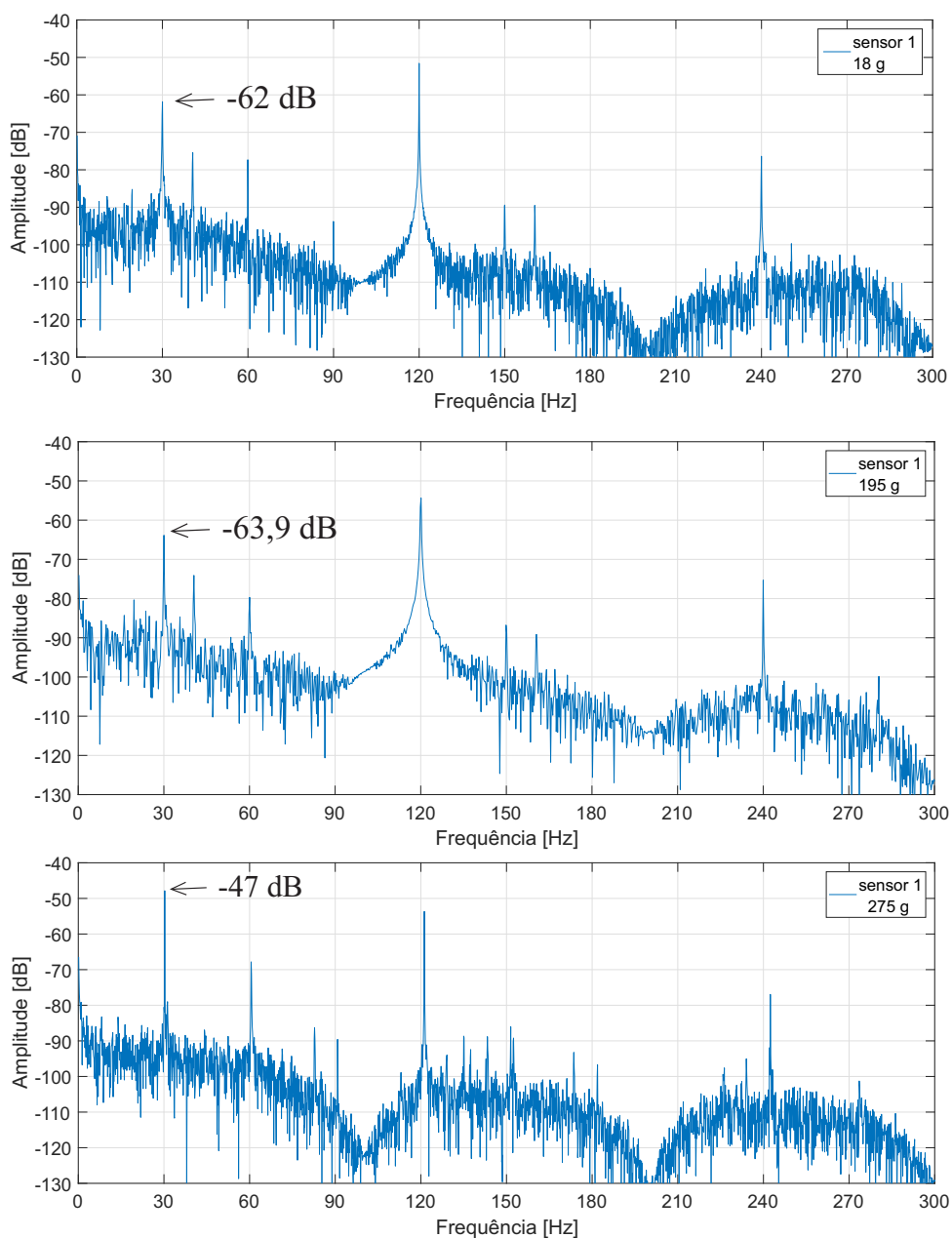


Figura 14: Espectro da deformação do estator com acoplamento de 18g, 195g e 275g no eixo da máquina com o sensor 1.

Fonte: Autoria própria

sincronismo, portanto, não há mudanças significativa no fluxo magnético.

A vibração no motor de indução medida usando rede de Bragg pode ser usada para diagnosticar o alinhamento mecânico do motor ou as condições de manutenção do motor. Um exemplo de análise de vibração é a determinação da condição de barras de rotor quebradas, sob a qual o motor de indução continua a operar sem mostrar as características de falhas típicas, como a sobrecorrente.

Um método comum de monitoramento usado neste caso é medir a vibração

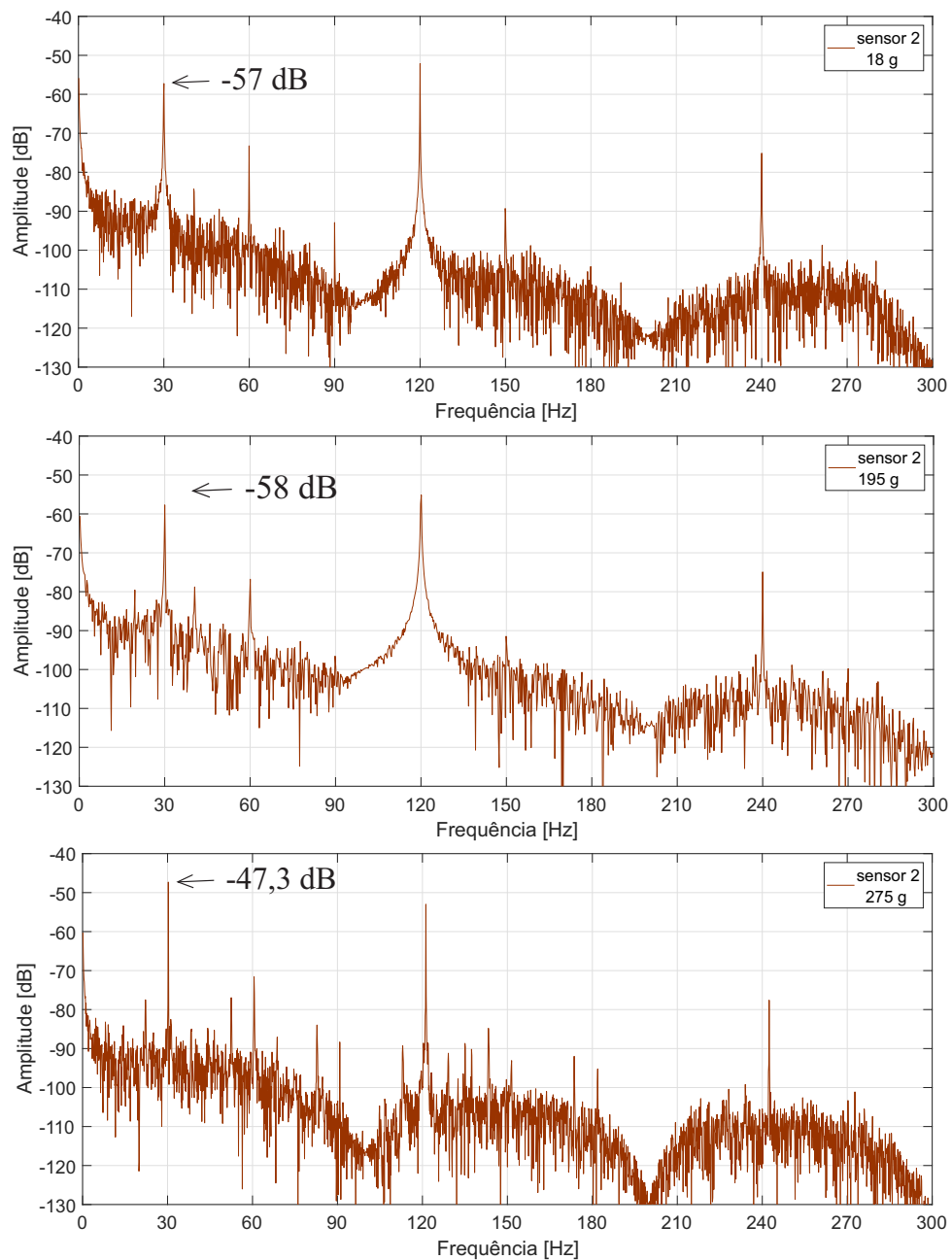


Figura 15: Espectro da deformação do estator com 18 g, 195 g e 275 g acoplado no eixo da máquina com o sensor 2.

Fonte: Autoria própria.

do motor para identificar os componentes típicos de frequência que surgem nesse tipo de situação (SOUSA *et al.*, 2017). Quando uma barra de rotor está total ou parcialmente quebrada, alguns componentes espectrais aparecem próximos a componente principal do espectro $2f_s$. Este defeito se estende aos lóbulos laterais no mesmo componente de frequência da velocidade do rotor, porque não há corrente fluindo no ponto onde o rotor está danificado e, portanto, não haverá fluxo magnético. Assim, o fluxo magnético no entreferro aumenta seu valor no ponto em que a barra está quebrada. A separação entre esses componentes espectrais depende do escorregamento do rotor e da carga do motor.

A figura 16 mostra formas de onda no domínio do tempo, com e sem a fixação de cargas no eixo do rotor. A carga ligada ao eixo do rotor deu origem a um componente de força tangencial, que empurra o rotor para fora da sua órbita. Quando o rotor não tinha carga acoplada, a forma de onda mostrou pequenas variações na amplitude e a componente de frequência de 120 Hz é predominante.

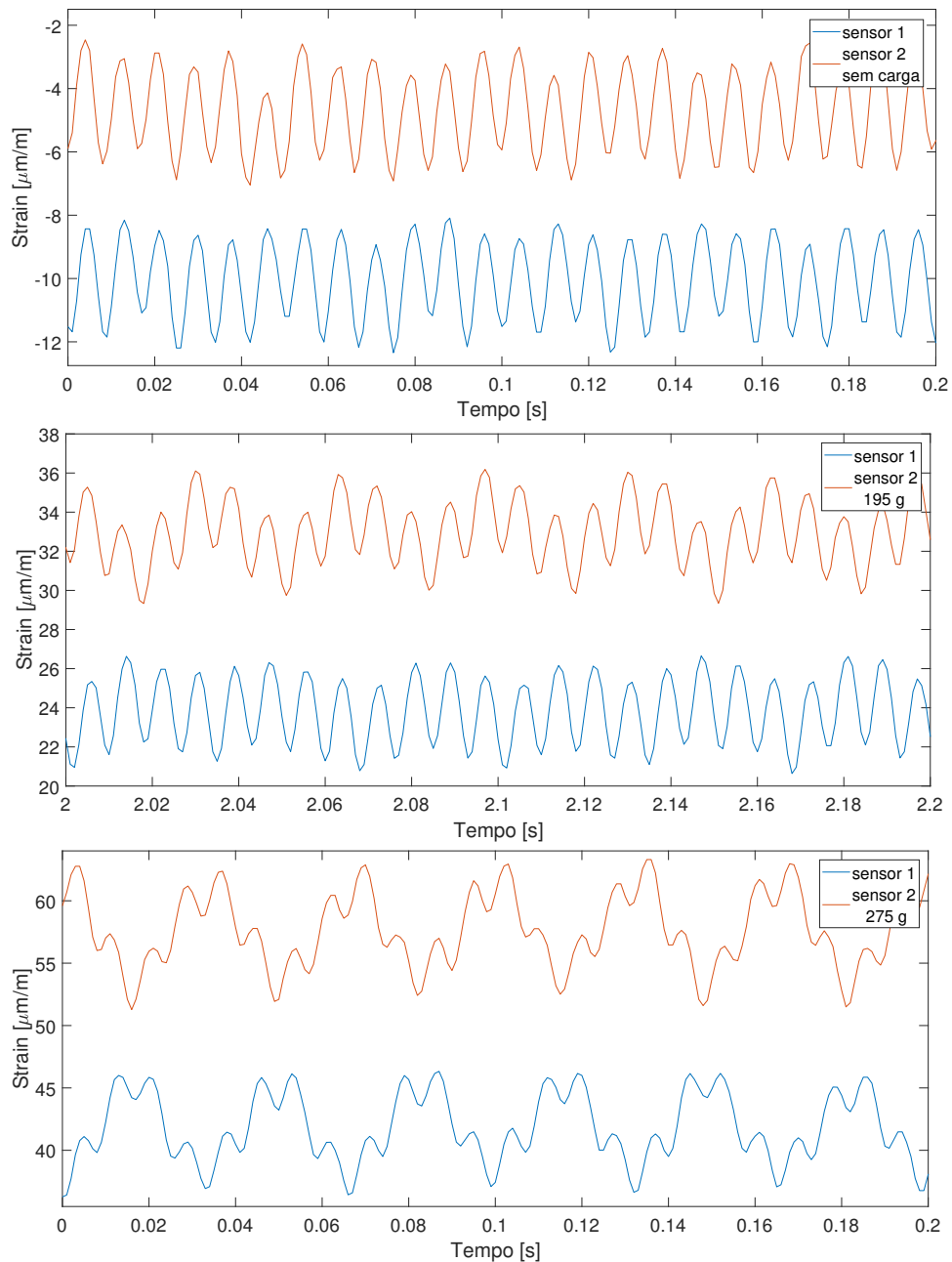


Figura 16: Deformação da forma de onda no domínio do tempo sem carga e com acoplamento de massa no eixo do motor com o sensor 1 e sensor 2.

Fonte: Autoria própria

Quando a carga de 195 g e 275 g foi acoplada ao eixo do rotor, houve aumento significante na amplitude da componente de frequência de 30 Hz. Esta é a mesma

frequência da velocidade do rotor e esforços mecânicos. Como resultado, a forma de onda no domínio do tempo foi deformada devido ao aumento nesta componente de frequência. Aumentando a carga desequilibrada, as componentes de frequência de 30 Hz foram aumentadas ainda mais e a deformação das ondas no tempo também.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo de análise da deformação dinâmica em um estator de um motor de indução trifásico com a utilização de sensores de redes de Bragg em fibras ópticas. Os resultados apresentados demonstram a viabilidade da utilização deste sistema de sensoriamento para medições de deformação no interior do motor.

Uma bancada foi desenvolvida para realizar os testes em um motor de indução trifásico instrumentado com sensores em rede de Bragg em fibra óptica como é apresentada no figura 5. Utilizado três massas diferentes fixadas ao eixo do rotor para deixar com excentricidade.

A componente de 30 Hz responsável por apresentar as amplitude da rotação e esforços mecânicos para a alimentação com 60 Hz. Portanto, quanto mais pesada a massa adicionada ou com mais excentricidade a massa esta fixada ao eixo, maior é a componente de 30 Hz analisada no espectro com alimentação de 60 Hz, conforme apresentado na figura 15.

Além do que foi proposto no trabalho, incluído nos testes um inversor para variar a frequência de alimentação do motor de indução trifásico para obtermos mais resultados. Podemos comprovar de que quando a frequência fundamental da alimentação f_s do motor foi modificada, alterava as componentes de frequências f_s e f_r , conforme a equação 12, devido a alteração da frequência de alimentação e a velocidade da máquina, modifica as amplitudes e as componentes que são uma combinação da velocidade e frequência fundamental.

Os sensores foram analisados separados devido ao fato de como foi realizado a colagem manualmente no estator, um dos sensores ter ficado mais tracionado que o outro, ficando mais suscetível aos esforços e forças a ele exposto. O sensor quanto mais tracionado é fixado no local de medição, fica mais suscetível a variar o comprimento de onda e apresenta uma resposta por menor que seja o esforço por ele exposto.

A deformação dinâmica no motor de indução trifásico está previsto teoricamente, em termos de componentes harmônicas e determinada experimentalmente usando em sensores de rede de Bragg em fibra óptica. Uma vez que as medidas foram realizadas

no interior do motor sobre a superfície do estator, os resultados não foram influenciados por outros parâmetros mecânicos, tais como o conjunto do motor ou a atenuação da vibração devido ao entreferro com forças agindo para fora do motor de indução.

As componentes de frequência observados representam a combinação de forças mecânicas e elétricas e isso acontece mesmo quando a frequência de alimentação do motor é alterada. A outra informação que foi verificado, usando a detecção no interior do motor, é a forma de onda de deformação, incluindo a fase que se origina a partir da rotação do campo no entreferro entre dois pontos diferentes no estator.

Quando a carga no eixo do rotor torna-se desequilibrada, a forma de onda de deformação sofre as alterações do estator. Uma vez que o motor desequilibrado é predominantemente de natureza mecânica, a amplitude de apenas a componente de frequência mecânica do sinal muda a deformação. As cargas que foram acopladas ao rotor para introduzir excentricidade aumentaram a amplitude da componente de 30 Hz de frequência do motor, enquanto que o componente de 120 Hz manteve-se inalterada.

Estas variações podem ser observadas em ambos os domínios de frequência e tempo, dada a boa relação sinal-ruído, que foi superior a 100 dB. Isso pode ser explicado pela alta imunidade eletromagnética dos sensores de redes Bragg de fibra óptica. A resposta rápida dos sensores, devido à sua pequena massa, permite medir a deformação apresentada no estator do motor, mesmo para frequências até 250 Hz.

Isto pode ser determinado como uma função da amplitude de deformação, porque quando o comprimento do entreferro aumenta, a amplitude da deformação diminui. A influência de fornecimento de energia elétrica na vibração do motor também pode ser analisada.

A tensão desbalanceada e corrente harmônica afetam a forma de onda do fluxo magnético no entreferro. Assim, pode haver oscilações na vibração da máquina, que podem ser detectadas. Outro ponto é o efeito das barras do rotor total ou parcialmente quebradas no sinal de vibração que ocorre no modelo do rotor da gaiola de esquilo. Este defeito se estende aos lóbulos laterais no mesmo componente de frequência da velocidade do rotor, porque não há corrente fluindo no ponto onde o rotor está danificado e, portanto, não haverá fluxo magnético. Assim, o fluxo magnético no entreferro aumenta em seu valor no ponto em que a barra está quebrada.

A instrumentação com os sensores FBGs e a medição da deformação dinâmica do estator do motor, abre novas oportunidades para trabalhos futuros. Por exemplo, provocar algumas falhas nos enrolamentos do rotor que vai influenciar na frequência de

velocidade do rotor, falhas em rolamentos ou colocar sensores de rede de Bragg adicionais que podem ser instalados nas ranhuras do estator para observar os pontos em que a excentricidade do rotor é maior ou menor que o normal.

REFERÊNCIAS

- BACCARINI, Lane Maria Rabelo. **Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais - PPGEE/UFMG, 2005.
- BAYINDIR, Ramazan; BEKTAS, Askin *et al.* Fault detection and protection of induction motors using sensors. **IEEE Transactions on energy conversion**, IEEE, v. 23, n. 3, p. 734–741, 2008.
- BRITO, Cláudio Marzo Cavalcanti de. Modelagem computacional de métodos de partida de um motor de indução trifásico no simulink/matlab. In: **congresso de pesquisa e inovação da rede norte nordeste de educação tecnológica**. [S.l.: s.n.], 2007. v. 2.
- CORRES, Jesus M; BRAVO, Javier; ARREGUI, Francisco J; MATIAS, Ignacio R. Unbalance and harmonics detection in induction motors using an optical fiber sensor. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 6, n. 3, p. 605–612, 2006.
- DORRELL, DG. The influence of rotor skew on unbalanced magnetic pull in cage induction motors with eccentric rotors. *IET*, p. 67–71, 1995.
- DORRELL, David G; THOMSON, William T; ROACH, Steven. Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors. **IEEE Transactions on Industry applications**, IEEE, v. 33, n. 1, p. 24–34, 1997.
- FINLEY, William R; HODOWANEC, Mark M; HOLTER, Warren G. An analytical approach to solving motor vibration problems. In: IEEE. **Petroleum and Chemical Industry Conference, 2000. Industry Applications Society 46th Annual**. [S.l.], 2000. v. 36, n. 5, p. 217–232.
- HALLIDAY DAVID; WALKER, Jearl; RESNICK Robert. Fundamentos de física: Óptica e física moderna. v. 4, p. 7. Ed, 2007. Rio de Janeiro: LTC.
- HENAO, Humberto; DEMIAN, Cristian; CAPOLINO, G-A. A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 39, n. 5, p. 1272–1279, 2003.
- HILL, AE; HILL, Bruria S. Sucrose fluxes and junctional water flow across necturus gall bladder epithelium. **Proc. R. Soc. Lond. B**, The Royal Society, v. 200, n. 1139, p. 163–174, 1978.
- HILL, Kenneth O; MELTZ, Gerald. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of lightwave technology**, IEEE, v. 15, n. 8, p. 1263–1276, 1997.
- HOSHI, Takeo; KASHYAP, Anil. The japanese banking crisis: Where did it come from and how will it end? **NBER macroeconomics annual**, MIT Press, v. 14, p. 129–201, 1999.

KRAUSE, Paul C; WASYNCZUK, Oleg; SUDHOFF, Scott D. **Modern Analysis of Electric Machinery and Drive Systems**. [S.l.]: John Wiley and Sons, New York, 2002.

KREUZER, Manfred. **Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors**. Germany. Darmstadt: [s.n.], 2006. Disponível em: <www.hbm.com>. Manual measurement with confidence. HBM, GmbH.

MARTELLI, Cicero; SILVA, Erlon Vagner da; SOUZA, Kleiton de Moraes; MEZZADRI, Felipe; SOMENZI, Jonas; CRESPI, Marcos; KALINOWSKI, Hypolito José; SILVA, Jean Carlos Cardozo da. Temperature sensing in a 175mw power generator. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors**. [S.l.], 2012. v. 8421, p. 84212F.

MELTZ, G; MOREY, W.W; GLENN, W.H. Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. **Optics letters**, Optical Society of America, v. 14, n. 15, p. 823–825, 1989.

MENDEZ, A. Fiber bragg grating sensors: a market overview. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING; 1999. **PROCEEDINGS-SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING**. [S.l.], 2007. v. 6619, p. 661905.

OTHONOS, Andreas. Fiber bragg gratings. **Review of scientific instruments**, AIP, v. 68, n. 12, p. 4309–4341, 1997.

RIBEIRO, António Barbosa Lobo. Esquemas de multiplexagem de sensores de fibra óptica. **Tese de Doutorado, Especialidade de Electromagnetismo e Electrónica**, Universidade do Porto. Reitoria, 1996.

RODRÍGUEZ, Pedro Vicente Jover; 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**, Springer, v. 90, n. 3, p. 209–218, 2007.

SCHLENSOK, Christoph; GIET, Michael van der; GRACIA, Mercedes Herranz; RIESEN, Dirk van; HAMEYER, Kay. Structure-dynamic analysis of an induction machine depending on stator–housing coupling. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 44, n. 3, p. 753–759, 2008.

SILVA, Jean Carlos Cardozo da. Monitoração de vibrações de estruturas com o emprego de sensores em fibra óptica. **Tese de Doutorado, CEFET-PR**, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, xvi, p. 171 f. [s.n.], Curitiba, Jan 2005,.

SOUZA, Kleiton de Moraes; HAFNER, Angelo A; CARATI, Emerson Giovani; KALINOWSKI, Hypolito José; SILVA, Jean Carlos Cardozo da. Validation of thermal and electrical model for induction motors using fiber bragg gratings. **Measurement**, Elsevier, v. 46, n. 6, p. 1781–1790, 2013.

SOUZA, Kleiton de Moraes; HAFNER, Angelo A; KALINOWSKI, Hypolito José; SILVA, Jean Carlos Cardozo da. Determination of temperature dynamics and mechanical and stator losses relationships in a three-phase induction motor using fiber bragg grating sensors. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 12, n. 10, p. 3054–3061, 2012.

SOUSA, Kleiton Morais; COSTA, Igor Brutkowski Vieira da; MACIEL, Ednilson Soares; ROCHA, Joaquim Eloir; MARTELLI, Cicero; SILVA, Jean Carlos Cardozo da. Broken bar fault detection in induction motor by using optical fiber strain sensors. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 17, n. 12, p. 3669–3676, 2017.

SOUSA, Kleiton Morais; DREYER, Uilian José; MARTELLI, Cicero; SILVA, Jean Carlos Cardozo da. Dynamic eccentricity induced in induction motor detected by optical fiber bragg grating strain sensors. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 16, n. 12, p. 4786–4792, Jun 2016.

SOUZA, Kleiton de Morais. **Validação de modelo térmico e elétrico de motor de indução empregando redes de bragg em fibra ótica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

STONE, Robyn; CAFFERATA, Gail Lee; SANGL, Judith. Caregivers of the frail elderly: A national profile. **The Gerontologist**, The Gerontological Society of America, v. 27, n. 5, p. 616–626, 1987.

THEUNE, Nils M; MULLER, Matthias; HERTSCH, Hagen; KAISER, Joachim; WILLSCH, M; KRAMMER, P; BOSSELMANN, T. Investigation of stator coil and lead temperatures on high voltage inside large power generators via use of fiber bragg gratings. In: IEEE. **Sensors, 2002. Proceedings of IEEE**. [S.l.], 2002. v. 2, p. 1603–1607.

VALAVI, Mostafa; NYSVEEN, Arne; NILSSEN, Robert; RØLVÅG, Terje. Slot harmonic effect on magnetic forces and vibration in low-speed permanent-magnet machine with concentrated windings. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 50, n. 5, p. 3304–3313, 2014.

VENERO, D de M; HIYODO, Sérgio Akio. Gestão de reparo de motores elétricos com foco em confiabilidade e otimização de custos. In: **23º Congresso Brasileiro de Manutenção**. [S.l.: s.n.], 2008.

VERMA, SP; BALAN, A. Determination of radial-forces in relation to noise and vibration problems of squirrel-cage induction motors. **IEEE transactions on energy conversion**, IEEE, v. 9, n. 2, p. 404–412, 1994.

VERMA, SP; GIRGIS, RS. Considerations in the choice of main dimensions of stators of electrical machines in relation to their vibration characteristics. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, v. 94, n. 6, p. 2151–2159, 1975.

WEI, Bei; WANG, Xiuhe; WANG, Yufang; ZHONG, Hui. Online monitoring system for motor vibration using fiber bragg grating sensing technology. In: IEEE. **Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on**. [S.l.], 2011. p. 1–3.