

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA ELÉTRICA**

STEPHANI CATHERINE DE PAULA E SILVA LOPES

**MONITORAMENTO TÉRMICO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS
UTILIZANDO SENSORES EM FIBRA ÓTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

STEPHANI CATHERINE DE PAULA E SILVA LOPES

**MONITORAMENTO TÉRMICO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS
UTILIZANDO SENSORES EM FIBRA ÓTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Valmir de Oliveira

CURITIBA

2016

STEPHANI CATHERINE DE PAULA E SILVA LOPES

Monitoramento Térmico em Máquinas Elétricas Utilizando Sensores em Fibra Ótica

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 16 de Junho de 2016.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Valmir de Oliveira, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcio Aparecido Batista, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Valmir de Oliveira, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz Antônio e Rejane, a minha irmã Suéllen e ao meu namorado Matheus.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Valmir de Oliveira, pela dedicação e companheirismo durante todos os processos deste trabalho, assim como os ensinamentos passados durante a Iniciação Científica.

Agradeço a Prof. Dr. Ilda Abe por ter me dado a oportunidade de participar do programa de Iniciação Científica no Laboratório de Fotônica.

Agradeço a todos os professores e colegas do Grupo de Fotônica, em especial ao Leonardo e Kleiton pela ajuda com os experimentos.

Agradeço aos meus pais, por terem dedicado os últimos cinco anos para o crescimento profissional de sua filha, por terem acreditado no meu futuro e terem me auxiliado da melhor forma possível mesmo com poucas condições. Agradeço por estarem ao meu lado para encarar todos os momentos difíceis pelos quais passei.

Agradeço a minha irmã, pela paciência e empatia durante o desenvolvimento deste trabalho, e por ler os capítulos escritos de forma paciente e colaborativa.

Agradeço ao meu namorado Matheus, pelo apoio em todas as etapas da graduação, por acreditar no meu potencial, e principalmente por ter sido paciente em todo o processo deste trabalho, tanto por ter me ajudado a revisar e a desenvolver todas as páginas da melhor forma possível, quanto pelo apoio emocional diário.

RESUMO

LOPES, Stephani Catherine de Paula e Silva. **Monitoramento térmico de máquinas elétricas utilizando sensores em fibra ótica.** 2016. 49f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho tem como objetivo validar os sensores óticos baseados em redes de Bragg para o monitoramento de temperatura em máquinas elétricas (transformador e motor). O parâmetro temperatura é de grande importância em sistemas de manutenção preventiva, preditiva e corretiva das máquinas. Além de proporcionar uma manutenção correta, o monitoramento deste parâmetro pode evitar falhas em sistemas de produção e prejuízos econômicos. A validação do sensoriamento térmico utilizando sensores baseados em redes de Bragg é feito a partir de caracterizações e ensaios, com os sensores óticos expostos e com o objeto de encapsulamento. Para a caracterização, é feita a calibração do sensor utilizando sistemas de controle de temperatura, como o Peltier e estufa de secagem. A partir desses sistemas são observados os coeficientes de sensibilidade (resultado da análise da variação de comprimento de onda por aumento de temperatura) que serão utilizados para a determinação de temperatura dos pontos requeridos nas máquinas e que foram sensibilizados pelo sensor durante o ensaio. Para o ensaio com o transformador foram posicionados os sensores sobre o enrolamento, e para o motor entre as ranhuras do estator. Por fim, os sensores óticos sensíveis ao aquecimento das máquinas encontram uma diferença térmica, por terem sido posicionados e distanciados sobre o enrolamento do transformador e no estator do motor.

Palavras-chave: Sensor ótico. Redes de Bragg. Temperatura. Máquinas elétricas.

ABSTRACT

LOPES, Stephani Catherine de Paula e Silva. **Thermal Monitoring in Electric Machines**. 2016. 49f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2016.

This work aims to validate the optical sensors based on fiber Bragg gratings for temperature monitoring in electrical machines (transformer and motor). The temperature parameter is of great importance in preventive maintenance systems, predictive and corrective machines. In addition to providing proper maintenance, monitoring of this parameter can prevent failures in production and economic losses systems. Validation of thermal sensing using sensors based on Bragg gratings is made from and characterizations tests, the exposed optical sensors and the encapsulation object. For characterization, the sensor calibration is performed using temperature control systems such as Peltier and drying oven. From these systems are the sensitivity coefficients observed (analysis result of the change in wavelength due to increased temperature) which will be used for determining the temperature points required in machines that were sensitized by the sensor during the test. For the test with the transformer sensors were positioned on the winding, and the motor stator between the grooves. Finally, the optical sensors sensitive to the heating of the machine are a thermal difference, having been positioned and spaced on the transformer winding and the motor stator.

Keywords: Optical Sensor. Bragg Gratings. Temperature. Electric Machines.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Rede de Bragg uniformemente gravada em uma fibra ótica monomodo e os espectros de transmissão e reflexão para uma fonte óptica de banda larga..... | 17 |
| Figura 2 - Esquema da técnica de gravação de redes de Bragg pelo método direto utilizando uma máscara de fase | 19 |
| Figura 3 – Diagrama esquemático do sistema ótico experimental para a obtenção do espectro de reflexões das redes de Bragg em fibras através de um analisador de espectros óticos e um circulador..... | 20 |
| Figura 4 - Esquema de sensoriamento utilizando interrogador para gravação de redes FBG..... | 22 |
| Figura 5 – Curva de expectativa de vida..... | 26 |
| Figura 6 - Principais componentes de um motor de indução trifásico..... | 27 |
| Figura 7 - Sensibilidade térmica para o sensor FBG sem encapsulamento..... | 34 |
| Figura 8 - Sensibilidade térmica para o sensor FBG encapsulado com alumina..... | 34 |
| Figura 9 - Curva polinomial de segunda ordem da caracterização sem alumina do conjunto 2..... | 35 |
| Figura 10 - Curva polinomial de segunda ordem da caracterização com alumina do conjunto 2..... | 36 |
| Figura 11 - Variação de comprimento de onda do sensor 2 durante o ensaio com transformador..... | 39 |
| Figura 12 - Variação de comprimento de onda do sensor 1 durante o ensaio com o motor..... | 42 |
| Figura 13 - Variação de temperatura dos sensores durante o ensaio com o motor..... | 43 |

LISTA DE FOTOGRAFIAS

| | |
|---|----|
| Fotografia 1 - Esquema de gravação de redes de Bragg..... | 30 |
| Fotografia 2 - Gravação de rede de Bragg..... | 31 |
| Fotografia 3 - Análise das redes de Bragg refletidas ao OSA..... | 31 |
| Fotografia 4 - Sensor encapsulado posicionado no Peltier..... | 33 |
| Fotografia 5 - Conjunto 2 posicionado entre o enrolamento do transformador..... | 38 |
| Fotografia 6 - Conjunto 2 posicionado entre as ranhuras do estator..... | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Classes de isolamento..... | 24 |
| Tabela 2 - Comparativo do coeficiente de sensibilidade do primeiro conjunto..... | 37 |
| Tabela 3 - Comparativo do coeficiente de sensibilidade do segundo conjunto..... | 37 |
| Tabela 4 - Relação entre carga, variação de comprimento de onda e temperatura..... | 39 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | TEMA..... | 11 |
| 1.1.1 | Delimitação do tema | 12 |
| 1.2 | PROBLEMAS E PREMISSAS..... | 12 |
| 1.3 | OBJETIVOS..... | 13 |
| 1.3.1 | Objetivo geral..... | 13 |
| 1.3.2 | Objetivos específicos | 13 |
| 1.4 | JUSTIFICATIVAS..... | 13 |
| 1.5 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... | 14 |
| 1.6 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 15 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 16 |
| 2.1 | O SENSOR BASEADO EM REDE DE BRAGG..... | 16 |
| 2.1.1 | Rede de Bragg em Fibra Ótica..... | 16 |
| 2.1.2 | Sensor Térmico e Deformação | 17 |
| 2.1.3 | Método de Gravação..... | 18 |
| 2.1.4 | Monitoramento da Rede..... | 20 |
| 2.1.5 | Sensoriamento Utilizando FBG e Interrogador..... | 21 |
| 2.2 | O EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE AS MÁQUINAS ELÉTRICAS..... | 22 |
| 2.2.1 | Temperatura em Transformadores | 23 |
| 2.2.1.1 | Vida útil e temperatura | 24 |
| 2.2.2 | Temperatura em Motores..... | 27 |
| 2.2.2.1 | Métodos para a determinação de elevação de temperatura. | 28 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO | 30 |
| 3.1 | FABRICAÇÃO DOS SENSORES BASEADOS EM REDES DE BRAGG | 30 |
| 3.2 | CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES E ENCAPSULAMENTO. | 32 |
| 3.2.1 | Caracterização no Peltier..... | 32 |
| 3.2.2 | Caracterização na Estufa..... | 35 |
| 3.2.3 | Comparativos..... | 36 |
| 3.3 | ENSAIOS NAS MÁQUINAS ELÉTRICAS..... | 37 |
| 3.3.1 | Ensaio no Transformador..... | 37 |
| 3.3.2 | Ensaio no Motor | 40 |
| | REFERÊNCIAS | 46 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

A monitoração das máquinas elétricas é fundamental para a segurança dos sistemas industriais, entre as monitorações realizadas, o parâmetro temperatura tem grande importância, já que a maioria das falhas em equipamentos elétricos é precedida de uma elevação na temperatura de operação. Além da prevenção de falhas, um monitoramento confiável é uma excelente ferramenta para a gestão da manutenção, fornecendo informações úteis sobre a saúde da planta e permitindo a programação de paradas para manutenção.

Sistemas de medição de temperatura convencionais, quando aplicados nas máquinas elétricas podem apresentar limitações, devido à interferência eletromagnética e também a uma eventual dificuldade na monitoração da temperatura em locais de difícil acesso (dimensões do sensor convencional).

Os sensores óticos deste trabalho, utilizados para realizar a monitoração de temperatura em máquinas elétricas, são baseados em redes de Bragg em fibra ótica (FBG). A vantagem deste sensor é devida à sua imunidade à interferência eletromagnética, pequenas dimensões da fibra ótica (125 μm de diâmetro) fabricado em material dielétrico (sílica), possibilidade de sensoriamento multiplexado e quase-distribuído em uma mesma fibra, entre outras (HILL, 1978 apud OLIVEIRA, 2012, p.29). Desse modo, tais sensores óticos podem medir temperaturas em locais específicos das máquinas elétricas, provendo um mapeamento térmico detalhado, o qual pode comprovar experimentalmente, resultados teóricos obtidos de um modelo térmico, dispensando aproximações e simplificações.

As redes de Bragg em fibra ótica (FBG) possuem a característica de acoplar a luz incidente do modo propagante no núcleo para o modo contra-propagante. (HILL, 1978 apud OLIVEIRA, 2012, p.29). No sensoriamento com FBG, o parâmetro físico sob monitoração, provoca um desvio no comprimento de onda do espectro de reflexão da rede de Bragg (λ_B), proporcional à variação daquela grandeza física. A variação no λ_B é acompanhada por instrumentação apropriada, tal como o analisador de espectro ótico (OSA) ou interrogador ótico de FBG.

1.1.1 Delimitação do tema

As máquinas elétricas abordadas neste trabalho serão os motores e os transformadores de baixa potência. Tais máquinas necessitam de monitoração de temperatura entre outros parâmetros para prover uma confiabilidade adequada. A escolha dessas máquinas foi devido a sua grande aplicação industrial, comercial e também, no sistema elétrico como um todo. Como exemplo da aplicação dos motores, deve-se destacar o uso em elevadores, esteiras, moinhos, bombas, ventiladores e compressores. (SOUSA, 2006, p.16). A preocupação em relação à temperatura em transformadores está presente principalmente em subestações, onde o seu correto funcionamento é fundamental para o sistema, e a falha provoca um enorme prejuízo para a concessionária e os consumidores em geral. Por disponibilidade, nesse trabalho optou-se pela instrumentação em transformadores de baixa potência, para a validação do método.

Os sensores óticos apresentam uma inserção cada vez maior dentro dos sistemas de proteção e automação. Estão entre os melhores métodos para sensoriamento e atendem segmentos não cobertos por sensores convencionais. Sendo assim, o presente trabalho irá se concentrar em medições de temperatura em motores e transformadores.

1.2 PROBLEMAS E PREMISAS

O estudo que será abordado neste trabalho traz como tema a monitoração de temperatura em máquinas elétricas através dos sensores óticos baseados em redes de Bragg (FBG), assunto ainda relativamente pouco abordado. Deste modo, alguns problemas foram encontrados para realizar esta pesquisa, como:

- Referências que abordam a utilização do sensor ótico em máquinas.
- O encapsulamento dos sensores óticos para os motores.
- A falta de transformadores de grande porte com controle de carga para a realização dos ensaios. Dessa forma optou-se pelo uso de um transformador comercial.

A pesquisa se baseará no seguinte problema: **Os sensores óticos utilizando redes de Bragg possuem uma confiabilidade e estabilidade térmica adequada para o monitoramento em máquinas elétricas?**

A pesquisa pressupõe que estes sensores trarão resultados positivos para os monitoramentos térmicos propostos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Monitorar a temperatura de motores e transformadores através de sensores em fibra ótica utilizando redes de Bragg.

1.3.2 Objetivos específicos

- ✓ Pesquisar a literatura sobre motores, transformadores e sensores óticos baseados em redes de Bragg.
- ✓ Produzir os sensores por redes de Bragg em fibra ótica.
- ✓ Desenvolver o encapsulamento para o sensor ótico.
- ✓ Caracterizar os sensores.
- ✓ Instrumentar as máquinas elétricas.
- ✓ Realizar testes e ensaios.
- ✓ Analisar os resultados.

1.4 JUSTIFICATIVAS

O monitoramento térmico fornece informações importantes sobre a confiabilidade das máquinas elétricas e dos sistemas em que estão envolvidas. Considerando que estas possuem um papel essencial para a operação dos equipamentos industriais, esse monitoramento, poderá evitar grandes prejuízos. As falhas de máquinas elétricas geralmente ocorrem no início da operação (comissionamento) e ao final da sua vida útil. Dessa forma, pode-se contribuir na manutenção preditiva.

A utilização de sensores óticos com FBG, produzidos em uma mesma fibra, espaçados por alguns poucos milímetros, permite a obtenção de um mapa térmico da máquina, através de um procedimento razoavelmente mais simples em comparação com uso de sensores convencionais.

Os sensores óticos que serão utilizados para fazer esse monitoramento são uma ótima alternativa para o monitoramento térmico, além de suas características principais, como imunidade eletromagnética e estrutura dielétrica, ele possui a característica de ser instalado em locais específicos e de difícil acesso para os sensores térmicos convencionais, e possuem um sensoriamento remoto que permite longas distâncias. Estudos com a aplicação de sensores óticos para monitoramento térmico em máquinas já foram realizados. (FARIA; PARENTONI; MARTINEZ, 2012; SOUSA, 2011). O sensor, também, possui inúmeras aplicações na área da engenharia, como biomecânica, telecomunicações, ciência dos materiais, estruturas nano-métricas, entre outras.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O delineamento ou metodologia de pesquisa refere-se ao planejamento em sua dimensão mais ampla, envolvendo tanto a sua diagramação, quanto à previsão de análise. (GIL, 1991 apud BUCH; GRUNEWALDER, 2013, p.15). O caráter classificatório dessa pesquisa é de natureza bibliográfica e experimental. Desse modo, a pesquisa foi dividida em duas etapas:

A primeira etapa será destinada à pesquisa, onde serão analisadas teses, dissertações e artigos científicos, para produzir a base do trabalho e atestar a relevância do presente trabalho.

A segunda etapa é destinada ao desenvolvimento experimental. Este tipo de pesquisa, segundo Gil (2002, p.47), consiste essencialmente em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. Nesta etapa, será confeccionado o sensor e feita a sua caracterização, para então serem realizados ensaios em transformadores e motores para analisar a variação de temperatura em pontos específicos.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Cap. 1 – Introdução do trabalho, contendo tema, os problemas encontrados, objetivos, justificativa e procedimentos metodológicos.

Cap. 2 – Fundamentação teórica sobre o sensor e sua forma de construção, por exemplo, forma de gravação, método utilizado, análise espectral. E fundamentação teórica do funcionamento das máquinas elétricas contemplando a importância da temperatura em seu funcionamento.

Cap. 3 – Desenvolvimento contendo a gravação das redes, caracterização dos sensores, encapsulamento do sensor e instrumentação das máquinas elétricas.

Cap. 4 – Conclusão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O SENSOR BASEADO EM REDE DE BRAGG

Os sensores baseados em redes de Bragg em fibra ótica são uma alternativa eficiente para o monitoramento em lugares não acessíveis pelos sensores convencionais. Além de possuírem características que são limitantes para os sensores industriais padrões, o sensor ótico pode atuar em medições de temperaturas elevadas, em deformações e vibrações no sistema em qual está inserido.

A utilização do sensor FBG, além das inúmeras vantagens como compatibilidade eletromagnética, pequena dimensão e sinal codificado em comprimento de onda, apresenta um custo competitivo em aplicações específicas. A tecnologia para a fabricação da FBG é dominada pelo Brasil.

O tipo de fibra e a utilização de pré-tratamento podem otimizar o processo de produção. A hidrogenação, por exemplo, é uma forma eficiente para aumentar a fotossensibilidade da fibra ótica e obter uma maior estabilidade térmica. A utilização de uma fibra hidrogenada exigiria um menor tempo de exposição da fibra e utilização de potências menores do *laser* para a fabricação.

Ainda é possível multiplexar uma grande quantidade de sensores em comprimentos de onda durante a fabricação, dessa forma é possível instalar um único cabo de fibra ótica em um equipamento genérico e ter pontualmente a variação da grandeza medida, de forma que cada sensor não perturbe o desempenho dos outros. Para isso, se faz necessário o desenvolvimento de técnicas que produzam sensores adequados para cada aplicação, além de garantir sua estabilidade e qualidade.

2.1.1 Rede de Bragg em Fibra Ótica

A fotossensibilidade das fibras óticas permite a fabricação de redes de difração que são obtidas pela alteração permanente e periódica do índice de refração ao longo do núcleo. (SILVA, 2005, p.12). A FBG possui a capacidade de acoplar a luz incidente no núcleo da fibra, gerado pelo modo contra-propagante. Este sinal será refletido e formará um espectro de bandas estreitas com comprimento de onda central

da rede de Bragg (λ_B). O comprimento de onda central do espectro do sinal refletido ou transmitido, (λ_B), é dado pela equação 1.

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

Onde λ_B é o comprimento de onda de Bragg, n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo propagado e Λ é o período da rede.

A Figura 1 mostra a representação esquemática da FBG gravada no núcleo da fibra e os espectros dos sinais incidentes, refletido e transmitido pela FBG.

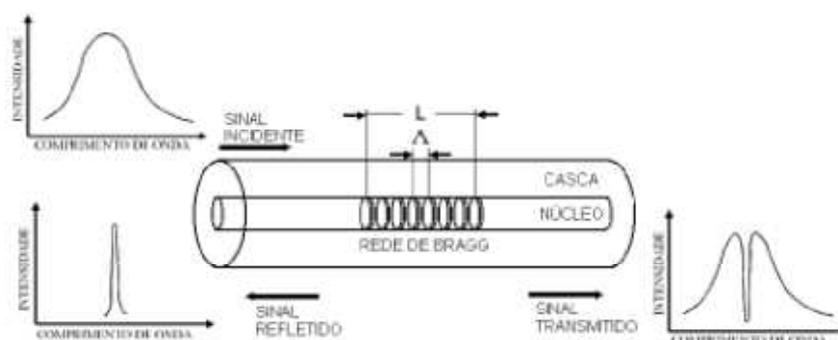


Figura 1 – Rede de Bragg uniformemente gravada em uma fibra óptica monomodo e os espectros de transmissão e reflexão para uma fonte óptica de banda larga.
Fonte: Abe (2004, p.16).

Segundo Silva (2005, p.28), a equação (1) indica que somente comprimentos de onda iguais ou muito próximos da ressonância de Bragg serão refletidos pela rede formada no núcleo da fibra; em caso contrário serão transmitidos.

2.1.2 Sensor Térmico e Deformação

O princípio da utilização da rede de Bragg como um sensor ótico é devido à variação do comprimento de onda do espectro refletido em função da variação de algum parâmetro do meio externo. Visto que o comprimento de onda de Bragg depende diretamente do período da rede (Λ), e do índice de refração efetivo (n_{eff}), uma perturbação que resulte na alteração de um desses parâmetro irá alterar o comprimento de onda de Bragg (λ_B) do espectro refletido.

Desse modo, qualquer perturbação que posso alterar o período da rede, ou o índice de refração efetivo, será uma fonte de sensibilização do sensor ótico. A deformação mecânica e mudança de temperatura, portanto, são os fatores principais para o deslocamento do espectro.

O deslocamento do comprimento de onda de Bragg é dado pela equação (2):

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

Onde o primeiro termo representa o efeito da tensão mecânica e o segundo termo representa o efeito da temperatura sobre a rede.

Devido ao fato da variação do comprimento de onda estar relacionado tanto a temperatura como a tensão mecânica, não se faz possível a discriminação da variação de temperatura e de tensão através do monitoramento com um único sensor. Segundo Oliveira (2012, p.32) a incapacidade da separação entre temperatura e deformação mecânica é chamada de sensibilidade cruzada, e esta pode ser considerada a maior desvantagem do sensor baseado em rede de Bragg.

Oliveira (2012) aponta que uma solução para a sensibilidade cruzada das FBGs pode ser alcançada por meio de interrogação em dois comprimentos de onda ou em dois diferentes modos óticos. Ainda ressalta que o simples uso de dois sensores próximos onde um é isolado do outro para uma perturbação indesejada pode separar os efeitos, porém este método não é aplicável em um sistema de medição onde uma invasão mínima seja necessária e um segundo sensor não seja aplicável.

Por isso durante a relação de medições de deformação, é importante manter a temperatura ambiente controlada, assim como em casos de medições de temperatura, não se deve expor o sensor ótico a esforços mecânicos.

2.1.3 Método de Gravação

A rede de Bragg em fibra ótica pode ser produzida por dois métodos preferencialmente, a interferométrica, e o método direto por máscara de fase. Para efeito de estudo deste trabalho irá ser utilizado o método direto por máscara de fase,

este método consiste basicamente na utilização de uma máscara de fase como elemento ótico difrator. A máscara de fase é obtida pela produção de depressões periódicas em uma das superfícies da placa de sílica fundida, sendo o período denominado por Λ_{PM} . (Oliveira, 2012, p.37).

Neste processo a máscara de fase se encontra entre o *laser* de raio UV e muito próximo à fibra ótica, ao incidir um feixe de luz sobre a máscara de fase, está radiação é difratada e dividida na ordem de $m=-1$ a $m=+1$, o qual atinge a fibra ótica e produz a rede de Bragg. Na Figura 2 esta a representação esquemática para a montagem: fibra ótica e máscara de fase iluminada através do feixe UV.

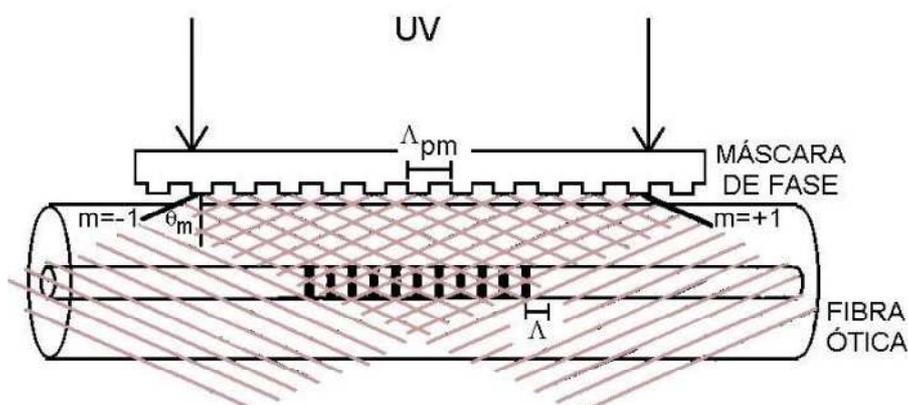


Figura 2 – Esquema da técnica de gravação de redes de Bragg pelo método direto utilizando uma máscara de fase. Fonte: Abe (2004, p.11)

O período da rede de Bragg é relacionado, portanto, ao período da máscara de fase. Esta característica faz com que não se permita construir várias redes em único cabo de fibra ótica utilizando a mesma máscara de fase. A equação (3) apresenta a dependência entre o período da FBG (Λ) e o período da máscara de (Λ_{PM}).

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\theta_m}{2}\right)} = \frac{\Lambda_{PM}}{2} \quad (3)$$

Onde Λ_{PM} é o período da máscara de fase.

A vantagem da utilização desse sistema é a facilidade do alinhamento, e de se posicionar a máscara de fase tão próxima ao cabo de fibra ótica, podendo reproduzir rapidamente a FBG. Outra vantagem é o período da rede de Bragg

dependem apenas do período da máscara de fase, não dependendo do comprimento de onda incidente do *laser*.

2.1.4 Monitoramento da Rede

A forma mais simples para o acompanhamento do espectro de rede é através de um interrogador de FBG, ou seja, um equipamento que faz a leitura do espectro de reflexão de rede de Bragg diretamente. Porém existe outro método, geralmente utilizado em laboratório, que consiste em um analisador de espectro ótico (OSA). Para isso, se faz necessário a configuração de um sistema formado pelos seguintes componentes: fonte ótica, circulador, FBG e analisador de espectros óticos (figura 3). Neste sistema a fonte ótica que incide pela porta 1 do circulador é desviada para a porta 2 onde se encontra a FBG, esta luz então é refletida pela rede e retorna pela mesma porta, sendo desviada para a porta 3 do circulador, onde está situado o analisador de espectros.

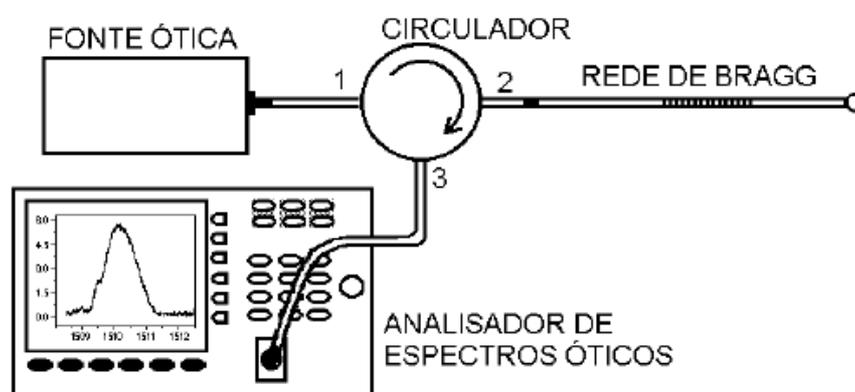


Figura 3 – Diagrama esquemático do sistema ótico experimental para a obtenção do espectro de reflexões das redes de Bragg em fibras através de um analisador de espectros óticos e um circulador. Fonte: Abe (2004, p.20)

A análise do espectro da rede é acompanhada em tempo real, sendo permitido variar e determinar alguns parâmetros durante a gravação, de forma a obter as características desejadas do filtro espectral que se está gravando, como as características da fonte de laser (energia, frequência), tempo de exposição, entre outras.

Para a construção dos gráficos e para as comparações das medidas que serão realizadas, utiliza-se o *software* Origin, o qual é possível obter os espectros gerados pelo OSA, e ser feito o estudo da viabilidade do sensor.

2.1.5 Sensoriamento Utilizando FBG e Interrogador.

Monitorar a gravação da rede de Bragg através do interrogador ótico é a maneira mais simples e compacta comparada ao item 2.4. O interrogador ótico dispensa uma estrutura com vários equipamentos que ocupam um grande espaço, como o uso do OSA e de uma fonte ótica. Apenas com o interrogador e um *notebook* é possível analisar espectralmente o crescimento da rede e monitorar os parâmetros do *laser* (potência, frequência, entre outros).

No Laboratório de Fotônica da UTFPR, o interrogador geralmente utilizado é o SM-125. Este equipamento tem como diferencial em seu projeto a união do *laser* sintonizável e do foto detector compactando o espaço utilizado. (MEZZANDRI, 2012, p.29).

Segundo Oliveira (2011) apud Mezzandri (2012, p.27), algumas características quanto ao interrogador são definidas.

- O SM-125 possui rotina automática interna de ajuste em relação ao comprimento de onda de referência que é acionada toda vez que o equipamento realiza uma varredura num determinado espectro.
- Equipamento composto e robusto, podendo ser usado em ambientes severos, como no caso da indústria petrolífera, metalúrgica, ferroviárias, dentre outras.
- Possui elevada capacidade de multiplexação de sensores, permitindo fazer um escaneamento completo do espectro numa faixa de 1510nm a 1590nm.
- Acompanha um *software* que realiza as principais funções de interrogação com detecção contínua de picos, análise espectral, dentre outras.
 - Varre uma faixa dinâmica de até 50dB com uma frequência de escaneamento de 2Hz para uma resolução de 0,001nm a 1pm.

A figura 4 demonstra um exemplo de sistema composto por laser, espelhos, máscara de fase, interrogador e *notebook*, para a fabricação de redes FBG.

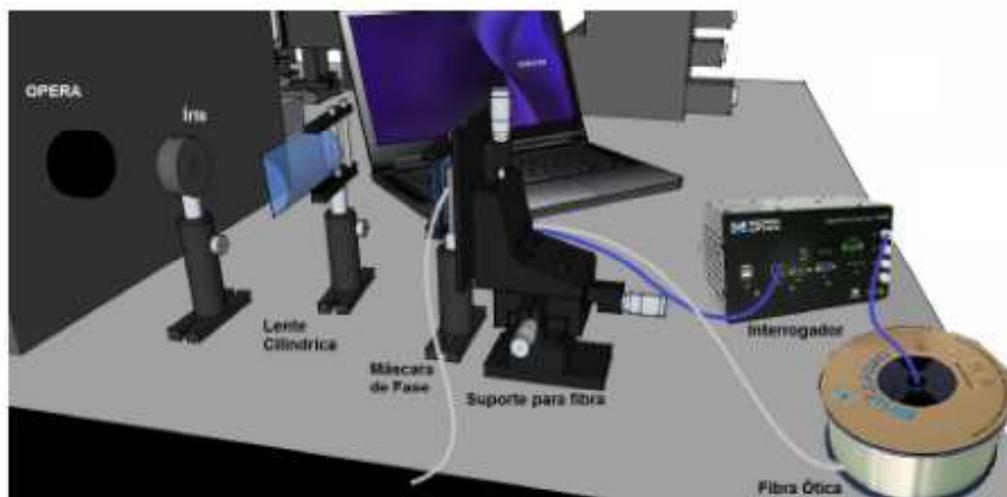


Figura 4 – Esquema de sensoriamento utilizando interrogador para a gravação de redes FBG. Fonte: COSTA (2014, p.41)

2.2 O EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE AS MÁQUINAS ELÉTRICAS

Falhas em componentes pertencentes às máquinas elétricas reduzem a disponibilidade destas no sistema. Como resultado da falta de monitoração sobre as partes, o equipamento estará sujeito a ocorrência de uma falha, interrompendo a operação do sistema em que a máquina elétrica está inserida. Paradas não programadas de máquinas elétricas (motores e transformadores) podem ser resultantes disto.

Em indústrias de alimentos, automobilística, gás e petróleo, paradas na produção, que não sejam programadas, podem significar centenas de milhares de dólares perdidos a cada dia. A necessidade de um acompanhamento periódico sobre a máquina elétrica, portanto, é essencial para o desenvolvimento correto e a continuidade do sistema de produção. Minimizando o tempo que as máquinas de produção e outros equipamentos críticos ficam parados, aumenta-se a receita de produção, a confiabilidade do sistema e se reduz custos de operação e manutenção (NI, 2012 apud SANTOS, 2013, p.16).

Segundo Santos (2013, p.16) o conceito de manutenção pode ser dividido em três categorias: a corretiva, a preventiva e a preditiva. A primeira é destinada a manutenção quando a falha já ocorreu, ou quando foi constatado um desempenho abaixo do esperado. A segunda tem como o objetivo reduzir o evento falha, podendo obedecer a intervenções pré- definidas. Por fim, a preditiva, está tem como intuito a

busca de dados para uma análise técnica que possa diagnosticar a necessidade de uma intervenção em um momento oportuno.

Tendo em vista, que a maioria das falhas em máquinas elétricas é manifestada em forma de sobreaquecimento ou de vibrações, realizar um monitoramento térmico é uma alternativa eficiente de se realizar uma manutenção preventiva. Contudo, o assunto referente à manutenção é mais extenso, pois incluem áreas de planejamento, organização, confiabilidade, qualidade, engenharia de manutenção, práticas básicas (5S, TPM, Multiespecialização). (SANTOS, 2013, p.21). Este trabalho irá tratar apenas do monitoramento térmico através de sensores em fibra ótica, bastando apenas analisar o seu comportamento, de forma a validar o sensor para este tipo de acompanhamento.

2.2.1 Temperatura em Transformadores

Transformadores de potência são equipamentos essenciais na transmissão e distribuição de energia elétrica, estando amplamente integrados em usinas, subestações e indústrias. (BECHARA, 2010, p.7). Estes transformadores alteram os níveis de tensão interligando sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica.

Os transformadores mais usuais nas indústrias são os transformadores a óleo e os transformadores a seco. A partir da década de 90, os transformadores a óleo vêm sendo substituídos por transformadores a seco ventilados, em várias instalações industriais e comerciais. (FINOCCHI, 2010, p.27). A vantagem do transformador a seco é a possibilidade de alocá-lo em qualquer lugar, devido ao fato de não possuir fluido como material isolante e de refrigeração, não há risco de explosão. Outra vantagem é ele possuir uma área de ocupação de 45% de um transformador a óleo. O transformador a seco possui uma vida útil superior a de um transformador convencional, contudo, sem ultrapassar a temperatura máxima do isolamento. E ainda pode suportar sobrecargas quando submetidos à temperatura ambiente igual ou inferior a 40°C.

2.2.1.1 Vida útil e temperatura

Segundo Finocchio (2010, p.22), um fator determinante no tempo de vida útil de um equipamento é o tipo de material isolante, e este pode sofrer inúmeras influências externas, como o tipo de instalação, umidade, temperatura e atmosfera agressiva. Devido ao fato de essas influências variarem para cada tipo de instalação, estimar a vida útil baseada em apenas um fator é inviável. Porém, têm-se conhecimento que a temperatura, o isolamento e vida útil do transformador, são fatores que tem um forte relacionamento.

Dessa forma, é necessário conhecer a isolação do transformador que será utilizado, para então determinar a temperatura máxima suportável para cada material isolante.

Tabela 1 – Classes de isolamento.

| Classe de isolamento | Tipo de isolante | Temperatura final [°C] Característica** |
|----------------------|---|--|
| Y* | *Materiais fibrosos a base de celulose ou seda, não imersos em líquidos isolantes. | 90 |
| A* | *Materiais fibrosos a base de celulose ou seda impregnadas com líquidos isolantes. | 105 |
| E* | *Fibras orgânicas sintéticas e outros. | 120 |
| B | Materiais a base de poliéster e poliimídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados com estes. | 130 |
| F | Materiais à base de mica, amianto e fibra de vidro aglutinado com materiais sintéticos, usualmente silicones, poliésteres ou epóxi. | 155 |
| H | Materiais à base de mica, asbesto ou fibra de vidro aglutinada tipicamente com silicones de alta estabilidade térmica. | 180 |
| C | Mica, vidro, cerâmica e quartzo sem aglutinante. | >180 |

* Estes tipos de materiais não são de uso corrente;

** Como temperatura característica entende-se o limite absoluto superior de temperatura na qual a isolação pode desempenhar por um período suficientemente longo sua função essencial.

Fonte: NBR-7094 apud Finocchio (2010, p.24)

A Tabela 1 mostra as diversas classes de isolamento de materiais utilizados em transformadores. Apresenta as características físicas e a temperatura máxima em operação nominal suportada pelos respectivos materiais. Os valores

encontrados na Tabela 1 são os valores médios da temperatura final, estes não representam as temperaturas reais nos pontos quentes (“hot spot”) dos enrolamentos do transformador. Por norma, há um acréscimo de 5° a 10°C no “hot spot”.

O aumento da temperatura sobre o isolamento pode comprometer as estruturas e o poder de isolamento. Finocchio (2010, p.26) afirma que o aumento entre 7° a 10° da temperatura nominal da isolação pode reduzir a vida útil do transformador a metade. Dessa forma, é primordial monitorar a variação de temperatura em pontos chaves do transformador. Neste caso, o ponto mais sensível do transformador quanto à temperatura é o seu enrolamento.

A deterioração do transformador em função do tempo e da temperatura é determinada pela equação de Arrhenius (4), segundo a NBR 5416.

$$\text{Log Vida (horas)} = A + B/T \quad (4)$$

Onde:

T = temperatura em Kelvin ($\theta_e + 273$)

Temperatura θ_e = temperatura do ponto mais quente do enrolamento em °C.

A e B = constantes da curva de expectativa de vida.

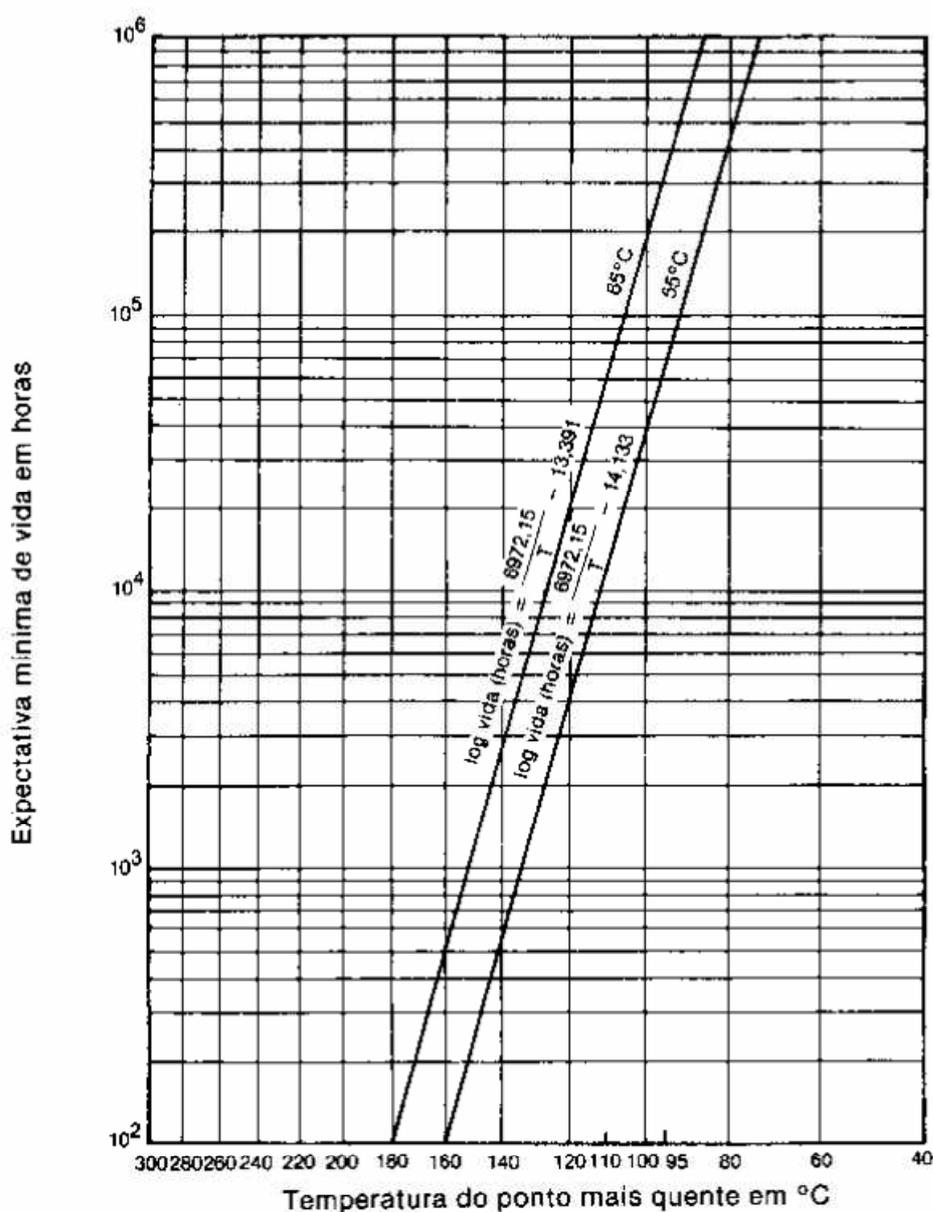


Figura 5 – Curva de expectativa de vida. Fonte: NBR 5416 (1997, p.2)

A figura 5 representa a curva de expectativa de vida do transformador, em função da temperatura no ponto mais quente dos enrolamentos. A curva demonstra que quanto maior for a temperatura menor será sua expectativa em horas.

Ao aplicar o sensor FBG para as medições de temperatura nos enrolamentos do transformador, para determinar os pontos quentes de forma precisa, o sensor FBG propõem soluções rápidas comparadas aos sensores comerciais, como dimensões dos sensores, incompatibilidade eletromagnética e aproximações e simplificações do modelo térmico. Ao utilizar os sensores propostos neste trabalho, será possível instalar o sensor diretamente inserido nos

enrolamentos, permitindo mensurar com maior precisão a temperatura nos pontos quentes dos transformadores.

2.2.2 Temperatura em Motores

O motor mais utilizado na indústria é o motor de indução trifásico, por possuir robustez em ambientes agressivos e baixo custo, este se torna indispensável para os processos industriais. Dos tipos de motores existentes, o motor de indução com rotor em gaiola de esquilo representa 97% do total de motores comercializados no Brasil (VENERO; HIYODO, 2008 apud SOUZA, 2011, p.16).

A figura 6 representa as partes constituintes de um motor de indução trifásico.

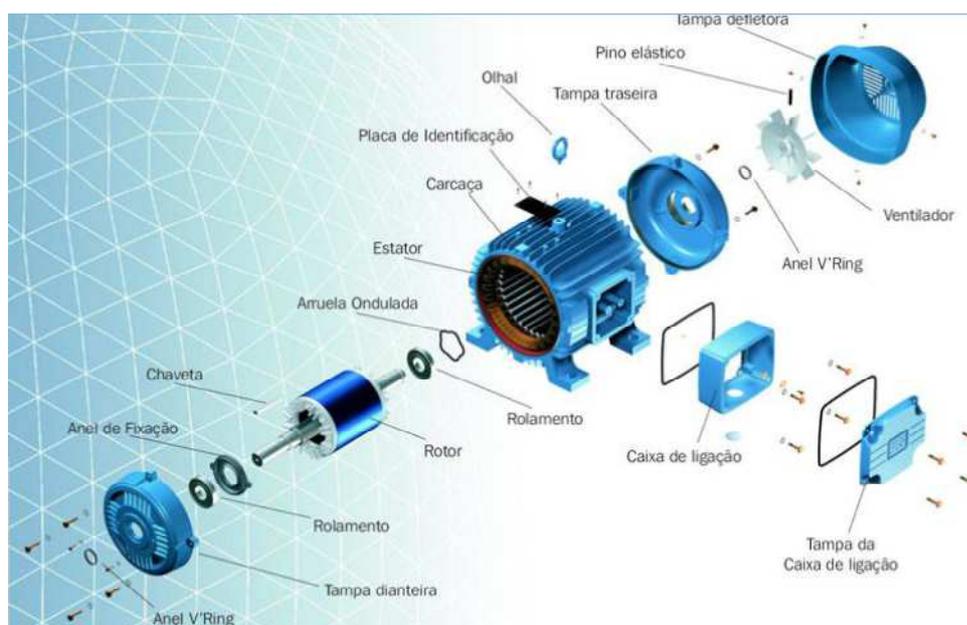


Figura 6 – Principais componentes de um motor de indução trifásico. (Fonte: WEG, 2013 apud DIAS, 2013, p.23).

O motor de indução trifásico é alimentado por um sistema de três fios, onde as tensões entre fases são defasadas em 120° . O desequilíbrio de tensão é uma adversidade rotineira e preocupante, caracterizada pela variação desigual em amplitude e/ou fases das tensões trifásicas. (LOPES et al., 2013). O motor que não opera nas suas características nominais, desgasta seus componentes e provoca falhas derivadas destas situações. 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, p.17)

O prognóstico antecipado de falha é muito importante para garantir condições operacionais seguras, uma manutenção programada, minimizar os custos operacionais e aumentar a confiabilidade da operação. (REIS, 2010, p.01).

A sobrecarga causa deterioração nos diversos componentes da máquina de indução trifásica, o isolamento, o núcleo e os rolamentos, destacando-se como uma das principais causadoras de falhas nos motores (Bonnett, 1992 apud Lopes *et al*, 2013). Monitorar a elevação de temperatura pode revelar se o motor está operando em condições anormais do seu funcionamento, e neste caso, será possível interromper o processo, para fazer a manutenção correta do equipamento.

O aquecimento das bobinas do estator além do limite previsto na fabricação provoca uma redução da vida útil do motor, sendo que uma elevação de 10°C na temperatura de um motor reduz a sua vida útil pela metade. (DIAS, 2013, p.23).

As perdas que ocorrem nos motores são devidas as perdas no estator e no rotor, e estas estão associadas com a elevação da temperatura, que altera as resistências elétricas, tornando o modelo elétrico suscetível ao evento temperatura. Observa-se com isto que os dois modelos são dependentes um do outro, o modelo elétrico irá fornecer ao modelo térmico as potências dissipadas no estator e no rotor da máquina e o modelo térmico fará a correção no valor das resistências a partir da elevação de temperatura. (SOUZA, 2011, p.24).

2.2.2.1 Métodos para a determinação de elevação de temperatura.

Segundo a NBR-17094-1 (Máquinas elétricas girantes- Motores de indução trifásico), há quatro métodos para a determinação de elevação de temperatura:

- Método da variação de resistências;
- Método dos detectores de temperatura embutidos (DTE);
- Método termométrico;
- Método de supervisão.

Através do método da variação da resistência, a elevação de temperatura é determinada a partir de ensaios que medem a elevação da resistência dos enrolamentos.

O método dos detectores de temperatura embutidos é realizado através de sensores (termopares, termistores de coeficiente de temperatura negativo ou positivo – NTC OU PTC, entre outros) embutidos no motor durante a fabricação, geralmente estes pontos são inacessíveis depois da montagem do motor.

O método termométrico é determinado por meio de termômetros aplicados a superfície do motor, este possui restrições devido ao campo magnético intenso durante o funcionamento do motor de indução.

No método de supervisão a elevação de temperatura dos enrolamentos é determinada pelas medidas de resistência, realizadas sem interrupção de corrente alternada de carga, e superpondo uma corrente contínua (CC) de medição, de fraca intensidade.

Para o sensor FBG que será utilizado, o “Método de detectores de temperatura embutidos” é o que melhor corresponde para a determinação da temperatura. Neste método ainda é definido por norma que para a realização das medições, é necessário obter sensores distribuídos ao longo dos enrolamentos do motor, sendo que o número mínimo de sensores instalados não deve ser menor do que seis. Sendo que por norma os detectores devem estar alocados nos pontos mais quentes do motor protegido de um contato com o fluido refrigerante primário, e que o ponto mais quente encontrado deve ser determinado como a temperatura do enrolamento.

Visto as características que devem ser atendidas para as medições de temperatura no método escolhido, o sensor baseado em rede de Bragg é eficiente, pois possui a característica de acoplar inúmeros sensores em uma única fibra ótica, sem que interfiram nas medições de cada sensor, também possui dimensões inferiores aos sensores convencionais utilizados (termopares e termistores), além disso a fibra ótica é imune ao campo magnético produzido pela máquina.

A utilização dos sensores FBG para medições de temperatura em máquinas já foram utilizadas, Souza (2011) propôs um modelo térmico baseado em medições de temperatura com sensores baseados em rede de Bragg, em seu modelo foi proposto a análise das variações de temperatura no estator, para poder associar as elevações de temperatura com as alterações de funcionamento da máquina.

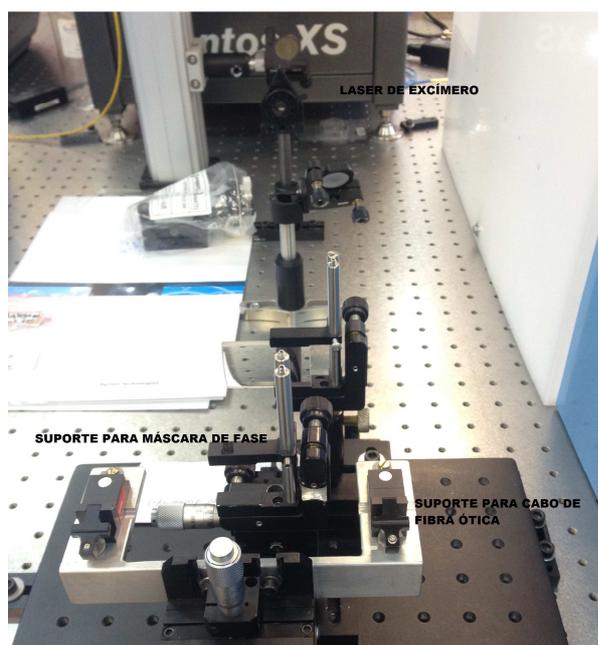
3 DESENVOLVIMENTO

3.1 FABRICAÇÃO DOS SENSORES BASEADOS EM REDES DE BRAGG

A fabricação dos sensores foi realizada no Laboratório de Fotônica (FOTON) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Para a gravação das redes foram utilizadas fibras padrão de telecomunicações - G-652 não hidrogenada. A gravação foi feita através de um laser pulsado de excímero ArF (Argônio- Flúor) operando em 193 nm, durante a gravação foi possível ajustar a frequência e energia do *laser*. Foi adotado para todas as redes gravadas, energia de 2,00 mJ/pulso e frequência de 300 Hz. As redes foram gravadas em um ambiente com temperatura controlada de 20 °C.

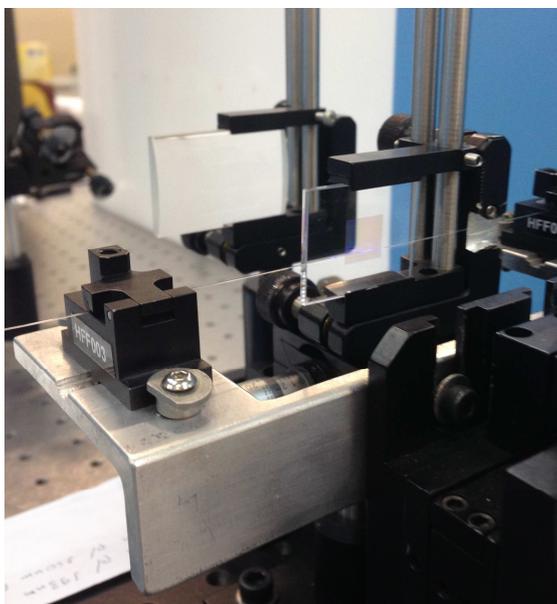
Foram produzidos dois conjuntos de sensores. No primeiro conjunto foi gravado um único sensor com máscara de fase de $\lambda_{PH} = 1055,20 \text{ nm}$. No segundo grupo foram gravados três sensores com três máscaras de fase distintas com comprimentos de onda de $\lambda_{PH} = 1055,20 \text{ nm}$, $\lambda_{PH} = 1058,90 \text{ nm}$, $\lambda_{PH} = 1073,50 \text{ nm}$.

A Figura (1) é uma fotografia que mostra o esquema para a gravação das redes de Bragg, que se constitui de um *laser* de excímero, espelhos de reflexão, lentes, suporte para máscara de fase e por fim o suporte para a fibra ótica.



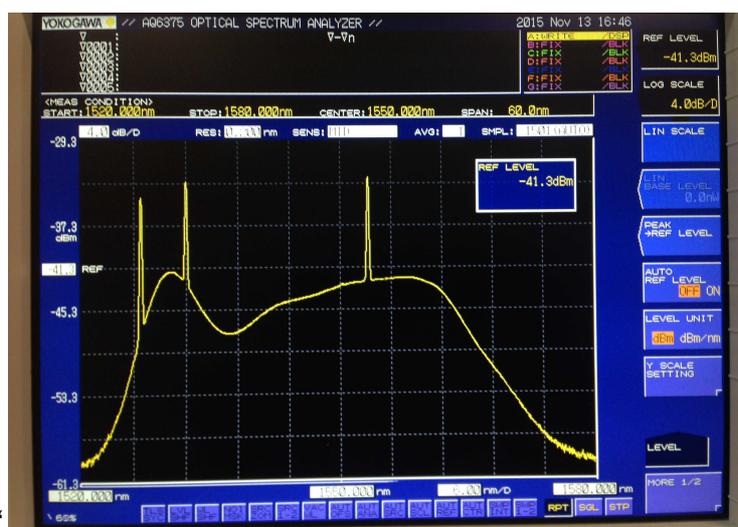
Fotografia 1 – Esquema de gravação de redes de Bragg. (Fonte: o autor).

A Figura (2) mostra em detalhe a fibra ótica posicionada próxima à máscara de fase durante o processo de gravação.



Fotografia 2 – Gravação da rede de Bragg. (Fonte: o autor).

A figura 3 mostra um exemplo do conjunto 2, fibra contendo três sensores, onde são vistos três espectros, correspondentes às três redes multiplexadas em uma única fibra ótica, monitorados através de analisador de espectro ótico (OSA).



Fotografia 3 – Análise das redes de Bragg refletidas ao OSA. (Fonte: o autor).

Após a gravação das redes de Bragg, estas foram conectadas em “pigtail”, cabos conectores, que serão conectados ao circulador ótico ou interrogador ótico para a caracterização das redes e ensaios.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES E ENCAPSULAMENTO

A sensibilidade do sensor ótico conforme a alteração da temperatura é analisada espectralmente pela variação do comprimento de onda do sensor ($\Delta\lambda$), a partir destes dados pode-se obter parâmetros de um sobreaquecimento da máquina e eventualmente evitar situações corretivas.

Para isto, é necessário fazer a calibração do sensor para o parâmetro requerido. Esta calibração consiste em aplicar parâmetros físicos em que o sensor será suscetível, e a partir disto, será feita a análise dos dados e consecutivamente calculado um coeficiente de sensibilidade do sensor FBG. Este coeficiente será utilizado no futuro para a determinação, neste caso, da temperatura nos ensaios das máquinas elétricas.

Para este trabalho, foram gravados conjuntos com cabos de fibra com um único sensor ótico e conjuntos com três sensores óticos. Dessa forma, será necessária a caracterização dos dois conjuntos e ainda, devido a ensaios no motor, a caracterização com o material utilizado para o encapsulamento.

Por fim, todas as caracterizações foram realizadas no Laboratório de Fotônica da UTFPR (FOTON), com temperatura ambiente controlada em 20°C.

3.2.1 Caracterização no Peltier

A caracterização do conjunto com rede única foi realizado a partir de um sistema composto por um controlador de temperatura baseado em um termoelemento Peltier.

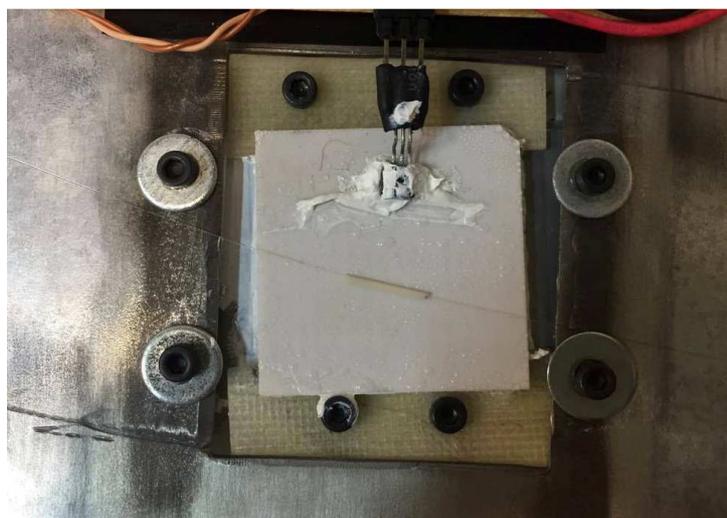
A caracterização foi realizada em dois dias, onde o primeiro foi destinado à caracterização sem a alumina (elemento utilizado para o encapsulamento) e o segundo dia foi utilizado para a caracterização com a alumina.

A escolha da alumina foi devido a sua resistência e dureza, e principalmente por possuir baixa retenção de calor, fazendo com que haja uma ótima condutibilidade térmica, resultando a uma diferença de sensibilidade mínima do sensor encapsulado, a um sensor sem o encapsulamento. Além disso, a sua pequena dimensão é suficiente para ser posicionado entre as ranhuras do estator e ao mesmo tempo comportar a fibra ótica. A alumina utilizada é do fabricante Frialit

Degussit, fabricada em Óxido de Alumínio (Al_2O_3), possui diâmetro interno de 0,5mm e externo 1,0 mm (tipo 121-11100) e temperatura máxima de operação de 1950°C.

Os equipamentos utilizados para a caracterização, portanto foram: Controlador de temperatura – TED 200; Peltier; Cabo com sensor FBG; Interrogador ótico – SM125; Notebook; Tubo de alumina.

A imagem abaixo, Figura 4, representa o sistema montado para a caracterização do sensor no Peltier.



Fotografia 4 – Sensor encapsulado posicionado no Peltier. (Fonte: o autor).

A elevação da temperatura no Peltier para as duas situações (com e sem encapsulamento) foi de 0°C à 70°C, utilizando um intervalo de 10°C de uma medição para a outra. Os dados foram tratados no *software* Origin e foram observados os picos de comprimento de onda para cada temperatura. Após, foi gerada a curva de comprimento de onda por temperatura, que foi aproximada a uma função polinomial de segunda ordem, da qual foi obtido o coeficiente de sensibilidade.

A Figura 7 abaixo representa a curva de sensibilidade do sensor sem o encapsulamento, resultando a uma sensibilidade térmica de 11,33 pm/°C obtida por ajuste polinomial de segunda ordem.

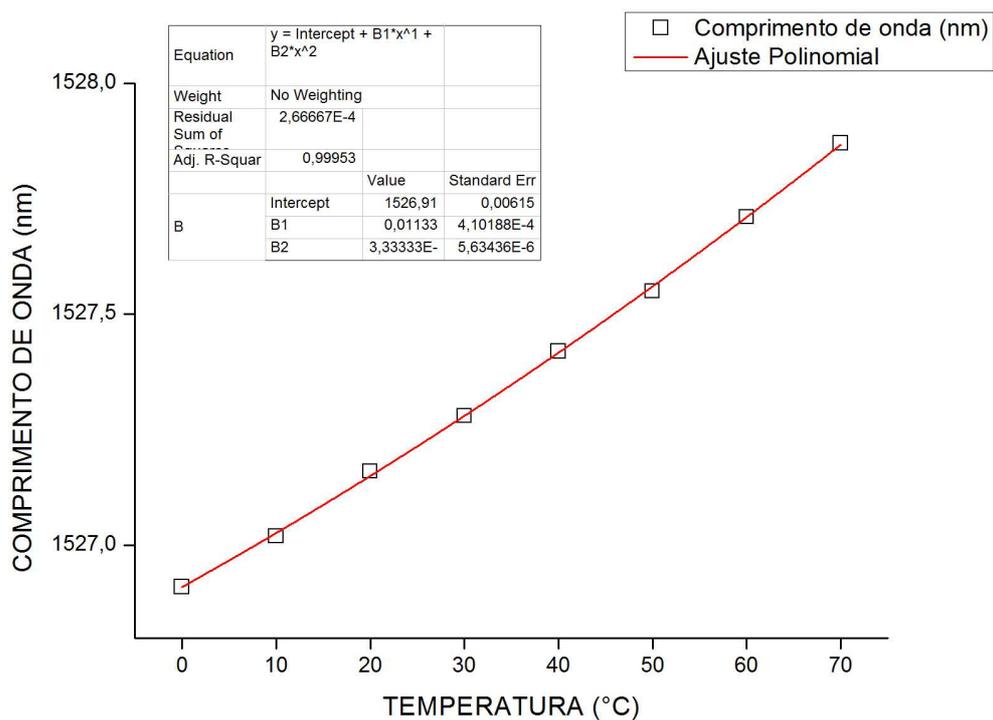


Figura 7 – Sensibilidade térmica para o sensor FBG sem encapsulamento. (Fonte: o autor).

Enquanto que para o sensor com encapsulamento, a sensibilidade encontrada foi de 11,56 pm/°C, representada na Figura 8.

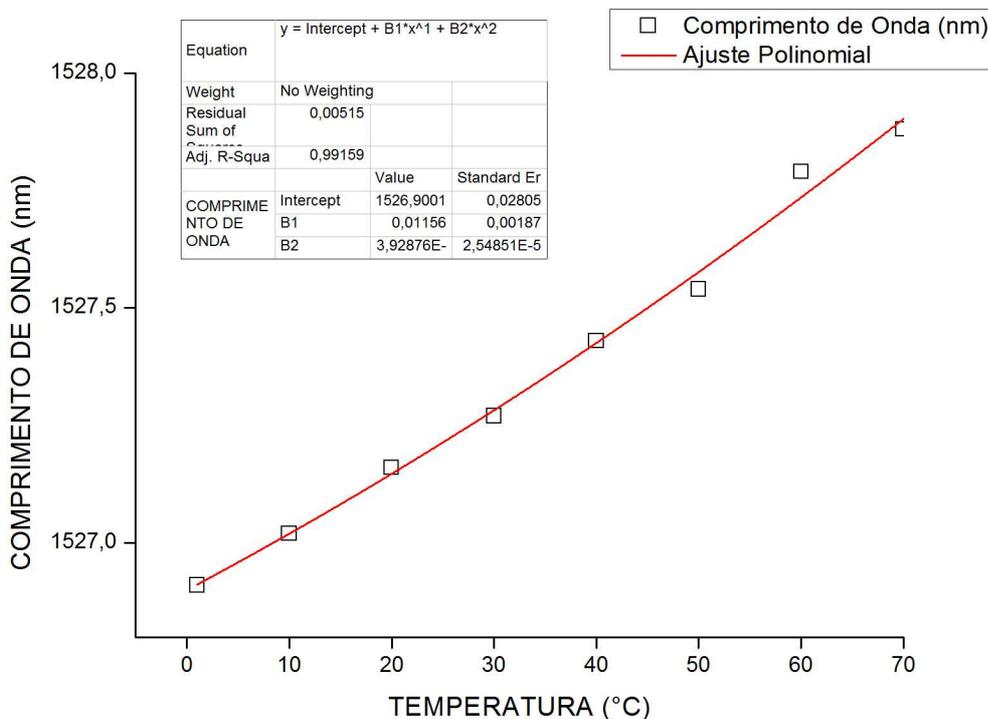


Figura 8 – Sensibilidade térmica para o sensor FBG encapsulado com alumina. (Fonte: o autor).

3.2.2 Caracterização na Estufa

A caracterização do conjunto 2, obtendo três sensores FBG, foi feita em um sistema com temperatura controlada por uma estufa de secagem, que foi utilizado para a caracterização com e sem a alumina. O objetivo deste sistema de medição foi comportar os três sensores em uma mesma temperatura para obter os coeficientes de sensibilidade.

Para este sistema de caracterização foi utilizado: Estufa de Secagem; Interrogador Ótico SM-125; *Notebook*; Cabo de fibra com três sensores; Tubo de Alumina.

A caracterização para os dois casos foi dada a partir de uma variação térmica de 24°C até 115°C, com intervalos de 10°C entre medições. Como para o sistema do Peltier, os dados foram tratados no *software* Origin, contudo, foi necessário avaliar cada sensor separadamente para obter o seu respectivo coeficiente de sensibilidade.

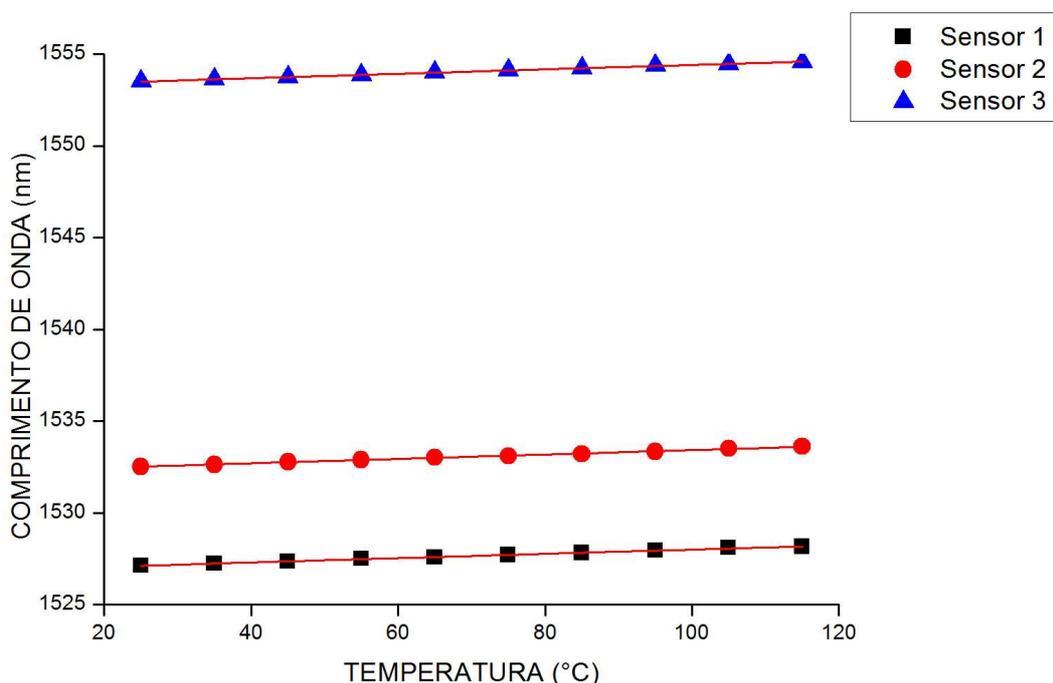


Figura 9 – Curva polinomial de segunda ordem da caracterização sem alumina do conjunto 2. (Fonte: o autor).

A Figura 9 representa as curvas de sensibilidade do sensor 1, sensor 2 sensor 3 e seus respectivos coeficientes de sensibilidade, 12,4 pm/°C, 11,9 pm/°C,

12,53 pm/°C sem a alumina. A Figura 10 representa as curvas com o encapsulamento.

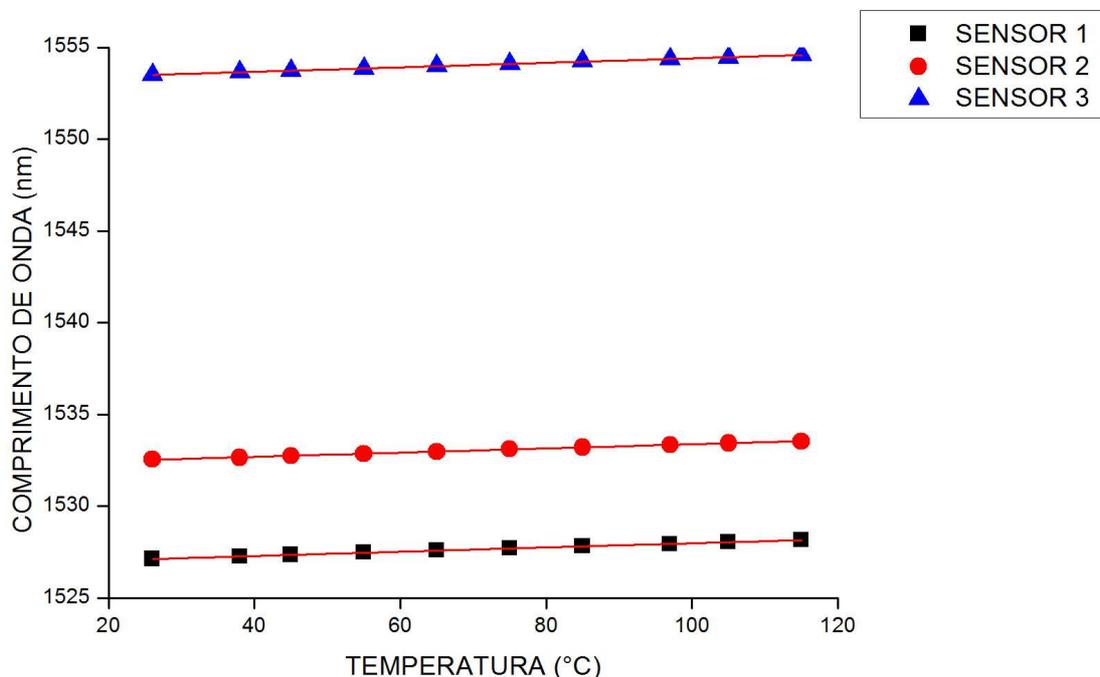


Figura 10 – Curva polinomial de segunda ordem da caracterização com alumina do conjunto 2. (Fonte: o autor).

As curvas de sensibilidade do sensor 1, sensor 2 sensor 3 e seus respectivos coeficientes de sensibilidade para o sensor com encapsulamento são 13,53 pm/°C, 11,23 pm/°C, 12,46 pm/°C

3.2.3 Comparativos

A caracterização dos sensores óticos permitiu a verificação dos comprimentos de onda a partir de uma variação térmica, que possibilitou obter gráficos para a análise dos picos de comprimento de onda para cada temperatura. A análise destes dados, por fim permitiu com que se obtivesse uma aproximação de uma curva linear, que resultasse na sensibilidade ótica. Como foi visto, foram feitos estes procedimentos para os dois conjuntos, em duas situações: com e sem o encapsulamento.

O encapsulamento da fibra faz com que se minimize o efeito cruzado dos sensores óticos, e ao utilizar a alumina para os ensaios no motor, faz com que o

sensor fique mais protegido das deformações mecânicas que ela estará suscetível, evitando assim erros de leitura da FBG.

O comparativo dos dados de sensibilidade está na Tabela 2, para o primeiro conjunto e na Tabela 3 para o segundo conjunto.

Tabela 2 – Comparativo do coeficiente de sensibilidade do primeiro conjunto.

| Dados | Sensor 1 |
|-----------------------------------|----------|
| Comprimento de Onda [nm] | 1527,11 |
| Sensibilidade sem alumina [pm/°C] | 11,33 |
| Sensibilidade com alumina [pm/°C] | 11,56 |

Tabela 3 – Comparativo do coeficiente de sensibilidade do segundo conjunto.

| Dados | Sensor 1 | Sensor 2 | Sensor 3 |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| Comprimento de Onda [nm] | 1527,11 | 1532,55 | 1553,52 |
| Sensibilidade sem alumina [pm/°C] | 12,4 | 11,9 | 12,53 |
| Sensibilidade com alumina [pm/°C] | 12,53 | 11,23 | 12,46 |

Ao analisar as tabelas, pode-se afirmar que a alteração da sensibilidade dos sensores sem encapsulamento para os com encapsulamento foram de no máximo de 0,67 pm/°C. Os resultados para a sensibilidade são absolutamente compatíveis com o valor de 12 pm/°C amplamente aceito na literatura (OTHONOS, 1999; ABE,2005; OLIVEIRA, 2012; SOUZA, 2011).

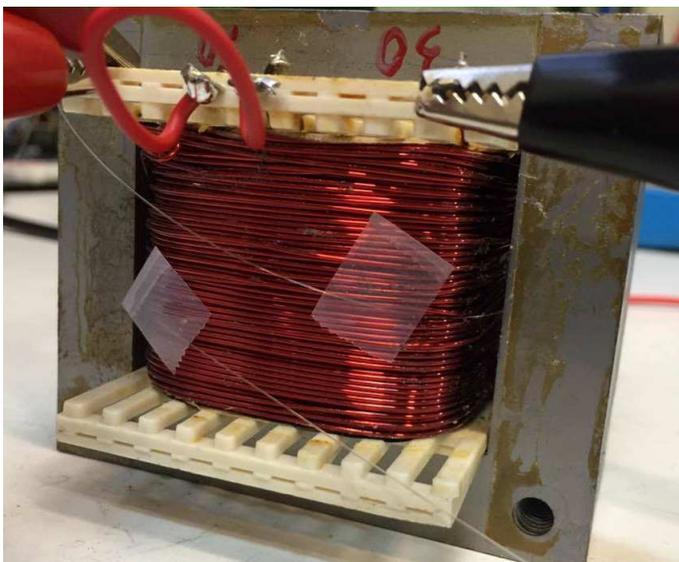
Portanto, é possível afirmar que a diferença mínima se torna desprezível para as aproximações térmicas futuras, podendo livremente utilizar este material como objeto de encapsulamento.

3.3 ENSAIOS NAS MÁQUINAS ELÉTRICAS

3.3.1 Ensaio no Transformador

Neste ensaio foi utilizado um transformador comercial 45 VA, com 60 V no secundário, este foi ligado a um Reostato (100 Ω) para a variação da carga.

Para a medição de temperatura foi utilizado um cabo do conjunto 2, contendo três sensores óticos sem encapsulamento, este foi alocado nos enrolamentos do transformador, para obter a temperatura direta dos enrolamentos. A Fotografia 5 abaixo demonstra os sensores colocados sobre o enrolamento do transformador.



**Fotografia 5 – Conjunto 2 posicionado entre o enrolamento do transformador.
(Fonte: o autor).**

Assim como para a caracterização, no ensaio do transformador a obtenção dos gráficos se deu através do sistema contendo interrogador ótico mais notebook.

Para o ensaio foi feito a variação da resistência do reostato de 100Ω a 30Ω , com variação entre medições de 10Ω e intervalo de tempo de 10 min para obter a variação de temperatura.

A Figura 11 abaixo contém os deslocamentos de comprimento de onda do sensor 2 ($\lambda=1532,55\text{nm}$) durante a variação de carga.

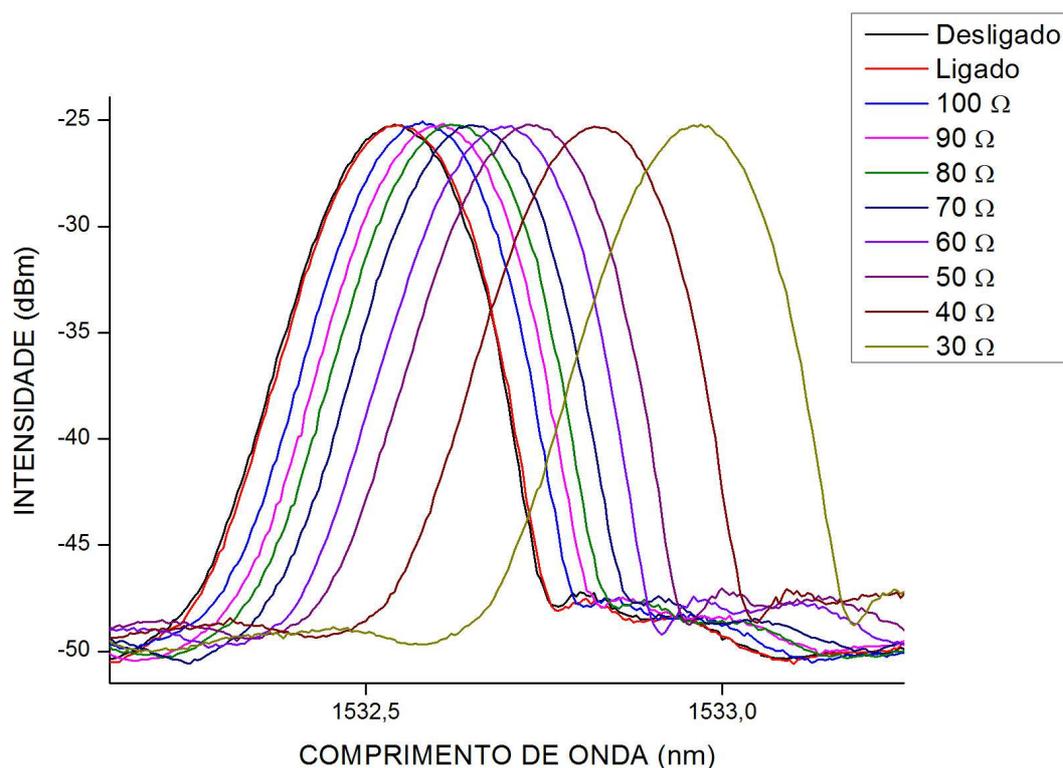


Figura 11 – Variação de comprimento de onda do sensor 2 durante o ensaio com o transformador. (Fonte: o autor).

Como visto na Figura 11, a variação de carga leva a um deslocamento espectral, isto ocorre para os três sensores que estão alocados no enrolamento. Estes deslocamentos são resultados do aumento da temperatura na máquina que são sensibilizados pelo sensor. Para obter este aumento é preciso analisar novamente os picos de comprimento de onda e obter o deslocamento espectral, este será dividido pelo coeficiente de sensibilidade obtido durante a caracterização de cada sensor, resultando no aumento de temperatura para cada aumento de carga.

Para estas medições foi obtida a Tabela 4, a qual compara os três sensores com suas respectivas variações de comprimento de onda e variações de temperatura resultantes.

Tabela 4 – Relação entre carga, variação de comprimento de onda e temperatura.

| | Sensor 1 | | Sensor 2 | | Sensor 3 | |
|--------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| Carga | $\Delta\lambda$ 1 | Temperatura | $\Delta\lambda$ 2 | Temperatura | $\Delta\lambda$ 3 | Temperatura |
| Desligado | 0 | 20,00 | 0 | 20,00 | 0 | 20,00 |
| Ligado | 0,01 | 20,81 | 0,01 | 20,84 | 0,01 | 20,39 |
| 100 Ω | 0,04 | 23,63 | 0,04 | 23,36 | 0,04 | 22,79 |
| 90 Ω | 0,05 | 24,03 | 0,06 | 25,46 | 0,06 | 25,18 |

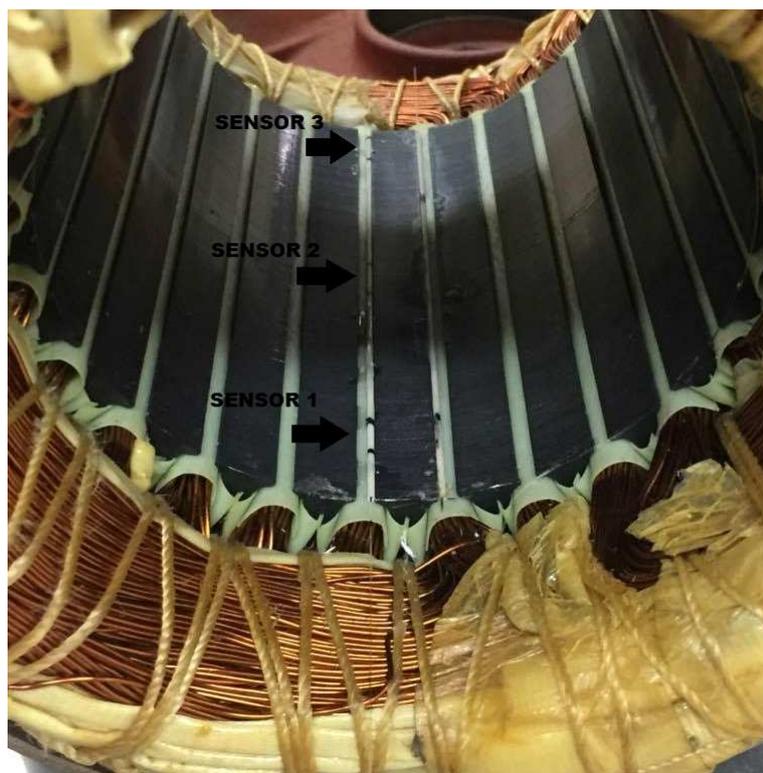
| | | | | | | |
|-----|------|-------|------|-------|------|-------|
| 80Ω | 0,06 | 24,84 | 0,08 | 27,14 | 0,08 | 26,38 |
| 70Ω | 0,06 | 25,24 | 0,11 | 29,24 | 0,11 | 28,77 |
| 60Ω | 0,27 | 41,77 | 0,16 | 33,44 | 0,14 | 31,57 |
| 50Ω | 0,31 | 45,40 | 0,19 | 36,38 | 0,22 | 37,55 |
| 40Ω | 0,40 | 52,66 | 0,28 | 43,95 | 0,28 | 42,74 |
| 30Ω | 0,55 | 64,35 | 0,42 | 55,29 | 0,42 | 53,52 |

Na tabela 1, é perceptível que o sensor 1 possui maiores temperaturas, isso ocorre devido ao local em que o sensor estava posicionado, parte do enrolamento envolvido pelo núcleo, havendo assim uma menor dissipação do calor para este sensor.

3.3.2 Ensaio no Motor

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos (LabESO) da UTFPR, o laboratório possuía um motor para instrumentação de indução trifásico 220/380 V (Δ / Y), com potência de 5 cv e corrente nominal de 13,1/7,58 A.

Para as medições de temperatura, foi aberto o motor e retirado o rotor, em sequência foi posicionado a fibra com o encapsulamento entre as ranhuras do estator conforme a Fotografia 6.



Fotografia 6 – Conjunto 2 posicionado entre as ranhuras do estator. (Fonte: o autor).

Para a fixação foi colado à alumina com cola multiuso de cianoacrilato, para evitar a sua movimentação durante o ensaio e ruptura do sensor. Souza (2011) realizou experimentos para analisar as variações do coeficiente linear devido à expansão térmica durante as deformações mecânicas do material utilizado para encapsulamento, e este concluiu que o encapsulamento desenvolvido não sofre variação em seu coeficiente quando colado sobre outra superfície. Dessa forma, não há restrições quanto ao posicionamento do sensor sobre o estator.

O ensaio foi realizado com o motor ligado a vazio, a uma temperatura ambiente de 22°C, com monitoramento através de um interrogador ótico SM-130 e notebook com o *software* Catman, através deste *software* foi programado um intervalo de um segundo entre medições durante aproximadamente 90 min para obter a variação térmica.

A Figura 12 representa a curva de variação de comprimento de onda pelo tempo durante o ensaio para o sensor 1.

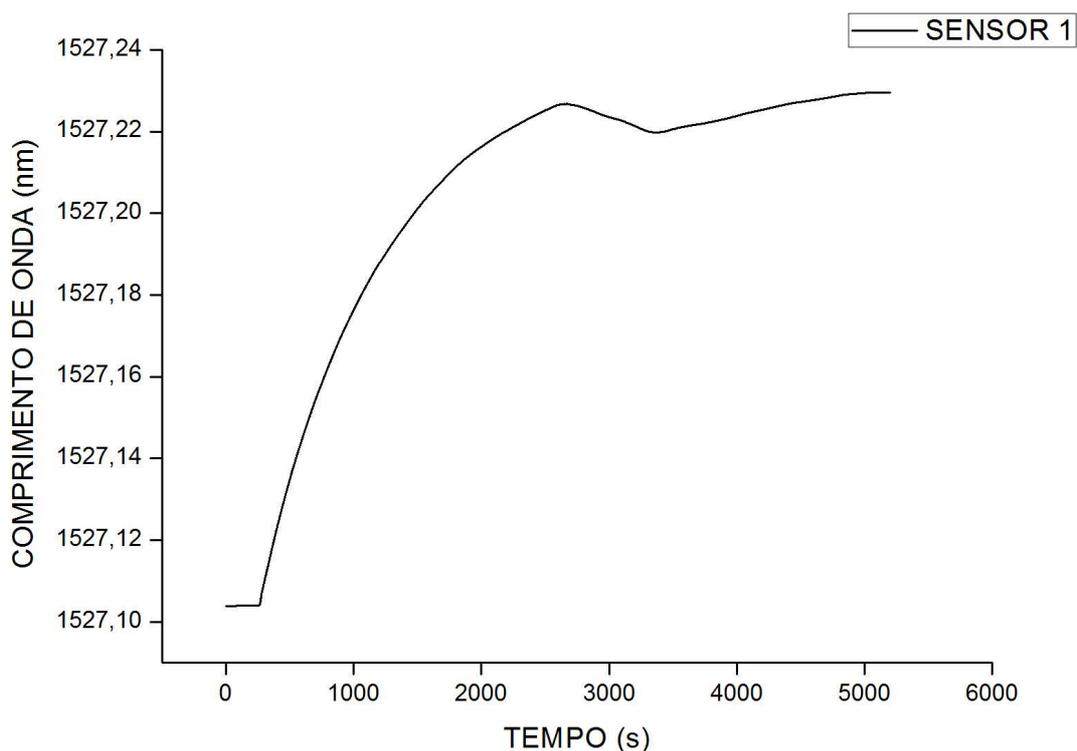


Figura 12 – Variação de comprimento de onda do sensor 1 durante o ensaio com o motor. (Fonte: o autor).

A curva da Figura 12 apresenta uma primeira situação com temperatura ambiente e motor desligado e comprimento de onda constante, em seguida o motor é ligado e é observado instantaneamente o aumento dos deslocamentos de comprimento de onda em consequência do aumento da temperatura, devido às perdas na máquina. É esperada a estabilização da temperatura interna do motor a vazio, porém a saturação no campo ocasiona uma variação inversa, reduzindo a temperatura, observada próxima a estabilização, aproximadamente aos 260 s. Esta situação ocorre para os três sensores embutidos no estator.

Para a determinação do aumento de temperatura monitorado pelo sensor, assim como para o ensaio do transformador, é obtida a variação do comprimento de onda e é dividido pelos respectivos coeficientes de sensibilidade obtidos na caracterização, neste caso para a caracterização com encapsulamento.

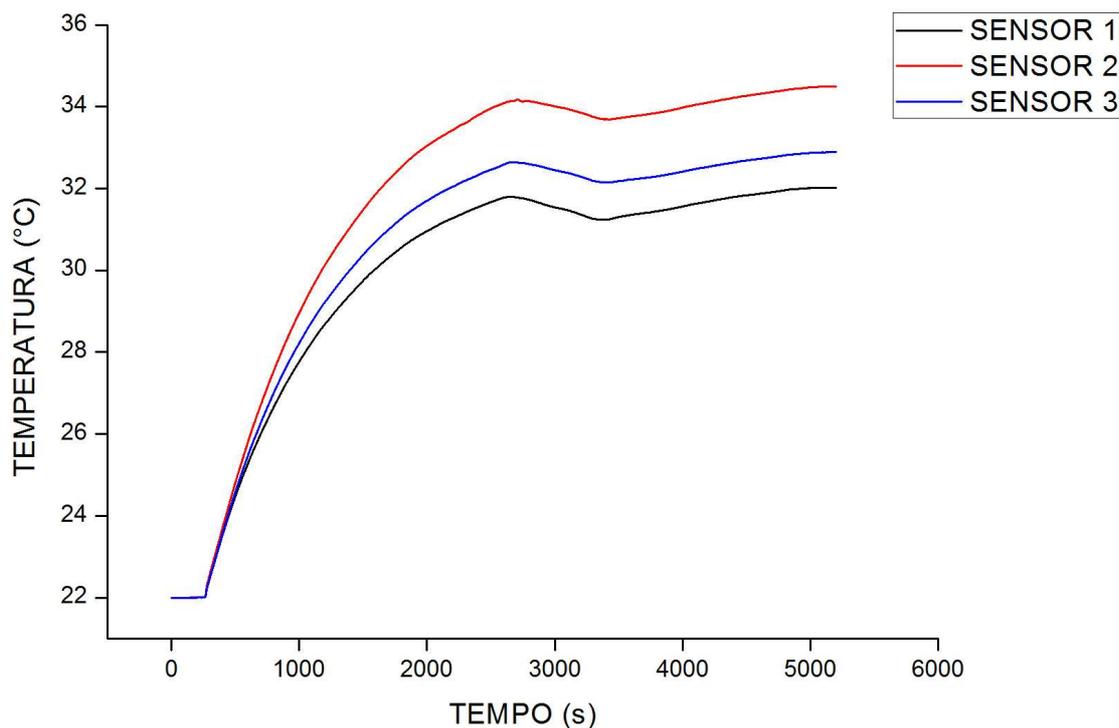


Figura 13– Variação de temperatura dos sensores durante o ensaio com o motor. (Fonte: o autor).

A Figura 13 representa a variação de temperatura dos três sensores durante o ensaio do motor a vazio. Em comparação a Figura 12, é visível que as variações de comprimento de onda estão diretamente relacionadas à variação de temperatura. E assim como descrito anteriormente os três sensores foram suscetíveis a variação da temperatura, porém pelas posições diferentes apresentaram magnitudes diversas. A diferença de variações de temperatura dos sensores é devido ao seu posicionamento ao longo do estator. Os sensores mais próximos da parte de trás do motor possuem uma variação maior de temperatura, enquanto que o sensor 1, posicionado na parte de frente do motor, possui uma variação menor. Segundo Souza (2011) um fator que contribui para uma distribuição não uniforme de temperatura é a ventilação e as diferentes condutividades térmicas que o motor apresenta devido a sua carcaça não uniforme ao longo do motor.

4 CONCLUSÃO

A utilização do sensor ótico baseado em redes de Bragg demonstrou-se adequado para o monitoramento de temperatura.

Para a caracterização dos sensores, tanto para o sistema do Peltier como para o sistema contendo a estufa de secagem, o conjunto de sensores apresentou coeficientes de sensibilidades coerentes, que variaram entre 11 pm/°C à 12 pm/°C, muito próximas aos encontrados na literatura, como Abe (2004), Oliveira (2011) e Souza (2012). Ainda, para a caracterização foi analisado o comportamento dos sensores encapsulados para os sem encapsulamento. Estas medições resultaram a uma diferença média de 0,29 pm/°C. Estas pequenas variações podem ser dadas devido à expansão térmica do material, às pequenas variações de temperatura ambiente durante a caracterização e também à pequena imprecisão da temperatura durante a obtenção dos dados. Porém, mesmo com a pequena variação, é válida a utilização dos sensores óticos (com e sem encapsulamento) para o sensoriamento térmico.

Para os ensaios nas máquinas elétricas, foi utilizado o conjunto 2, contendo três sensores óticos, a escolha desse conjunto foi devido a possibilidade de se obter diferentes temperaturas de acordo com o posicionamento de cada sensor. No caso do transformador, os sensores foram posicionados ao longo do enrolamento, e foi possível obter diferenças térmicas durante as mudanças de carga, que foram de aproximadamente 40°C em relação à temperatura ambiente. Para o motor, os sensores foram posicionados no estator, e obtiveram-se variações de aproximadamente 34°C, porém sem variação de carga, apenas a análise de seu comportamento térmico durante a partida. Nestes ensaios, foi possível obter as variações de temperatura nos três sensores e foram observadas as diferenças térmicas em diferentes pontos destas máquinas. Para o ensaio com o transformador, foram notadas diferenças superiores para o sensor que estava coberto pelo núcleo. Para o ensaio com o motor a diferença de temperatura foi notada pelos sensores que se alocavam próximo a parte de trás, em caso do sensor 2, que estava posicionado no meio do estator, se observou uma maior variação de temperatura comparado aos outros. As diferenças de temperatura sensibilizadas pelos sensores como visto nos ensaios, podem ser ocasionados por vários fatores, como ventilação,

diferença de condutividade térmica ao longo da máquina, e o posicionamentos dos sensores, que estão em locais mais fechados e com menor ventilação.

Para este trabalho, foi concluído que os sensores óticos são uma opção conveniente para sensoriamentos de temperatura, possuem dimensões adequadas para o monitoramento nos locais requeridos, e possuem um sensoriamento remoto de fácil acesso para a instrumentação. E também, o encapsulamento escolhido apresentou compatibilidade com o sensor ótico, tanto em dimensão como em condutividade térmica, que foi satisfatória, e resultou a uma diferença imperceptível.

Como um trabalho futuro, fica a opção de um estudo para a análise da variação da temperatura ao longo dessas máquinas, incluindo fatores elétricos e térmicos.

REFERÊNCIAS

ABE, Ilda. **Redes de Bragg em fibras óticas de alta birrefringência: produção, caracterização e aplicações**. 2004. 182f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

BECHARA, Ricardo. **Análise de falhas em transformadores de potência**. 2010. 118f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) – Área de atuação: Sistemas de Potência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BUCH, Antônio. C.; GRUNEWALDER, Marcos. **Desenvolvimento de um concentrador de dados via software ellipse scada para ensaio de desempenho em usina termoeletrica-estudo de caso**. 2013. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Gestão Comercial Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

COSTA, Larissa N. **Prototipação de dispositivos com laser de femtosegundos**. 2014. 67f. Dissertação (Mestre em Ciência) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

DIAS, Luiz F. **Proteção de motores elétricos de grande porte**. 2013. 103f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

DREYER, Uilian J. et al. Sensor de Fibra Ótica para Monitoração de Mancais de Gerador Elétrico de 180MW. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICRO-ONDAS E OPTOELETRÔNICA. **Anais...** 16. 2014, Curitiba.

FARIA, Ivan P.; PARENTONI, Marcel F.C.; MARTINEZ, Manuel, L. B. Monitoramento térmico de transformadores por meio de sensores em fibra óptica: tecnologias e aplicações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA. **Anais do Congresso Brasileiro de Automática, 19.**, 2012, Campina Grande.

FINOCCHIO, Marco A. F. **Determinação da temperatura de enrolamento de transformadores a seco e de suas perdas totais baseado em redes neurais artificiais**. 2010. 99f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) – Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

GIL, Antônio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas S.A, 2002.

LOPES, Thiago D.; GOEDEL, Alessandro; BRONIERA, Paulo J.; GRACIOLA, Clayton L.; MIZUYAMA, Dermeval. Uma abordagem neural no monitoramento preditivo de temperatura num motor de indução trifásico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE. **Anais...**, 2013, Ceará.

MEZZANDRI, Felipe. **Monitoramento de temperatura em turbina de motor diesel de locomotiva com sensor a fibra ótica**. 2012. 64f. Dissertação (Mestre em Ciência) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

NBR-5416. **Aplicação de cargas em transformadores de potência – Procedimento**. 1997.

NBR-17094-1. **Máquinas elétricas girantes - Motores de indução trifásico**. 2008

OLIVEIRA, Valmir. **Redes de Bragg para medições em altas temperaturas**. 2012. 116f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

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

REIS, Anderson J. S. **Reconhecimento de padrões de falha em motores de indução trifásico utilizando redes neurais**. 2010. 88f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SILVA, Jean Cardozo. **Monitoração de vibrações de estruturas com o emprego de sensores em fibra ótica**. 2005. 194f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SOUZA, Keiton M. **Validação de modelo térmico e elétrico de motor de indução empregando redes de Bragg**. 2011. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2011

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de Bibliotecas. Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos. Curitiba: UTFPR, 2009. Disponível em: <http://www.utfpr.edu.br/documentos/normas_trabalhos_utfpr.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2015.