

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

KLEITON DE MORAIS SOUSA

**REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA PARA MEDIÇÃO DE
PARÂMETROS RELACIONADOS AS MÁQUINAS ELÉTRICAS**

TESE DE DOUTORADO

CURITIBA

2016

KLEITON DE MORAIS SOUSA

**REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA PARA MEDIÇÃO DE
PARÂMETROS RELACIONADOS AS MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Fotônica em Engenharia.

Orientador: Jean Carlos Carodozo da Silva

Co-orientador: Cicero Martelli

CURITIBA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S725r
2016 Sousa, Kleiton de Morais
Redes de Bragg em fibra óptica para medição de parâmetros relacionados às máquinas elétricas / Kleiton de Morais Sousa.-- 2016.
74 f. : il. ; 30 cm.

Texto em português com resumo em inglês

Disponível também via World Wide Web

Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Pato Branco, PR, 2016

Bibliografia: f. 69-74

1. Motores elétricos de indução. 2. Redes de Bragg. 3. Semicondutores (Física). 4. Detectores de fibra óptica. 5. Engenharia elétrica – Teses. I. Silva, Jean Carlos Cardozo. II. Martelli, Cicero. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Tese Nº. _____

Redes de Bragg em Fibra Óptica para Medição de Parâmetros Relacionados a Máquinas Elétricas.

por

Kleitton de Moraes Sousa

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva (UTFPR)

Coorientador: Prof. Dr. Cicero Martelli (UTFPR)

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Fotônica em Engenharia, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 09h do dia 02 de dezembro de 2016. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva
(Presidente – UTFPR)

Prof. Dr. Aleksander Sade Paterno
(UDESC)

Prof. Dr. César Augusto Dartora
(UTFPR)

Prof. Dr. Roger Gules
(UTFPR)

Prof. Dr. Ricardo Canute Kamikawachi
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha noiva, Gracieli Zanco, por estar ao meu lado durante todo o tempo e entendido os meus momentos de ausência dedicados a conclusão deste trabalho.

Agradeço, em especial, ao meu orientador Jean Carlos Cardozo da Silva pela orientação neste trabalho e, acima de tudo, por compartilhar seu conhecimento e experiências que possibilitaram alcançar os resultados apresentados. Ao professor Cicero Martelli, coorientador neste trabalho, pelo incentivo e colaboração para finalização do trabalho.

Projeto desenvolvido no âmbito do Programa de P&D da Engie Energia regulamentado pela ANEEL (PD-0403-0028/2012). O autor agradece à FINEP, à CAPES, ao CNPQ, à Fundação Araucária, à ANEEL e à Engie Energia pelo apoio financeiro. À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Câmpus de Pato Branco, pela oportunidade e estrutura física para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ao Prof. Hypolito por disponibilizar o Laboratório de Nanoestruturas da (UTFPR)- Câmpus Curitiba, onde as redes de Bragg foram gravadas para este trabalho.



RESUMO

SOUSA, Kleiton de Moraes. REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA PARA MEDIÇÃO DE PARÂMETROS RELACIONADOS AS MÁQUINAS ELÉTRICAS. 37 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Esta tese apresenta aplicações de redes de Bragg em fibra óptica (FBG) para medição de parâmetros em máquinas elétricas. Os resultados apresentados permitem explorar novas técnicas de instrumentação que mostram o potencial de utilização de FBGs em ambientes industriais, como a medição de temperatura em uma usina hidrelétrica, e de investigação em laboratório, como no estudo da deformação dinâmica do estator de motores de indução. As técnicas de instrumentação apresentadas podem ser utilizadas isoladamente ou integradas, de forma a obter uma instrumentação multiparamétrica em usinas hidrelétricas ou em ambientes industriais que utilizam motores de indução em seu processo produtivo. A tese é organizada em forma de coletânea de artigos científicos, os quais apresentam a medição de temperatura e determinação de um modelo térmico de uma ponte retificadora utilizada para ajustar a corrente de campo do rotor de um gerador, um sensor de campo magnético, medição da deformação dinâmica do estator de motores de indução e caracterização de um acelerômetro óptico biaxial. Os resultados para medição de temperatura nos tiristores utilizados na ponte retificadora mostram a dependência entre temperatura e corrente de excitação, onde oscilações de corrente levam a oscilações de temperatura. O ajuste a partir do modelo térmico desenvolvido para o sistema apresenta um erro de $1,5^{\circ}\text{C}$ em comparação com as medidas pelas FBGs. O sensor de campo é baseado na magnetostricção, sendo utilizadas duas FBGs. Uma delas para medição de deformação e outra para compensação de temperatura. No sensor de campo é apresentada a variação da resposta em função da temperatura, onde a magnetoestricção apresenta comportamento não-linear e sua saturação também varia em função temperatura. A medida de deformação do estator empregando as FBGs apresenta uma boa relação sinal ruído, com 80 dB para a harmônica fundamental, e as frequências observadas na vibração são as esperadas teoricamente. Além disso, com a utilização de duas FBGs pode-se observar a natureza girante da força magnética do entreferro. A medição de deformação do estator trata-se de uma técnica de análise inovadora, sendo a principal contribuição desta tese. Os resultados obtidos com a medida de deformação do estator são utilizados para validar as medidas de vibração de um acelerômetro óptico biaxial utilizado em um motor de indução. O acelerômetro óptico biaxial é insensível à variação de temperatura, podendo ser aplicado para medição de vibração em máquinas elétricas.

Palavras-chave: Modelo térmico de semicondutores, máquinas elétricas, redes de Bragg em fibra óptica, sensores a fibra óptica, sensor de campo magnético, vibrações em máquinas elétricas.

ABSTRACT

SOUSA, Kleiton de Morais. FIBER BRAGG GRATING FOR ELECTRICAL MACHINES PARAMETERS MEASUREMENT. 37 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This paper presents the application of fiber Bragg gratings (FBG) for parameters measurement in electrical machines. The results allow to explore new instrumentation techniques and show the potential for industrial applications, presenting the measurement in an hydroelectric power plant, and laboratory research, such as the dynamic stator strain measurement. Each instrumentation technics presented in this paper has a potential to use isolated or integrated in order to obtain a multiparameter instrumentation in hydroelectric power plants or industrial environments that using induction motors in its production process. This paper is organized in a collection of articles, and the FBG applications are the temperature measurement and simulation of a rectifier bridge used to adjust the rotor field current of a power generator, a magnetic field sensor, a biaxial optical accelerometer and the measurement of the stator dynamic strain of an induction motor. The results for the thyristor temperature measurement show the dependence of temperature and excitation current, where current oscillations lead to temperature fluctuations. The simulation of the thermal model presents a 1.5°C error compared to measures by the FBGs. The field sensor is based on magnetostriction, property where the magnetic material undergo deformation in the presence of a magnetic field. For this sensor are used two FBGs for temperature measurement and deformation in Terfenol-D, material with magnetostrictive properties. In the magnetic field sensor the response is a function of temperature, where the magnetostriction and saturation presents non-linear behavior varies as a function of temperature. Stator strain measurement using the FBGs has a good relationship signal noise, 80 dB for the fundamental harmonic and the observed frequencies in the vibration are theoretically expected. Moreover, with the use of two sensors can be determine the rotating nature of the air gap magnetic force. Finally, the biaxial optical accelerometer does not have is insensitive to temperature variations and can be applied for measuring vibration in electrical machines.

Keywords: Electric machines vibration, fiber Bragg gratings, induction motor, magnetic field sensor, magnetostriction , semiconductor thermal model.

PUBLICAÇÕES

Publicações Resultantes Deste Trabalho

- Periódicos

SOUSA, K. M.; PROBST, W.; BORTOLOTTI, F.; MARTELLI, C.; SILVA, J.C. C. Fiber Bragg Grating Temperature Sensors in a 6.5-MW Generator Exciter Bridge and the Development and Simulation of Its Thermal Model. **Sensors** 2014, v. 14, p. 16651-16663, ISSN 1424, doi10.3390/s140916651.

SOUSA, K. M. ; ZANDONAY, R. ; SILVA, E. V. ; MARTELI, C.Ãcero. ; SILVA, J. C. C. . Application of Fiber Bragg Grating to Determine the Terfenol-D Magnetostriction Characteristics for Sensor Development. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 13, p. 1-9, 2014, ISSN:1516-7399.

Sousa, K. M.; U. J. Dreyer, C. Martelli and J. C. Cardozo da Silva, Dynamic Eccentricity Induced in Induction Motor Detected by Optical Fiber Bragg Grating Strain Sensors. **IEEE Sensors Journal**, vol. 16, no. 12, pp. 4786-4792, Junho, 2016. doi: 10.1109/JSEN.2016.2554885

R. Pomorski Linessio; K. Sousa; T. Silva; C. Bavastri; P. Antunes; J. C. Cardozo da Silva. Induction Motors Vibration Monitoring using a Biaxial Optical Fiber Accelerometer. **IEEE Sensors Journal** , vol.PP, no.99, pp.1-1 doi: 10.1109/JSEN.2016.2604850

- Anais de congresso

PROBST, W. K. ; BORTOLOTTI, F. ; SOUSA, K. M. ; KALINOWSKI, H. J. ; MARTELI, Cicero. ; SILVA, J. C. C. . Thermal behavior of a high power generator exciter bridge measured by optical fiber sensors. In: Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors, 2013, Kraków. Proceedings of SPIE, edited by Leszek R. Jaroszewicz. Bellingham WA, 2013. v. 8794. p. 879443-1-879443-4.

SOUSA, K. M. ; ZANDONAY, R. ; SILVA, E. V. ; MARTELI, C. ; SILVA, J. C. C. . Determination of Terfenol-D magnetostriction characteristics for sensor application using fiber Bragg grating. In: Second International Conference on Applications of Optics and Photonics, 2014, Aveiro. Proc. SPIE 9286, 2014. v. 9286. p. 92863X-1-92863X-4.

K. de Moraes Sousa, U. J. Dreyer, C. Martelli and J. C. C. da Silva, "Vibration measurement of Induction Motor under dynamic eccentricity using optical fiber Bragg grating

sensors,”Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International, Porto de Galinhas, 2015, pp. 1-5. doi: 10.1109/IMOC.2015.7369059

R. P. Linessio, K. d. M. Sousa, J. C. C. da Silva and P. F. d. C. Antunes, ”Analysis of vibrations in electrical machines with an optical fiber accelerometer,”Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International, Porto de Galinhas, 2015, pp. 1-5. doi: 10.1109/IMOC.2015.7369157

SOUSA, K. M.; DREYER, U. J. ; MARTELI, Cícero. ; SILVA, J. C. C. . Thermal and Vibration Dynamic Analysis of an Induction Motor Using Optical Fiber Bragg Gratings.. In: 24th International Conference on Optical Fibre Sensors, 2015, Curitiba. Proceedings of SPIE, edited by Hypolito José Kalinowski, José Luís Fabris, Wojtek J. Bock. Bellingham WA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2015. v. Único. p. 963443-1-963443-4.

SILVA, E. V. ; DREYER, U. J. ; SOUSA, K. M. ; OLIVEIRA, V. ; KALINOWSKI, Hypolito José; MARTELI, Cícero. ; SILVA, J. C. C. . Temperature Sensor for Hydro Generator Bearings using Thermally Regenerated Fiber Bragg Gratings. In: SENSORCOMM 2015 : The Ninth International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2015, Veneza. NY: IARIA XPS Press. Veneza: IARIA XPS Press. Red Hook, 2015. v. Único. p. 35-40.

COSTA, Igor Brutkowski Vieira da ; SOUSA, Kleiton de Moraes ; MACIEL, Ednilson Soares ; ROCHA, Joaquim Eloir ; MARTELLI, Cicero ; Jean Carlos Cardozo da Silva . Broken Rotor Bars Detection in Induction Motors Using Optical Fiber Bragg Grating Strain Sensors. In: MOMAG 2016: 12 CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo - 17 SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica - LAWOFs 2016 - Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors, 2016, Porto Alegre. Anais do MOMAG 2014, 2016. v. único. p. 1-5.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	MOTIVAÇÃO	9
1.2	REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA	15
1.3	ESTRUTURA DA TESE	19
2	ARTIGO 1: FIBER BRAGG GRATING TEMPERATURE SENSORS IN A 6.5-MW GENERATOR EXCITER BRIDGE AND THE DEVELOPMENT AND SIMULATION OF ITS THERMAL MODEL	23
3	ARTIGO 2: APPLICATION OF FIBER BRAGG GRATING TO DETERMINE THE TERFENOLD MAGNETOSTRICTION CHARACTERISTICS FOR SENSOR DEVELOPMENT	24
4	ARTIGO 3: DYNAMIC ECCENTRICITY INDUCED IN INDUCTION MOTOR DETECTED BY OPTICAL FIBER BRAGG GRATING STRAIN SENSORS	25
5	ARTIGO 4: INDUCTION MOTORS VIBRATION MONITORING USING A BIA-AXIAL OPTICAL FIBER ACCELEROMETER	26
6	CONCLUSÕES	27
6.1	CONCLUSÕES GERAIS	27
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	30
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A medição de grandezas físicas desempenha um papel de grande importância para a atividade industrial. Parâmetros físicos como temperatura, pressão e deformação são de fundamental importância para garantir um adequado controle e supervisão de processos industriais. Para a maioria dessas aplicações os sensores elétricos e eletrônicos convencionais possuem um desempenho satisfatório. Todavia, existem situações limitadoras aos sensores convencionais que comprometem o valor medido. Como exemplo de tais fatores pode-se citar a interferência eletromagnética, distância entre o sensor e a unidade de processamento ou o número de pontos de medição. Em situações desse tipo, faz-se necessário a investigação de novos métodos de medição e nesse cenário os sensores ópticos apresentam-se como uma alternativa aos sensores elétricos convencionais.

Dos tipos de sensores ópticos, destacam-se as redes de Bragg em Fibra óptica (FBG). Desde a descoberta feita por Ken Hill em 1978 (HILL *et al.*, 1978) e a contribuição de outros trabalhos para o desenvolvimento de técnicas de gravação (MELTZ *et al.*, 1989; HILL *et al.*, 1993; ANDERSON *et al.*, 1993), as FBGs foram utilizadas em sistemas de telecomunicação para aplicações como estabilização de laser, multiplexação de sinais, compensação de dispersão e filtros ópticos. Contudo, a sensibilidade intrínseca das FBGs para medição de temperatura e deformação levou a sua aplicação também como sensor. Assim, foi possível unir a necessidade de medição de grandezas físicas juntamente com as características inerentes da fibra óptica. As características principais das FBGs para utilização como sensor são: sensor passivo, não necessitando de alimentação para seu funcionamento; pequena massa, o que assegura uma resposta na ordem de milissegundos para medidas de temperatura e deformação; medição realizada em comprimento de onda, com isso é possível a multiplexação de vários sensores na mesma fibra óptica; imune a interferências eletromagnética, uma vez que a fibra óptica é composta por sílica e não conduz eletricidade; baixa perda de sinal, na ordem de 0,2 dB/km.

Essas características levaram a uma transição nas aplicações de FBGs a partir da

década de 1990 e os primeiros sistemas de medição comerciais para aplicações industriais surgiram no final dessa década (MENDEZ, 2007). Dessa forma, emergiu um novo mercado de sensores ópticos e desde o ano de 2012 o mercado experimenta um crescimento anual de 20,3% e estima-se que em 2017 chegue a marca de US\$ 4 bilhões (PEACH, 2013). O desenvolvimento e aplicações dos sensores ópticos baseados em FBGs pode ser dividido em três áreas, sendo elas os dispositivos de detecção, a instrumentação e serviços e a integração e instalação do sistema. Na área de dispositivos de detecção estão situadas as aplicações de aquisição de sinais, sensores FBG encapsulados e técnicas de fabricação de FBGs. A área de mercado de instrumentação é composta por interrogadores ópticos para leitura e aquisição de sinais das FBG e componentes. Por fim, a última área é composta principalmente por produtos e envolve todos os aspectos de gerenciamento de projeto e de engenharia relacionadas com a implementação de soluções de detecção e instalações de sistemas, tais como planejamento, integração de sistemas e instalação no local (MENDEZ, 2007).

Dentre as atividades em que as FBGs possuem aplicações em potencial destacam-se os sistemas de conversão de energia. Esses sistemas englobam máquinas elétricas em geral (motores, geradores e transformadores de potência). Um dos principais parâmetros monitorados utilizando sensores ópticos é a medição de temperatura e tem por objetivo garantir que isolamento elétrico não apresente falhas e os principais pontos de interesse são enrolamentos do rotor e do estator. A ocorrência de uma falha em um destes elementos poderá resultar em desligamentos forçados, redução na confiabilidade e elevados custos de manutenção e reparos. Uma elevação em 10°C na temperatura de operação nominal de uma máquina reduz sua vida útil pela metade, essa regra empírica é conhecida como a Lei de Montsinger (MONTSSINGER, 1930). No caso dos geradores de potência a elevação de temperatura está associada a alimentação de cargas desbalanceadas, curto circuito na linha de transmissão, condições de sub e sobre excitações e falhas em sistemas de refrigeração (trocadores de calor). Essas situações fazem com que ocorra, principalmente, uma perda mais elevada nos enrolamentos do gerador e por consequência uma elevação de temperatura acima da temperatura de operação. Uma temperatura acima da nominal faz com que os materiais isolantes presentes nas máquinas elétricas tenham sua vida útil reduzida o que ocasiona falhas dos sistemas, além de problemas de isolamento que levam a curto circuito na máquina (STONE; KAPLER, 1998).

Uma das primeiras aplicações de sensores ópticos em geradores de potência é apresentada em Theune *et al.* (2002) e Willsch *et al.* (2002) onde FBGs são utilizadas para medição de temperatura nas barras do estator, diretamente em contato com o cobre das barras. Os sensores são inseridos na máquina durante a construção do gerador, pois é necessário ter acesso as barras sem isolamento da máquina. Os resultados apresentam uma variação de temperatura de 80°C

entre a máquina ligada e desligada em um gerador de 200 MVA. Outra medição de temperatura no estator de geradores elétricos empregando FBGs é apresentada por Wang *et al.* (2011) e essa aplicação difere-se pela forma da instalação e encapsulamento utilizado. Nesse caso o encapsulamento consiste em tubo de aço com 0.5 mm de diâmetro interno e 1.5 mm de diâmetro externo. Toda a extensão da fibra óptica deve ficar dentro desse tubo, entretanto a fibra não é fixada em nenhuma das extremidades do tubo, permanecendo livre. Com isso, deformações mecânicas que o tubo fica sujeito durante a operação do gerador não é transferida para a FBG, evitando assim a medida cruzada de temperatura e deformação. Martelli *et al.* (2012) apresenta outra aplicação de FBGs para medição de temperatura no estator de um gerador de 175 MW. Diferentemente da técnica apresentada em Theune *et al.* (2002) as FBGs foram instaladas em um gerador já em operação. A instalação é realizada na UHE Salto Osório, localizada no sudoeste do Paraná. O encapsulamento também utiliza um tubo de aço, porém apenas uma fração da fibra com a FBG é protegida pelo tubo.

Outras partes do gerador também são de interesse para medição de temperatura, como os trocadores de calor do estator. Em Werneck *et al.* (2013) é apresentada uma das primeiras aplicações para medição de temperatura em radiadores de um gerador de 216 MW. As temperaturas apresentadas variam de 65°C a 100°C em regime permanente. Em Dreyer *et al.* (2014) é apresentada a instrumentação do trocador de calor de um gerador 175 MW, utilizando três FBGs multiplexadas. Uma evolução desse trabalho é apresentado em Mezzadri *et al.* (2014) onde 15 FBGs multiplexadas são utilizadas obtendo assim um mapeamento térmico do trocador de calor.

As linhas de transmissão são responsáveis por levar a energia gerada nas centrais elétricas até aos centros consumidores, sendo de fundamental importância para sistemas de conversão de energia. Os parâmetros de maior interesse para a instrumentação óptica são temperatura e deformação. No caso da deformação, além da medida direta nos cabos, são monitorados ainda os esforços mecânicos dos isoladores responsáveis por fixar os cabos nas torres. Aqui a característica de baixa atenuação e boa relação sinal ruído apresenta um grande diferencial já que linhas de transmissão se estendem por dezenas de quilômetros. Uma das primeiras aplicações empregando sensores ópticos em linhas de transmissão é apresentada por Kawai *et al.* (1995), onde um sistema de medição distribuído de temperatura é apresentado. Nesse trabalho a resolução espacial obtida é de 1 m e a instrumentação é aplicada a uma linha de transmissão de 10 km. Uma das vantagens de se usar a medição distribuída é a possibilidade de identificar de forma rápida alguma falha que ocasiona rompimento do cabo. Em Tayama *et al.* (1995) a medição distribuída é aplicada a linhas de transmissão submarinas, onde além da temperatura é medida também a deformação do cabo. A instrumentação da linha de transmissão submarina é feita uma fibra óptica próximo ao condutor para medição de temperatura,

além de algumas fibras distribuídas em torno na estrutura de isolamento elétrica do cabo. Com isso pode-se identificar as forças atuantes sob o cabo devido a pressão submarina. Os resultados são apresentados em um cabo de 20 km. A medição distribuída de temperatura também é utilizada por Dubaniewicz *et al.* (1998) em linhas de transmissão subterrâneas. Os resultados são apresentados para 50 m de cabos e a resolução espacial obtida é de 1 m.

Embora a técnica de medição distribuída apresente um maior interesse para aplicações em linhas de transmissão, as FBGs também são utilizadas para essa finalidade. Em Qi *et al.* (2010) é apresentada a instrumentação de temperatura e deformação entre duas torres de uma linha de transmissão. As FBGs receberam dois tipos de encapsulamentos diferentes, um deles dedicados a medição de vibração e outro para temperatura. Além das medidas de temperatura e deformação, são utilizadas FBGs para medição de parâmetros externos, como em Ma *et al.* (2011) e Guo-Ming *et al.* (2012). No primeiro trabalho as FBGs são utilizadas para determinação da formação de gelo, a partir da medida de deformação da FBG, em linhas de transmissão. Esse problemas ocorrem em países frios e a formação de gelo leva a uma carga mecânica excessiva nos isoladores das linhas de transmissão. Em Guo-Ming *et al.* (2012) é desenvolvido um anemômetro utilizando FBGs. Os fortes ventos fazem com que uma carga lateral seja aplicada as linhas de transmissão, sendo necessário o monitoramento de sua velocidade. Chintakindi e Rajesh (2013) apresenta ainda a medição das tensões mecânicas que os isoladores, responsáveis pela fixação das linhas de transmissão nas torres, sofrem. Apresenta ainda linhas de transmissão, constituídas de alumínio com alma de aço, fabricadas com uma fibra óptica por dentro do cabo.

Os motores elétricos de indução são os mais utilizados na indústria para conversão de energia elétrica em mecânica. Fatores como baixo custo, alta eficiência e controle de torque e velocidade contribuíram para a grande utilização deste tipo de motor. Em Niewczas *et al.* (2005) é apresentada uma das primeiras aplicações de FBGs em motores de indução, onde o protótipo de um sensor de tensão elétrica baseado em efeito piezoelétrico é apresentado com potencial aplicação para motores utilizados em bombas submersas. Um sistema de interrogação de FBGs é apresentado por Haramoni *et al.* (2008) para ser utilizado em motores de indução. Os resultados são obtidos para um motor de indução monofásico durante o transitório e o regime permanente. Um sistema de medição de vibração para motores de indução é apresentado por Wei *et al.* (2011), onde FBGs multiplexadas foram instaladas em vários motores. A passagem do cabo óptico é feito junto aos condutores que alimentam os motores e assim pode-se utilizar as FBGs para medição de temperatura nesses condutores. Sousa *et al.* (2012) apresenta a relação entre as perdas em um motor de indução trifásico e a elevação de temperatura em um motor de indução trifásico de 2 polos. Já em Sousa *et al.* (2013) as FBGs são utilizadas para medição de

temperatura e validação de um modelo térmico de um motor de indução trifásico.

Nos transformadores de potência a determinação das condições do óleo representa uma oportunidade para aplicação dos sensores ópticos. O óleo dos transformadores é utilizado para refrigeração, circulando por seu interior até as aletas externas. Assim o calor gerado no interior do transformador é dissipado para o ambiente. A degradação do óleo libera gases como o hidrogênio, acetileno e metano o que pode acarretar deterioração dos isolantes sólidos ou até explosões. A deterioração dos isolantes sólidos, principalmente papel, libera substâncias no óleo como o furfuraldeído. A dificuldade para determinar a qualidade do óleo isolante está no fato de ser necessário a retirada de amostrar do óleo para análises em laboratório, o que demora alguns dias e deve ser feito com o transformador desligado (WANG *et al.*, 2002). A utilização de uma técnica que monitore os gases de transformadores continuamente representa uma diminuição das paradas de máquina para manutenção preventiva. Em Blue *et al.* (1998) é apresentada uma técnica para determinação rápida da concentração de furfuraldeído. O sensor consiste na utilização de um material sensível a essa substância, denominado *methyltrimethoxy-silane* que muda de cor quando em contato com uma dada concentração de furfuraldeído. Foram utilizados discos com esse material que permanecem em contato direto com o óleo. Uma fibra óptica é utilizada para determinar a mudança de cor por espectroscopia. O trabalho utiliza várias configurações para diferentes concentrações de furfuraldeído no óleo. Uma técnica semelhante é apresentada por Bodzenta *et al.* (2002) onde são empregados filmes finos de paládio depositados sobre uma placa de vidro. Nessa aplicação o gás de interesse é o hidrogênio, que em concentrações entre 260 e 500 ppm podem ocasionar descargas parciais no interior do transformador. A absorção de hidrogênio pelo paládio altera suas propriedades elétricas e ópticas. Dessa forma, pode-se utilizar uma fibra óptica para medir a intensidade de luz refletida pelos filmes finos de paládio e assim identificar a quantidade de hidrogênio.

Filmes finos de paládio podem ainda ser utilizados para determinar a concentração de hidrogênio utilizando FBGs. Para isso deve-se desenvolver um encapsulamento que apresente deformação mecânica empregando filmes finos de paládio para que seja medida pela FBG, como na técnica apresentada por Ma *et al.* (2014). Os resultados apresentam uma variação com tendência linear para a absorção de hidrogênio para uma concentração que varia de 2 ppm a 900 ppm. O maior problema da utilização de filmes finos de paládio é a variação de temperatura que os transformadores apresentam durante sua operação que também altera suas propriedades ópticas. Em Betta *et al.* (2000) é apresentada uma técnica para medição de temperatura utilizando uma fibra óptica plástica com o núcleo de 600 μm . Nesse artigo a fibra óptica plástica é colocada dentro do transformador e a partir da variação do índice de refração da fibra óptica, o que leva a variações da intensidade da luz que se propaga na fibra, é possível determinar a

temperatura do transformador. Como o transformador não apresenta uma geometria uniforme, deve-se possuir um sistema para medição de temperatura em diversos pontos da máquina para que seja possível monitorar suas condições de operação. Nessa situação, a utilização de FBGs apresenta grande potencial devido a sua característica de multiplexação em comprimento de onda. Em Lobo Ribeiro *et al.* (2008) é apresentada a instrumentação de um transformador de 20 MVA utilizando FBGs encapsuladas em tubos de teflon. As FBGs foram instaladas em diversos pontos do transformador, onde uma diferença de 30°C foi observada entre o ponto mais frio e o mais quente da máquina. Kweon *et al.* (2012) apresenta uma aplicação semelhante onde 14 FBGs são utilizadas. Esse trabalho apresenta como diferencial uma análise das diferenças de temperatura observadas entre as partes do transformador, sendo monitorado os enrolamentos de alta e baixa tensão.

O nível de vibrações nos transformadores também apresenta interesse para sua medição, principalmente nos enrolamentos do transformador. Valores elevados de vibração fazem com que a isolamento do transformador seja danificada devido as forças mecânicas as quais os enrolamentos ficam sujeitos. Em Rivera *et al.* (2000) é apresentado um sensor interferométrico para medição de vibração. O sensor é um trecho de fibra óptica em contato com a superfície vibratória (o núcleo magnético ou os enrolamentos do transformador). No caso de vibrações mecânicas em núcleos magnéticos, eles são induzidos pelas forças magnéticas do campo de indução. Uma mudança periódica de dimensão do material ferromagnético é produzida devido aos campos magnéticos no transformador. Esta tensão dinâmica é identificada por mudanças no comprimento do caminho óptico da luz atravessando a fibra, sendo a medição realizada por uma técnica interferométrica.

Em Nokes (1999) é relatado a aplicação de um sistema distribuído, baseado em espalhamento Raman, para medir a temperatura de um transformador de potência de 22 MVA refrigerado a óleo. A fibra foi fixada diretamente sobre o cobre dos enrolamentos do transformador, com um comprimento total de 1000 m. Assim, o sistema distribuído foi capaz de medir o perfil da temperatura no enrolamento do transformador onde é possível observar as variações de temperatura, especialmente as temperaturas mais altas em ambas as extremidades do enrolamento. Isto foi devido ao fato de que na parte final do enrolamento a homogeneidade do campo magnético provoca perdas por corrente parasita.

Esses trabalhos prévios mostram a potencialidade dos sensores ópticos para aplicações em sistema de conversão de energia. Dentro dessa área de aplicação, este trabalho tem por objetivo a aplicação de redes de FBG para instrumentação de sistemas de máquinas elétricas, dessa forma contribuindo para o aplicações do uso de sensores ópticos na área de engenharia

elétrica. Para isso são desenvolvidas aplicações para um sensor de campo magnético (SOUSA *et al.*, 2014b), medição de temperatura e simulação de uma ponte retificadora utilizada para ajustar a corrente de campo do rotor de um gerador (SOUSA *et al.*, 2014a), medição da deformação dinâmica do estator de motores de indução (SOUSA *et al.*, 2016) e a caracterização de um acelerômetro óptico biaxial (LINESSIO *et al.*, 2016).

1.2 REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

A rede de Bragg em fibra óptica, em sua forma mais simples é constituída de uma modulação sinusoidal periódica do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica fotosensível, com índice efetivo denominado n_{eff} . A alteração no índice é feita 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 *et al.*, 1978; HILL; MELTZ, 1997; OTHONOS, 1997), conforme apresentado na Figura 1. O comprimento de onda próximo ao centro do espectro refletido λ_B , chamado de comprimento de onda de Bragg, é dado pela equação:

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

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). A Figura 1 apresenta a ilustração de três FBGs multiplexadas em comprimento de onda, cada uma com seu respectivo período Λ . Ao inserir uma fonte de luz com espectro banda larga, espectro incidente, parte da luz próximo ao comprimento de onda de Bragg de cada FBG é refletido. O espectro refletido tem característica semelhante a um filtro passa-faixa seletivo. O espectro transmitido, também apresentado na Figura 1, é a diferença entre o espectro incidente e o refletido, tendo um comportamento semelhante a um filtro rejeita-faixa.

A fotossensibilidade em fibras ópticas é o fenômeno no qual é possível a alteração o índice de refração do núcleo da fibra sob a exposição à luz UV. A fotossensibilidade é uma complexa gama de fenômenos, uma vez que existem vários mecanismos que dão origem a uma alteração do índice de refração como intensidade da luz utilizada, comprimento de onda e duração do pulso (SKUJA, 1998). É essa característica das fibras ópticas que permite que seja inscrita uma FBG em seu núcleo. O processo de gravação de uma FBG consiste na exposição

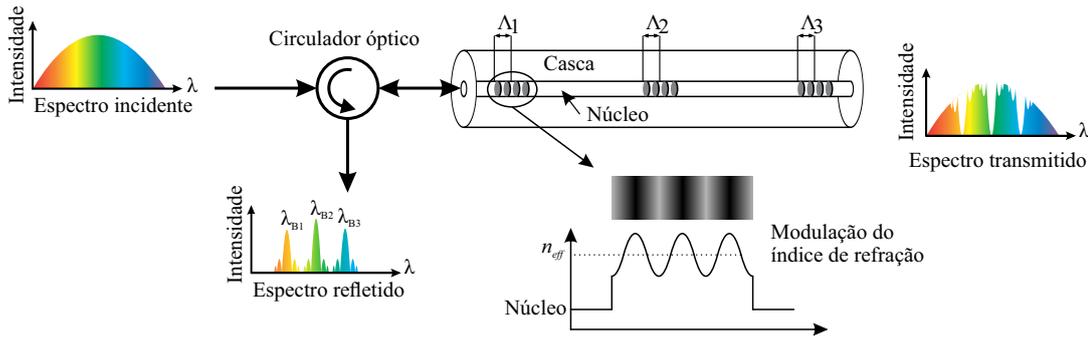


Figura 1: Rede de Bragg em fibra óptica e os espectros associados.

da fibra a um padrão interferência de uma luz UV. Esse padrão de interferência atinge o núcleo da fibra óptica onde, devido a fotossensibilidade, surgem as alterações de índice de refração pontuais e periódico. As técnicas de gravação mais utilizadas são a técnica interferométrica, a máscara de fase e a técnica do ponto por ponto (OTHONOS, 1997). A técnica empregando máscara de fase consiste em um dos mais efetivos métodos para gravação de redes de Bragg em fibra óptica. Essa técnica é muito utilizada devido à sua simplicidade e capacidade de reprodutibilidade. Esse método emprega um elemento ótico difrator (máscara de fase) para modular espacialmente o feixe de um laser UV. Quando o feixe apresenta uma incidência normal à superfície da máscara de fase, apenas os feixes de ordens ± 1 são difratadas. O padrão de interferência é então criado na fibra, que é posicionada quase em contato com a máscara de fase, pela sobreposição dos feixes de ordens ± 1 . O período criado pela sobreposição será metade do período da máscara de fase.

O valor de λ_B depende do período da rede Λ e do índice de refração efetivo n_{eff} . Alterações em um desses parâmetros, ou ambos, acarreta em um deslocamento $\Delta\lambda_B$ no valor de λ_B . Perturbações externas do ambiente que levam a variações na temperatura ΔT e deformação Δl na FBG acarretam em variações do comprimento de onda de Bragg, sendo expresso por:

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

A equação (2) pode ser reescrita na forma:

$$\Delta\lambda_B(l, T) = \lambda_B \left[\overbrace{\left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right)}^{(1-p_e)\Delta\epsilon} \Delta l + \left(\underbrace{\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}}_{\alpha n} + \underbrace{\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}}_{a\Lambda} \right) \Delta T \right] \quad (3)$$

Ao primeiro termo da expressão (3) está associada a alteração do índice de refração efetivo da rede proveniente de uma deformação mecânica. Nessa primeira parcela, $\Delta\epsilon$ representa

a componente de deformação relativa por unidade de comprimento e p_e representa a constante foto-elástica efetiva definida por:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (4)$$

onde p_{11} e p_{12} são componentes do tensor foto-elástico e ν o coeficiente de Poisson para sílica no núcleo da fibra, que apresenta os valores típicos de $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$ e $\nu = 0,16$. Para uma fibra com $n_{eff} = 1,482$ a equação (4) prevê uma variação $\Delta\lambda_b = 1,2 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

Para o segundo termo da expressão (3), $\alpha\Lambda$ corresponde ao coeficiente de expansão térmica da fibra com valor típico de $0,55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para sílica. O termo αn representa o coeficiente termo-ótico com valor típico de $8,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Pode-se observar que o valor de αn é predominante sobre $\alpha\Lambda$. O deslocamento no comprimento de onda possui valores típicos compreendidos entre $8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ e $12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ para comprimentos de onda na região de 1550 nm (OTHONOS, 1997).

Existem situações práticas em que a sensibilidade cruzada de temperatura e deformação é algo problemático, já que não é possível dissociar a parcela de contribuição de cada um desses dois parâmetros no deslocamento do comprimento de onda $\Delta\lambda_B$. Se a grandeza de interesse for temperatura, pode-se utilizar um encapsulamento para evitar que uma FBG sofra deformação, medindo apenas variações de temperatura. O contrário não pode ser feito, uma FBG utilizada para medição de deformação sempre irá sofrer variações de temperatura. A abordagem geral é fazer com que duas redes experimentem o mesmo ambiente de temperatura e deformação, mas de alguma forma sejam arranjadas para que tenham diferentes sensibilidade à esses parâmetros. Essa diferença de sensibilidade pode ser obtida a partir de um arranjo experimental diferente para cada FBG ou utilizando um encapsulamento específico, como o apresentado em Dreyer *et al.* (2013).

As FBGs apresentam algumas características que justificam a sua utilização em máquinas elétricas. A primeira delas está no tamanho reduzido uma vez que a FBG é uma modificação no interior do núcleo de uma fibra óptica, mantendo assim as dimensões da fibra, na ordem de $125 \text{ }\mu\text{m}$ de diâmetro e $2\text{-}3 \text{ mm}$ de comprimento. O tamanho reduzido garante rápido tempo de resposta, na ordem dos microssegundos, o que é um importante parâmetro para medições dinâmicas de deformação ou variações bruscas de temperatura, como acontece durante a comutação de semicondutores (BAZZO *et al.*, 2012). O tamanho reduzido permite ainda que as FBGs sejam incorporados em outros materiais com pouca influência sobre as propriedades do material. Isso permite a criação de estruturas inteligentes cujo comportamento pode ser facilmente monitorado sem o risco de danos que possam ocorrer com sensores montados na

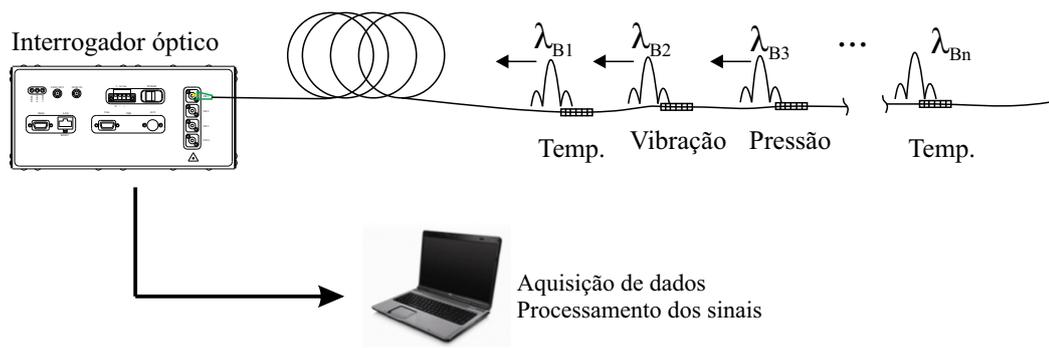


Figura 2: Ilustração da utilização de redes de Bragg em fibra óptica para instrumentação multi-paramétrica através da multiplexação em comprimento de onda.

superfície (MONTANINI *et al.*, 2016). Outra característica inerente da FBG é a baixa perda, na ordem de 0,2 dB/km. Com isso é possível realizar a medição remota, mesmo que o mensurando encontre-se distante alguns quilômetros da unidade de medição, sem a necessidade de amplificar o sinal proveniente dos sensores. Além disso, a medida de temperatura e deformação é feita a partir do deslocamento do comprimento de onda de Bragg, assim o parâmetro medido é uma informação no domínio da frequência. Dessa forma, flutuações na amplitude do sinal proveniente de atenuações no caminho óptico, principalmente devido a curvaturas da fibra, ou flutuações na fonte de alimentação não irão interferir no valor medido. Esse parâmetro é importante em aplicações onde é necessário a instalação do sensor em ambientes confinados, onde a fibra óptica está sujeita a curvaturas, como no caso do interior de motores de indução (SOUSA *et al.*, 2012).

As FBGs podem ser gravadas em diferentes posições da fibra óptica, onde cada ponto de gravação irá conter uma FBG com uma periodicidade Λ específica, como ilustrado na Figura 1. Assim, cada FBG irá possuir um comprimento de onda de Bragg λ_B específico. Essa propriedade de multiplexação em comprimento de onda possibilita a utilização de FBGs para o sensoriamento quasi-distribuído, onde pontos de medição discretos são distribuídos ao longo da fibra óptica. A Figura 2 apresenta uma ilustração de um arranjo de FBGs multiplexadas na mesma fibra óptica. Na situação ilustrada cada uma das FBGs mede uma grandeza diferente, como temperatura, vibração e deformação. Com isso, pode-se instrumentar diversos pontos em diferentes locais em um ambiente industrial, utilizando apenas uma única fibra óptica e uma única unidade de medição, denominada de interrogador óptico. Em máquinas elétricas de grande porte, como no caso de geradores elétricos de potência, são necessários vários pontos de medição de temperatura e o uso de sensores multiplexados facilita a medição simultânea desses pontos (MARTELLI *et al.*, 2012).

O interrogador óptico é o equipamento dedicado à leitura e aquisição do sinal refle-

tido de uma ou mais FBGs. Devido ao surgimento de aplicações em ambientes industriais das FBGs criou-se a necessidade de fazer a interrogação em um instrumento portátil de campo, o que levou ao desenvolvimento de técnicas de interrogação e processamento de sinal, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens. A primeira delas é a utilização de filtro de Fabry-Pérot (KERSEY *et al.*, 1993a) e filtro de borda (MELLE *et al.*, 1992). Um interferômetro de dois feixes, como o interferômetro de Michelson ou Mach-Zehnder, pode ser usado para obter uma melhor resolução em comparação as técnicas anteriores (KERSEY *et al.*, 1992, 1993b). A outra linha de abordagem para interrogação é a partir da análise do espectro óptico de reflexão utilizando espectrômetros baseados dispositivo de carga acoplada (CCD)(ASKINS *et al.*, 1995). Esses espectrômetros não têm uma resolução tão boa como um analisador de espectro óptico (OSA) utilizando em laboratório. Entretanto, técnicas de processamento de sinais, como o uso de um algoritmo de centróide, pode ser utilizado para obtenção de melhores resoluções de comprimento de onda (EZBIRI *et al.*, 1997). Cada uma das técnicas de interrogação tem suas vantagens e desvantagens que devem ser levadas em consideração na hora da escolha de qual interrogador utilizar. As desvantagens da interrogação pelo espectrômetro são o custo do conjunto dos CCD e a taxa de aquisição baixa comparada com filtros fixos e interferômetros. Todavia, pode-se interrogar uma quantidade significativa de FBGs multiplexadas na mesma fibra utilizando essa técnica. Já o uso de filtros e interferômetros possui limitação na quantidade de sensores multiplexados, geralmente limitados a algumas unidades por canal, entretanto possui um preço menor e uma taxa de aquisição na ordem de centenas de quilo hertz (NUNES *et al.*, 2004).

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está organizada na forma de coletânea de artigos publicados em periódicos qualificados na área de engenharia elétrica. O primeiro artigo apresenta a medição de temperatura de uma ponte retificadora de tiristores utilizada para controlar a corrente do rotor de um gerador de 6.5 MW. A medição é realizada na Usina Hidrelétrica da Derivação do Rio Jordão, localizada entre os municípios de Foz do Jordão e Reserva do Iguçu, à 350 km de Curitiba. Um dos principais parâmetros na utilização de dispositivos semicondutores de potência é seu desempenho térmico. De acordo com Fabis *et al.* (1999), cerca de 60% das falhas são relacionadas a elevação de temperatura e para cada 10 °C de elevação na temperatura do semicondutor a possibilidade de falhas dobra. Para caracterizar o comportamento térmico dinâmico os fabricantes de semicondutores tipicamente disponibilizam a curva de impedância térmica na folha de dados. Essa curva apresenta o comportamento transitório da temperatura quando um degrau

constante de potência é aplicado. Em alguns casos é necessário determinar de forma precisa o comportamento térmico na escala de microsegundos, o que torna difícil determinar a temperatura experimentalmente (RINALDI, 2001; BAZZO *et al.*, 2012). Devido a isso, os sensores ópticos mostram-se promissores para essa aplicação, sendo utilizados em Bazzo *et al.* (2012) para determinação de um modelo térmico de um IGBT (Transistor Bipolar de Porta Isolada), onde a rápida resposta da FBG permitiu a determinação da variação de temperatura durante o chaveamento do IGBT. As contribuições nesse primeiro artigo são a instalação das FBGs, a realização dos ensaios e a determinação dos parâmetros e simulação do circuito térmico equivalente.

No segundo artigo é apresentado um sensor de campo magnético. O sensor é baseado no princípio da magnetostricção, definida como o fenômeno onde um corpo com propriedades magnéticas expande ou encolhe na direção da magnetização em função da aplicação de um campo magnético. Dessa forma, materiais que apresentam magnetostricção convertem a energia magnética em energia mecânica, o inverso também é verdade; isto é, quando um material é sujeito a uma deformação externa seu estado magnético é alterado (LEE, 1955). Os principais efeitos da magnetostricção observados experimentalmente são: o efeito Joule, alterações no volume e o efeito Wiedemann. O efeito Joule é responsável pela expansão ou compressão na mesma direção do campo magnético. As alterações volumétricas são pequenas em comparação com a linear, sendo negligenciadas na maioria dos casos (SATPATHI *et al.*, 2005; REILLY *et al.*, 2006; CREMONEZI *et al.*, 2013). O efeito Wiedemann é uma resposta a tensão de cisalhamento para o campo magnético, de forma análoga à tração ou tensão de compressão produzida no efeito Joule (LEE, 1955; EKREEM *et al.*, 2007). O material magnetostrictivo comercial mais utilizado para esse propósito é o Terfenol-D. A sua utilização deve-se a alta capacidade na conversão de energia em deformação mecânica, rápida resposta em comparação aos demais materiais magnéticos e pode ser utilizado para uma faixa ampla de frequência (compatível com as frequências de correntes elétricas em ambientes industriais). O Terfenol-D é composto por ferro, térbio e disprósio e por possuir uma maior sensibilidade a campos magnéticos recebe a classificação de material magnetostrictivo gigante. A magnetostricção no Terfenol-D é um fenômeno unipolar, uma deformação positiva é produzida na presença de campo magnético positivo ou negativo. Além disso, sua resposta é não linear, quadrática em relação ao campo magnético (HRISTOFOROU; KTENA, 2007). Existe ainda a variação na resposta que esses materiais apresentam mediante a uma carga mecânica de compressão ou tração (CREMONEZI *et al.*, 2013). Esses efeitos são, muitas vezes, negligenciados quando apresentam-se sensores empregando o efeito da magnetostricção. Assim, este trabalho apresenta algumas características do Terfenol-D utilizando FBG para medição da deformação. As características analisadas são a

dependência da magnetostricção com a temperatura e a histerese do material. As contribuições para o segundo artigo são o arranjo experimental, incluindo o encapsulamento e colagem das FBGs, realização dos ensaios e análise dos resultados.

No terceiro artigo é apresentada uma nova técnica para medição de deformação dinâmica no estator de motores de indução, medida no interior do motor entre os dentes do estator. Trata-se de uma técnica inovadora de medição de deformação durante o funcionamento da máquina, sendo a principal contribuição desta tese. Essa técnica pode ser usada para determinar a atração magnética de desequilíbrio (DORRELL *et al.*, 1997) ou determinar a influência da utilização de inversores de frequência no acionamento de máquinas elétricas (HASHISH; MISTRY,). A utilização de inversores de frequência introduz correntes não senoidais no estator do motor, que por sua vez leva a problemas como oscilações de velocidade e o surgimento de torque parasita (VERMA; BALAN, 1994) devido a distribuição do fluxo do entreferro apresentar harmônicos. Diagnósticos de falhas mecânicas no motor também podem ser realizadas utilizando a medição de deformação dinâmica do estator, falhas como a excentricidade do rotor. No artigo é abordada a influência da excentricidade na deformação do estator para motores de 2 e 4 polos para diferentes níveis de excentricidade. Nesse terceiro artigo a contribuição é a determinação das componentes em frequência das forças mecânicas e eletromagnéticas, a determinação do ponto de instalação dos sensores e a realização dos ensaios.

Por fim, o último artigo desta tese apresenta a implementação, caracterização, calibração e teste de um acelerômetro óptico biaxial, apresentado inicialmente em Antunes *et al.* (2012), aplicado a máquinas elétricas girantes. O sensor proposto é capaz de medir duas direções ortogonais, simultaneamente. Devido ao arranjo dos sensores, o acelerômetro óptico biaxial não possui sensibilidade a variações de temperatura. O desenvolvimento de um acelerômetro leva ao diagnóstico de falhas não-invasiva e ajuda a economizar custos de manutenção (BINDU; THOMAS, 2014; FISER *et al.*, 1995). Mudanças de vibração em máquinas elétricas são muitas vezes o primeiro indicador de uma possível falha e pode ocorrer a qualquer momento durante a instalação ou operação. Em motores de indução, existem várias forças elétricas e mecânicas presentes que podem causar vibrações (COSTELLO, 1990; FINLEY *et al.*, 2013). As condições que causam vibrações excessivas são desequilíbrio, desalinhamento, folgas em peças de máquinas, deterioração dos rolamentos e engrenagens danificadas e cerca de 5 a 10% são falhas de rotor (BINDU; THOMAS, 2014; THOMSON; FENGER, 2001). A instrumentação da deformação do estator possibilitaram a validação experimental das frequências de vibração do motor de indução obtidos com o acelerômetro óptico. As mesmas forças que causam deformações no estator também causam vibrações no motor. Entretanto, embora a medição de deformação possibilite a obtenção de sinais com pouca interferência de parâmetro externos

relacionados ao ambiente em que o motor está instalado, também é importante a identificação de outras fontes de vibração como, por exemplo, outras máquinas instaladas no local e variações de carga. Os resultados da utilização do acelerômetro óptico biaxial em motores de indução mostram que o acelerômetro tem potencial para aplicação em outras máquinas elétricas, principalmente em geradores e motores de grande porte. A realização dos ensaios no motor a vazio e com falhas no rotor, além da análise dos resultados, são as contribuições para desse trabalho.

2 ARTIGO 1: *FIBER BRAGG GRATING TEMPERATURE SENSORS IN A 6.5-MW GENERATOR EXCITER BRIDGE AND THE DEVELOPMENT AND SIMULATION OF ITS THERMAL MODEL*

SOUSA, K. M.; PROBST, W.; BORTOLOTTI, F.; MARTELLI, C.; SILVA, J.C. C. Fiber Bragg Grating Temperature Sensors in a 6.5-MW Generator Exciter Bridge and the Development and Simulation of Its Thermal Model. *Sensors* 2014, v. 14, p. 16651-16663, ISSN 1424, doi10.3390/s140916651.

3 ARTIGO 2: APPLICATION OF FIBER BRAGG GRATING TO DETERMINE THE TERFENOLD MAGNETOSTRICTION CHARACTERISTICS FOR SENSOR DEVELOPMENT

Sousa, K. M.; Zandonay, R.; Silva, E. V.; Martelli, C.; Silva, J. C. C. Application of Fiber Bragg Grating to Determine the Terfenol-D Magnetostriction Characteristics for Sensor Development. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe) November 2014, Vol. 13, SI-1-SI9.

4 ARTIGO 3: *DYNAMIC ECCENTRICITY INDUCED IN INDUCTION MOTOR DETECTED BY OPTICAL FIBER BRAGG GRATING STRAIN SENSORS*

Sousa, K. M.; Dreyer, U. J.; Martelli, C. Martelli; Silva, J. C. Cardozo; "Dynamic Eccentricity Induced in Induction Motor Detected by Optical Fiber Bragg Grating Strain Sensors,"in IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 12, pp. 4786-4792, June15, 2016. doi: 10.1109/JSEN.2016.2554885

5 ARTIGO 4: *INDUCTION MOTORS VIBRATION MONITORING USING A BIAXIAL OPTICAL FIBER ACCELEROMETER*

Linessio, R. P.; Sousa; K. M.; Silva, T.; Bavastri, C. A.; Antunes, P. F. d. C.; Cardozo, J. C. C., "Induction Motors Vibration Monitoring Using a Biaxial Optical Fiber Accelerometer," in IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 22, pp. 8075-8082, Nov.15, 2016. doi: 10.1109/JSEN.2016.2604850

6 CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

O uso de sensores FBG em uma ponte retificadora de gerador de 6,5 MW permite a determinação de seu comportamento térmico e a dependência da corrente de campo. A função da ponte retificadora é controlar a corrente de excitação do rotor e, a partir do valor da corrente de excitação, determinou-se as perdas nos tiristores com base em suas características construtivas. A partir das perdas e da temperatura dos tiristores, medida por seis FBGs, determinou-se os parâmetros de um modelo térmico de segunda ordem para o tiristor. Os parâmetros do modelo térmico são determinados a partir da resposta ao degrau dos tiristores. A simulação do modelo térmico apresenta um erro de $1,5^{\circ}\text{C}$ em comparação com a temperatura média. As diferenças entre a temperatura simulada e a temperatura média é devido a alterações na temperatura ambiente da usina. Essas mudanças de temperatura ambiente não são consideradas no modelo de simulação dos tiristores. A obtenção da temperatura dos tiristores a partir do modelo térmico pode ser utilizada para estimar a temperatura sem a necessidade da utilização de sensores. Além disso, uma vez que a temperatura do tiristor é uma função da corrente de campo, a condição de funcionamento do gerador pode ser determinada a partir da temperatura. Como a potência reativa do gerador é função da corrente de campo, o valor da potência reativa também pode ser associada com a temperatura. A partir da medição de temperatura também podem ser diagnosticadas condições de operação do rotor, como falhas de isolamento, por exemplo.

Em relação ao sensor de campo magnético, algumas características de um material magnetostritivo Terfenol-D, utilizando FBG para determinar a deformação do material, são apresentados. Para isso, duas FBGs são utilizadas sendo uma delas colada diretamente no material e a outra encapsulada para evitar o efeito da deformação. Assim, é possível determinar temperatura e deformação do material. A magnetoestricção tem algumas características que limitam a sua utilização como um sensor de campo magnético ou aplicações para determinação de corrente elétrica. Além da resposta não-linear, a magnetoestricção sofre a influência na condição de compressão, tração e temperatura. A condição de temperatura do material, situação apresentada

nesta tese, altera significativamente o comportamento magnético do material. A deformação do Terfenol-D aumenta quando a temperatura aumenta e a saturação do material ocorre para valores de campos menores. Em valores próximos de temperaturas a magnetoestricção tem um comportamento similar, como a $75,5^{\circ}\text{C}$ e $78,7^{\circ}\text{C}$. Além disso, o Terfenol-D apresenta histerese, como qualquer material ferromagnético. Estas características devem ser levadas em consideração no desenvolvimento de sensores que usam o efeito da magnetoestricção. Geralmente, quando reportado o uso do Terfenol-D como sensor de campo para determinar a corrente em um condutor, por exemplo, o efeito da temperatura é negligenciado. Por isso a importância de reportar as variações da resposta do material com a temperatura.

No quarto artigo presente nesta tese, a deformação dinâmica do estator de motores de indução trifásico é prevista teoricamente, em termos de componentes harmônicas e observadas de forma experimental utilizando FBG. Uma vez que as medições são realizadas dentro do motor na superfície do estator, os resultados não são influenciados por outros parâmetros mecânicos, tais como a fixação do motor na bancada de ensaios ou a atenuação de vibração devido a transferência de forças eletromagnéticas para fora do motor. Componentes de frequência observadas representam a combinação de forças mecânicas e elétricas, e isso acontece mesmo quando a frequência de alimentação do motor é reduzida pela metade. A outra informação que foi verificada quando a medição de deformação é feita dentro do motor é a forma de onda de deformação, incluindo a fase onda senoidal que tem como origem o campo magnético girante no entreferro.

Quando um peso é colocado no eixo do rotor, de forma a aumentar a excentricidade do rotor, a forma de onda da deformação dinâmica do estator muda de forma. Desde que a excentricidade inserida no rotor com a anexação do peso é predominantemente de natureza mecânica, apenas a amplitude da componente de frequência relacionada a deformação mecânica é alterado. Os dois pesos diferentes que foram anexadas ao rotor aumentaram a amplitude das componentes de frequência de 60 Hz e 30 Hz dos motores de 2 e 4 polos, respectivamente, enquanto que a componente de frequência de 120Hz permaneceu inalterada. Estas variações podem ser observadas nos domínios tempo e frequência, devido a boa relação sinal-ruído, maior do que 100 dB. A boa relação sinal ruído é devido imunidade eletromagnética da FBG. A resposta rápida dos sensores, devido à sua pequena massa, permite medir a deformação apresentada no estator do motor mesmo para frequências de até 250 Hz. A medição de deformação no interior do motor abriu novas oportunidades para outros trabalhos, com destaque para o diagnóstico de barras quebradas no rotor. Os resultados mostram que, quando nenhum peso é colocado no rotor, a amplitude da frequência relacionada a velocidade é de -75 dB. Ao inserir os pesos, essa amplitude aumenta para -57 dB e -52 dB para as massa de 55g e 110 g, respectivamente. Enquanto

que a amplitude da vibração relacionada a força eletromagnética permanece igual para as três situações.

Por fim, em relação ao acelerômetro biaxial, trata-se de um sensor insensível à variação de temperatura, para monitoramento de vibração em máquinas elétricas. A caracterização com um martelo de impacto permitiu estimar as frequências naturais do sensor, para o eixo x foi de 747,5 Hz e para o eixo y foi de 757,5 Hz. A partir da análise em motores de indução, foi observado um elevado SNR, para os componentes de frequência esperados. A frequência observada em um motor de indução 2-pólos são a combinação da frequência mecânica (velocidade do motor) e duas vezes a frequência da fonte de alimentação. Quando o motor é alimentado por uma fonte de tensão com 60 Hz, as componentes de frequência esperadas são 60 Hz, 120 Hz, 180 Hz e 240 Hz para um motor de 2 polos. Nas componentes de vibração de frequência em um motor de 4 pólos, com uma barra de rotor quebrado, foi possível identificar as frequências de banda lateral devido à parte quebrada, para o motor funcionando a 75% e 100% da carga nominal. A componente espectral de banda lateral foi observado para uma situação de carga de 75% a 118 Hz e 116 Hz, para a operação de carga de 100%, mesma situação observadas para o método que utiliza a deformação do estator. Sensores de fibra óptica em comparação com o acelerômetro capacitivo oferece imunidade à interferência eletromagnética, característica fundamental para utilização em geradores e grandes máquinas. O uso do acelerômetro óptico biaxial em um motor de indução pode identificar falhas em seu funcionamento, o que justifica a sua aplicação em máquinas elétricas, como geradores síncronos de potência.

As características das FBGs são fundamentais para a obtenção dos resultados apresentados. Primeiramente, o ambiente em que os tiristores são instalados possui uma alta interferência eletromagnética devido as comutações dos tiristores. Existe ainda o fato de que o local onde os sensores são instalados são sujeitos a fugas de corrente, uma vez que a carcaça dos tiristores pode ficar energizada. Assim, como a fibra óptica é um material isolante não existe o risco de curto circuito. No caso do Terfenol-D, além da influência de campo magnético que é o parâmetro a ser determinado, a característica multiparamétrica de temperatura e deformação são utilizadas para determinar esses dois parâmetros utilizando uma fibra com sensores multiplexados. No caso da instrumentação do motor de indução para determinação da deformação do estator, além da imunidade eletromagnética, o tamanho reduzido do sensor é de grande importância. O espaço para instalação do sensores é reduzido e existe ainda o risco do rotor encostar nos sensores durante a operação do motor. Assim, as contribuições desta tese são importantes para consolidar os sensores ópticos, em especial as FBGs, para aplicações industriais. Dessa forma, a partir das contribuições reportadas, abre-se oportunidade de trabalhos futuros.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados e técnicas de instrumentação apresentadas neste trabalho abrem caminho para trabalhos futuros. Quanto a instrumentação da ponte retificadora, como aplicações futuras pode-se citar a integração do modelo térmico com outras variáveis do rotor. Uma delas é a realização de um modelo inverso ao apresentado nesta tese, onde ao invés de determinar a temperatura a partir da corrente, será determinado o valor da corrente utilizando as medições de temperatura. Para isso deve-se primeiramente determinar o modelo dinâmico do rotor, levando em conta seu comportamento em relação ao estator. Como a corrente de campo ajusta a potência reativa do gerador, quando conectado em paralelo a um barramento infinito, pode-se ainda associar a elevação de temperatura dos tiristores com a potência reativa da máquina. Pode-se ainda utilizar a capacidade de multiplexação em comprimento de onda das FBGs e instalar mais sensores em outras partes da cabine de chaveamento, onde são instalados os tiristores.

Os ensaios com variação de temperatura do Terfenol-D mostram que sua resposta depende desse parâmetro. Pode-se, então, como trabalho futuro, desenvolver técnicas de pós-processamento para compensar esse efeito. A partir das curvas de caracterização, pode-se buscar o valor da deformação já que o conjunto de FBGs utilizadas mede tanto temperatura quanto deformação. Outra questão a ser resolvida para o Terfenol-D como sensor é relacionado a histerese. Novamente, a partir do processamento do sinal de deformação e da temperatura medido pelas FBGs pode-se desenvolver algoritmos para corrigir essa questão, como apresentado em Davino *et al.* (2008). Um encapsulamento mais robusto pode tornar mais fácil a aplicação do sensor em ambientes industriais. Com isso tem-se a vantagem de realizar medições em campo e determinar seu comportamento para diagnósticos de máquinas elétricas. Como, por exemplo, as falhas do rotor em motores de indução também afetam o campo magnético que não fica confinado no entreferro do motor. Utilizando-se o Terfenol-D pode-se medir esse campo e assim diagnosticar falhas. Em Rigoni *et al.* (2012) é apresentado uma técnica para diagnóstico de barras quebradas utilizando uma bobina para medir o fluxo magnético disperso. Uma ponta de prova empregando o Terfenol-D pode ser utilizada de forma semelhante.

Quanto a instrumentação de deformação do estator pode-se utilizar sensores FBG adicionais em mais ranhuras, a depender do tamanho da máquina, e assim mapear a deformação completa do estator. Isso é importante para projeto de novas máquinas, testes de materiais e validação de modelos de elementos finitos. Dessa forma, a validação experimental de modelos de deformação em elementos finitos, como o apresentado em Schlensok *et al.* (2008), pode ser realizada. Como apresentado no artigo relacionado à medição de deformação no estator, a relação de fase entre o campo magnético girante do entreferro e a posição espacial dos

sensores é a mesma. Assim, é possível obter um vetor de orientação do campo magnético de maneira experimental. As técnicas de controle vetorial em máquinas elétricas hoje são baseadas no campo calculado a partir do produto entre a corrente e a indutância de dispersão do estator (BOLDEA *et al.*, 2008; RODRIGUEZ; SANTISTEBAN, 2011). Assim, esse pode ser um complemento as técnicas de controle vetorial, ou mesmo confrontar se os valores calculados são de fato reais, melhorando assim os sistemas de controle vetorial. A influência da alimentação sobre a vibração e deformação do estator também pode ser analisada. Tensão desequilibrada e harmônicos de corrente afetam a forma de onda do fluxo magnético no entreferro. Assim, pode haver oscilações na vibração da máquina, que pode ser detectado pela instrumentação apresentada. Outras falhas mecânicas do estator que possuem frequências característica de deformação podem ser identificadas com essa técnica. Destaca-se a identificação de falhas de rolamento que apresenta frequências características de vibração (TRACHI *et al.*, 2016; S.; HEGDE, 2016).

Por fim, o acelerômetro óptico biaxial foi capaz de determinar as frequências de vibração de um motor de indução. Isso mostra o potencial de aplicação desse acelerômetro para máquinas elétricas. O valor frequência de ressonância do acelerômetro é suficiente para justificar sua aplicação em grandes máquinas, como geradores e transformadores de usinas hidrelétricas. Como no caso dos motores de indução, a frequência de vibração dessas máquinas costuma estar limitadas em até 250 Hz. No caso dos geradores de hidrelétricas, devido a baixa velocidade de rotação (geralmente 2 Hz a 4 Hz), as frequências mais importantes para análises estão abaixo dos 30 Hz (ZHU *et al.*, 2015). Existe ainda a frequência de vibração em 120 Hz, que ocorre em máquinas elétricas independence do número de polos. Assim, os geradores de usinas hidrelétricas apresentam, além das baixas frequências próximo a 2 Hz e 4 Hz, frequências em 120 Hz (DIRANI *et al.*, 2015).

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, D. Z. *et al.* Production of in-fibre gratings using a diffractive optical element. **Electronics Letters**, v. 29, n. 6, p. 566–568, March 1993. ISSN 0013-5194.
- ANTUNES, P. F. C. *et al.* Biaxial optical accelerometer and high-angle inclinometer with temperature and cross-axis insensitivity. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 7, p. 2399–2406, July 2012. ISSN 1530-437X.
- ASKINS, C. G.; PUTNAM, M. A.; FRIEBELE, E. J. **Instrumentation for interrogating many-element fiber Bragg grating arrays**. 1995. 257-266 p. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/12.207681>>.
- BAZZO, J. P. *et al.* Thermal characteristics analysis of an igbt using a fiber bragg grating. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 50, n. 2, p. 99 – 103, 2012. ISSN 0143-8166.
- BETTA, G.; PIETROSANTO, a.; SCAGLIONE, a. An enhanced fiber optic temperature sensor system for power transformer monitoring. **Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference [Cat. No. 00CH37066]**, v. 1, n. 5, p. 1138–1143, 2000. ISSN 1091-5281.
- BINDU, S.; THOMAS, V. V. Diagnoses of internal faults of three phase squirrel cage induction motor 2014; a review. In: **Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT), 2014 International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 48–54.
- BLUE, R.; UTTAMCHANDANI, D.; FARISH, O. A novel optical sensor for the measurement of furfuraldehyde in transformer oil. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 47, n. 4, p. 964–966, 1998. ISSN 0018-9456.
- BODZENTA, J. *et al.* Thin palladium film as a sensor of hydrogen gas dissolved in transformer oil. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, v. 87, n. 1, p. 82–87, 2002. ISSN 09254005.
- BOLDEA, I.; PAICU, M. C.; ANDREESCU, G. D. Active flux concept for motion-sensorless unified ac drives. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 23, n. 5, p. 2612–2618, Sept 2008. ISSN 0885-8993.
- CHINTAKINDI, R.; RAJESH, S. P. S. Vital role of FBG sensors - 2012 developments in electrical power systems. **Proceedings of 2013 International Conference on Power, Energy and Control, ICPEC 2013**, p. 478–483, 2013.
- COSTELLO, M. Understanding the vibration forces in induction motors. In: **Proceedings of the 19th Turbomachinery Symposium, Dallas, TX**. [S.l.: s.n.], 1990. p. 67–76.
- CREMONEZI, A. O. *et al.* A Fiber Bragg Grating RMS Current Transducer Based on the Magnetostriction Effect Using a Terfenol-D Toroidal-Shaped Modulator. **IEEE Sensors Journal**, n. 2, p. 683–690, fev. 2013. ISSN 1530-437X.

DAVINO, D. *et al.* Compensation of hysteresis in magnetic field sensors employing fiber bragg grating and magneto-elastic materials. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 147, n. 1, p. 127 – 136, 2008. ISSN 0924-4247.

DIRANI, H. C. *et al.* Free vibration analysis of a large hydroelectric generator and computation of radial electromagnetic exciting forces. p. 328–334, May 2015.

DORRELL, D.; THOMSON, W.; ROACH, S. 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**, v. 33, n. 1, p. 24–34, 1997. ISSN 00939994.

DREYER, U. *et al.* A technique to package Fiber Bragg Grating Sensors for Strain and Temperature Measurements. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, scielo, v. 12, p. 638 – 646, 12 2013. ISSN 2179-1074.

DREYER, U. J. *et al.* Quasi-Distributed Temperature Measurement for Hydroelectric Generators Bearings via use of Fiber Bragg Gratings. p. LF2B.4, 2014.

DUBANIEWICZ, T. H. *et al.* Distributed measurement of conductor temperatures in mine trailing cables using fiber-optic technology. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 34, n. 2, p. 395–398, 1998. ISSN 00939994.

EKREEM, N. *et al.* An overview of magnetostriction, its use and methods to measure these properties. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 191, n. 1-3, p. 96–101, ago. 2007. ISSN 09240136.

EZBIRI, A.; KANELLOPOULOS, S. E.; HANDEREK, V. A. High resolution instrumentation system for demodulation of bragg grating aerospace sensors. In: **12th International Conference on Optical Fiber Sensors**. Optical Society of America, 1997. p. OThC13. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFS-1997-OThC13>>.

FABIS, P.; SHUM, D.; WINDISCHMANN, H. Thermal modeling of diamond-based power electronics packaging. In: **Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1999. Fifteenth Annual IEEE**. [S.l.: s.n.], 1999. p. 98–104. ISSN 1065-2221.

FINLEY, W.; LOUTFI, M.; SAUER, B. J. Motor vibration problems: Understanding and identifying. In: **2013 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–20. ISSN 1079-9931.

FISER, R.; FERKOLJ, S.; SOLINC, H. Steady state analysis of induction motor with broken rotor bars. In: **Electrical Machines and Drives, 1995. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 412)**. [S.l.: s.n.], 1995. p. 42–46.

GUO-MING, M. *et al.* A Passive Optical Fiber Anemometer for Wind Speed Measurement on High-Voltage Overhead Transmission Lines. **Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on**, v. 61, n. 2, p. 539–544, 2012.

HARAMONI, N. *et al.* Hybrid wavelength-time-domain interrogation system for multiplexed fiber bragg sensors using a strain-tuned erbium-doped fiber laser. **IEEE Sensors Journal**, v. 8, n. 7, p. 1061–1066, July 2008. ISSN 1530-437X.

HASHISH, E.; MISTRY, R. Effect of Drive System Component Compatibility on Motor Vibration. **IEEE Transactions on Industry Applications**, p. 134–141. ISSN 0093-9994.

HILL, K.; MELTZ, G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, n. 8, p. 1263–1276, 1997. ISSN 07338724.

HILL, K. O. *et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Applied Physics Letters**, v. 32, n. 10, p. 647–649, 1978.

HILL, K. O. *et al.* Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by uv exposure through a phase mask. **Applied Physics Letters**, v. 62, n. 10, p. 1035–1037, 1993. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/62/10/10.1063/1.108786>>.

HRISTOFOROU, E.; KTENA, A. Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, n. 2, p. 372–378, set. 2007. ISSN 03048853.

KAWAI, T. *et al.* A new approach to cable fault location using fiber optic technology. I. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 1, p. 85–91, 1995. ISSN 08858977.

KERSEY, A. D.; BERKOFF, T. A.; MOREY, W. W. High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection. **Electronics Letters**, v. 28, n. 3, p. 236–238, Jan 1992. ISSN 0013-5194.

KERSEY, A. D.; BERKOFF, T. A.; MOREY, W. W. Multiplexed fiber bragg grating strain-sensor system with a fiber fabry-perot wavelength filter. **Opt. Lett.**, OSA, v. 18, n. 16, p. 1370–1372, Aug 1993. Disponível em: <<http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-18-16-1370>>.

KERSEY, A. D.; MOREY, W. W.; BERKOFF, T. A. Fiber-optic bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection. **Opt. Lett.**, OSA, v. 18, n. 1, p. 72–74, Jan 1993.

KWEON, D. *et al.* Hot spot temperature for 154 kV transformer filled with mineral oil and natural ester fluid. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 19, n. 3, p. 1013–1020, 2012. ISSN 10709878.

LEE, E. W. Magnetostriction and Magnetomechanical Effects. **Reports on Progress in Physics**, v. 18, n. 1, p. 184–229, jan. 1955. ISSN 00344885.

LINESIO, R. P. *et al.* Induction motors vibration monitoring using a biaxial optical fiber accelerometer. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 22, p. 8075–8082, Nov 2016. ISSN 1530-437X.

Lobo Ribeiro, a. B. *et al.* Multipoint fiber-optic hot-spot sensing network integrated into high power transformer for continuous monitoring. **IEEE Sensors Journal**, v. 8, n. 7, p. 1264–1267, 2008. ISSN 1530437X.

MA, G.-M. *et al.* Fiber bragg grating sensor for hydrogen detection in power transformers. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 21, p. 380–385, 2014. ISSN 1070-9878.

MA, G. M. *et al.* A fiber bragg grating tension and tilt sensor applied to icing monitoring on overhead transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 4, p. 2163–2170, 2011. ISSN 08858977.

- MARTELLI, C. *et al.* Temperature sensing in a 175MW power generator. In: **OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 8421, p. 84212F–84212F–4.
- MELLE, S. M.; LIU, K.; MEASURES, R. M. A passive wavelength demodulation system for guided-wave bragg grating sensors. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 4, n. 5, p. 516–518, May 1992. ISSN 1041-1135.
- MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. **Opt. Lett.**, OSA, v. 14, n. 15, p. 823–825, Aug 1989. Disponível em: <<http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-14-15-823>>.
- MENDEZ, A. **Fiber Bragg grating sensors: a market overview**. 2007. 661905-661905-6 p.
- MEZZADRI, F. *et al.* Thermal Mapping of a Radiator in a Hydroelectric Generator using Fiber Bragg Gratings. p. LTh4A.40, 2014.
- MONTANINI, R. *et al.* Strain sharing assessment in woven fiber reinforced concrete beams using fiber bragg grating sensors. **Sensors**, v. 16, n. 10, p. 1564, 2016. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/16/10/1564>>.
- MONTSINGER, V. M. Loading transformers by temperature. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 49, n. 2, p. 776–790, April 1930. ISSN 0096-3860.
- NIEWCZAS, P. *et al.* Design and evaluation of a preprototype hybrid fiber-optic voltage sensor for a remotely interrogated condition monitoring system. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 54, n. 4, p. 1560–1564, Aug 2005. ISSN 0018-9456.
- NOKES, G. Optimising power transmission and distribution networks using optical fibre distributed temperature sensing systems. **Power Engineering Journal**, v. 13, n. 6, p. 291–296, Dec 1999. ISSN 0950-3366.
- NUNES, L.; VALENTE, L.; BRAGA, A. Analysis of a demodulation system for fiber bragg grating sensors using two fixed filters. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 42, n. 5, p. 529 – 542, 2004. ISSN 0143-8166. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816604000661>>.
- OTHONOS, A. Fiber bragg gratings. **Review of Scientific Instruments**, v. 68, n. 12, p. 4309–4341, Dec 1997. ISSN 0034-6748.
- PEACH, M. **Market for fiber optics sensors to hit \$ 4bn by 2017**. julho 2013. [Http://optics.org/news](http://optics.org/news). Acessado em 17 de outubro de 2016.
- QI, H. *et al.* New type of fiber optic sensor network for smart grid interface of transmission system. **Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE**, n. 23, p. 1–5, 2010.
- REILLY, D. *et al.* A fiber-bragg-grating-based sensor for simultaneous ac current and temperature measurement. **IEEE Sensors Journal**, 2006. ISSN 1530-437X.
- RIGONI, M. *et al.* Detection and analysis of rotor faults in induction motors by the measurement of the stray magnetic flux. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, scielo, v. 11, p. 68 – 80, 06 2012. ISSN 2179-1074.

- RINALDI, N. On the modeling of the transient thermal behavior of semiconductor devices. **Electron Devices, IEEE Transactions on**, v. 48, n. 12, p. 2796–2802, Dec 2001. ISSN 0018-9383.
- RIVERA, H. L.; GARCÍA-SOUTO, J. a.; SANZ, J. Measurements of mechanical vibrations at magnetic cores of power transformers with fiber-optic interferometric intrinsic sensor. **IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 6, n. 5, p. 788–797, 2000. ISSN 1077260X.
- RODRIGUEZ, E. F.; SANTISTEBAN, J. A. An improved control system for a split winding bearingless induction motor. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 8, p. 3401–3408, Aug 2011. ISSN 0278-0046.
- S., M. G.; HEGDE, V. Application of mems accelerometer for detection and diagnosis of multiple faults in the roller element bearings of three phase induction motor. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 1, p. 145–152, Jan 2016. ISSN 1530-437X.
- SATPATHI, D.; MOORE, J.; ENNIS, M. Design of a terfenol-D based fiber-optic current transducer. **IEEE Sensors Journal**, n. 5, p. 1057–1065, out. 2005. ISSN 1530-437X.
- SCHLENSOK, C. *et al.* Structure dynamic analysis of an induction machine depending on stator housing coupling. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 44, n. 3, p. 753–759, 2008. ISSN 0093-9994.
- SKUJA, L. Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 1-3, p. 16–48, Outubro 1998.
- SOUSA, K. de M. *et al.* Validation of thermal and electrical model for induction motors using fiber Bragg gratings. **Measurement**, Elsevier Ltd, v. 46, n. 6, p. 1781–1790, jul. 2013. ISSN 02632241.
- SOUSA, K. M. *et al.* Dynamic eccentricity induced in induction motor detected by optical fiber bragg grating strain sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 12, p. 4786–4792, June 2016. ISSN 1530-437X.
- SOUSA, K. M. *et al.* Determination of Temperature Dynamics and Mechanical and Stator Losses Relationships in a Three-Phase Induction Motor Using Fiber Bragg Grating Sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 10, p. 3054–3061, 2012.
- SOUSA, K. M. *et al.* Fiber bragg grating temperature sensors in a 6.5-mw generator exciter bridge and the development and simulation of its thermal model. **Sensors**, v. 14, n. 9, p. 16651–16663, 2014. ISSN 1424-8220.
- SOUSA, K. M. *et al.* Application of fiber bragg grating to determine the terfenol-d magnetostriction characteristics for sensor development. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 13, p. S11–S19, Nov 2014.
- STONE, G.; KAPLER, J. Stator winding monitoring. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 4, n. 5, p. 15–20, 1998. ISSN 10772618.
- TAYAMA, H. *et al.* 6.6kV XLPE submarine cable with optical fiber sensors to detect anchor damage and defacement of wire armor. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 4, p. 1718–1723, 1995. ISSN 08858977.

THEUNE, N. *et al.* Investigation of Stator Coil and Lead Temperatures on High Voltage inside Large Power Generators via use of Fiber Bragg Gratings. In: . [S.l.]: Proceedings of IEEE Sensors, 2002, 2002. p. 1603–1607. ISBN 0780374541.

THOMSON, W. T.; FENGER, M. Current signature analysis to detect induction motor faults. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 7, n. 4, p. 26–34, Jul 2001. ISSN 1077-2618.

TRACHI, Y. *et al.* Induction machines fault detection based on subspace spectral estimation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 63, n. 9, p. 5641–5651, Sept 2016. ISSN 0278-0046.

VERMA, S.; BALAN, A. Determination of radial-forces in relation to noise and vibration problems of squirrel-cage induction motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 9, n. 2, p. 404–412, jun. 1994. ISSN 08858969.

WANG, M.; VANDERMAAR, A. J.; SRIVASTAVA, K. D. Review of condition assessment of power transformers in service. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 18, n. 6, p. 12–25, Nov 2002. ISSN 0883-7554.

WANG, P. *et al.* Quasi-distributed temperature measurement for stator bars in large generator via use of Fiber Bragg Gratings. In: **6th International Forum on Strategic Technology (IFOST)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 810–813. ISBN 9781457703997.

WEI, B. *et al.* Online monitoring system for motor vibration using fiber bragg grating sensing technology. In: **Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–3.

WERNECK, M. M.; ALLIL, R. C. D. S. B.; RIBEIRO, B. a. Calibration and operation of a fibre bragg grating temperature sensing system in a grid-connected hydrogenerator. **IET Science, Measurement and Technology**, v. 7, n. May 2012, p. 59–68, 2013. ISSN 17518822.

WILLSCH, R.; ECKE, W.; BARTELT, H. Optical fiber grating sensor networks and their application in electric power facilities, aerospace and geotechnical engineering. In: . [S.l.]: Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002. Ofs 2002, 15th, 2002. p. 49–54 vol.1.

ZHU, W.; SUN, S.; QU, Z. Nonlinear vibration fault diagnosis of hydroelectric generator based on multi-scale wavelet. p. 426–430, Nov 2015.