

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

GERALDO DE RESENDE LISBOA PIASSETTA

**ENCAPSULAMENTO DE SENSOR A FIBRA ÓTICA PARA
MAPEAMENTO TÉRMICO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

GERALDO DE RESENDE LISBOA PIASSETTA

**ENCAPSULAMENTO DE SENSOR A FIBRA ÓTICA PARA
MAPEAMENTO TÉRMICO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**

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. Jean Carlos Cardozo da Silva

CURITIBA

2017

Geraldo de Resende Lisboa Piassetta

Encapsulamento de Sensores a Fibra Ótica para Mapeamento Térmico de Máquinas Elétricas

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, 24 de novembro de 2017.

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

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

ORIENTAÇÃO

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

BANCA EXAMINADORA

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

Alceu André Badin, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marco José da Silva, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

RESUMO

PIASSETTA, Geraldo de Resende Lisboa. **Encapsulamento de sensor a fibra ótica para mapeamento térmico de máquinas elétricas**. 2016_2_25. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de sensores a fibra ótica para mapeamento térmico de máquinas elétricas, mais especificamente redes de Bragg, bem como validar e apresentar os resultados de calibração do modelo proposto. O mapeamento térmico de máquinas elétricas é essencial do ponto de vista de uma operação eficiente e atuação preventiva sobre falhas de isolamento, surtos de corrente e tensão elétrica. Para tanto, se faz necessário um sistema de sensoriamento que opere de forma confiável dentro de suas condições de aplicação e, métodos que permitam o sistema ou operador atuar com base nos resultados obtidos. Assim sendo, o mapeamento térmico empregando sensoriamento ótico quase-distribuído será aplicado em máquinas elétricas, levando em consideração as incertezas, pontos negativos e positivos na aplicação de sensores FBG no sensoriamento térmico de máquinas elétricas, e mais especificamente em motores elétricos.

Palavras-chaves: Sensores a fibra ótica. Redes de Bragg. Mapeamento térmico. Máquinas elétricas.

ABSTRACT

PIASSETTA, Geraldo de Resende Lisboa. **Encapsulation of optical fiber sensor for electrical machines thermal mapping**. 2016_2_25. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2017.

This work aims to evaluate the performance of optical fiber sensors for thermal mapping of electrical machines, specifically Bragg networks, as well as to validate and present the calibration results of the proposed model. The thermal mapping of electrical machines is essential from the point of view of an efficient operation and preventive action on insulation faults, current surges and electrical voltage. Thus, a sensing system that reliably operates within its application conditions is required, and methods that allow the system or operator to act based on the results obtained. The thermal mapping using quasi-distributed optical sensors will be applied in electric machines, raising the uncertainties, negative and positive points in the application of FBG sensors in the thermal sensing of electric machines, and more specifically in electric motors.

Keywords: Optical fiber sensors. Bragg Grating. Sensors encapsulation. Thermal mapping. Electric machines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação de uma FBG: (a) fibra ótica contendo três FBG's e (b) espectros associados.	16
Figura 2: Máscara de fase com representação do feixe incidente e as ordens ± 1	17
Figura 3: Esquema de interrogação.	18
Figura 4: Esquema do encapsulamento desenvolvido.	24
Figura 5: Protótipo do encapsulamento.	25
Figura 6: Protótipo do encapsulamento com deformações causadas pelo termo contrátil.	26
Figura 7: Esquema do sistema de calibração.	27
Figura 8: Gráfico do resultado da calibração do sensor 1 encapsulado.	31
Figura 9: Gráfico do resultado da determinação das incertezas do sensor 1 encapsulado.	32
Figura 10: Gráfico do resultado da calibração do sensor 2 encapsulado.	33
Figura 11: Gráfico do resultado da determinação das incertezas do sensor 2 encapsulado.	34
Figura 12: Gráfico do resultado da calibração do sensor 3 sem encapsulamento.	35
Figura 13: Gráfico do resultado da determinação das incertezas do sensor 3 sem encapsulamento.	36
Figura 14: Esquema da posição dos sensores FBG instrumentados no motor elétrico: (a) Motor instrumentado, (b) Posição no modelo utilizado para gerar o mapa térmico.	38
Figura 15: Posição dos sensores FBG encapsulados nas ranhuras do estator: (a) e (b) ranhuras com profundidade suficiente para acomodar os sensores, (c) e (d) ranhuras com profundidade insuficiente para acomodar os sensores.	39
Figura 16: Configuração do ensaio de motor a vazio.	40
Figura 17: Temperatura durante o ensaio de motor a vazio.	41
Figura 18: Detalhe (a) figura 17: Interferências mecânicas.	42
Figura 19: Detalhe (b) figura 17: Variação devido ao desbalanceamento nas tensões.	43
Figura 20: Detalhe (c) figura 17: Desligamento do motor.	44
Figura 21: Mapa térmico: (a) 1 minuto, (b) 10 minutos, (c) 20 minutos, (d) 30 minutos, (e) 40 minutos, (f) 50 minutos, (g) 90 minutos.	45
Figura 22: Imagem térmica captura por uma câmera térmica: (a) vista da lateral esquerda, (b) vista da lateral direita.	49
Figura 23: Configuração do ensaio de "rotor travado".	50
Figura 24: Temperatura durante o ensaio de motor a vazio.	51

Figura 25: Mapa térmico do ensaio de rotor travado: (a) 1 minutos, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos, (d) 10 minutos, (e) 15 minutos, (f) 20 minutos, (g) 30 minutos, (h) 35 minutos, (i) 37 minutos.....	52
Figura 26: Imagem obtida com a câmera térmica: (a) imagem frontal no início do ensaio, (b) imagem posterior no fim do ensaio, (c) imagem frontal no fim do ensaio.....	57
Figura 27: Comparativo da parte frontal: (1) e (2) imagem do ensaio de motor a vazio; (3) e (4) imagem do ensaio de rotor travado; (5) e (6) imagens térmicas do ensaio de rotor travado; (7) imagem térmica do ensaio de motor a vazio.....	59
Figura 28: Comparativo da parte posterior: (1) e (2) imagem do ensaio de motor a vazio; (3) e (4) imagem do ensaio de rotor travado; (5) e (6) imagens térmicas do ensaio de rotor travado; (7) imagem térmica do ensaio de motor a vazio.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	TEMA	9
1.1.1	Delimitação do tema	10
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	10
1.3	OBJETIVOS	11
1.3.1	Objetivos gerais	11
1.3.2	Objetivos específicos	11
1.4	JUSTIFICATIVA	12
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	SENSORES EM FIBRA ÓTICA	14
2.1.1	Redes de Bragg em fibra ótica	15
2.1.2	Gravação de sensores FBG	17
2.1.3	Sistema de interrogação	18
2.1.4	ENCAPSULAMENTO DE SENSORES FBG	19
2.2	MÁQUINAS ELÉTRICAS	21
2.2.1	Falhas em Máquinas	21
2.2.2	Mapeamento térmico	22
3	DESENVOLVIMENTO	24
3.1	ENCAPSULAMENTO	24
3.2	CALIBRAÇÃO	26
3.2.1	Sistema de calibração	26
3.2.1	Determinação das incertezas	27
3.2.2	Resultados	30
3.3	MAPEAMENTO TÉRMICO	37
3.3.1	Instrumentação do motor elétrico	37
3.3.1	Ensaio de motor a vazio	40

3.3.2	Ensaio de “rotor travado”	50
3.3.3	Comparação dos resultados	58
4	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

O monitoramento térmico é fundamental em sistemas industriais, sendo a temperatura um parâmetro necessário na atuação de dispositivos de segurança e proteção, determinação de características de operação e vida útil (BECHARA,2010). Portanto, a temperatura é um agente que está diretamente ligado a degradação e eficiência. Desta forma o estudo e conhecimento do comportamento da temperatura pode auxiliar no planejamento de manutenção, prevenção e identificação de falhas, otimização de operação e atuação de proteções em casos de surtos.

Em sistemas de potência os parâmetros de temperatura de operação devem ser respeitados rigorosamente, pois caso contrário será reduzido proporcionalmente a eficiência e vida útil, ou até mesmo retirar o sistema de operação. No caso das máquinas elétricas a medição da temperatura se torna importante para a garantia das condições de operação como, por exemplo, em geradores de potência, pode-se citar: alimentação de cargas desbalanceadas; curto circuito na linha de transmissão, condições de sub e sobre excitações (BULGARELLI, 2006). Estas situações fazem com que ocorram perdas mais elevadas nos enrolamentos do gerador (estator e rotor) e por consequência uma elevação de temperatura acima da prevista para sua operação. Temperatura acima da nominal faz com que os materiais isolantes presentes no gerador apresentem degradação precoce, ocasionando redução da vida útil do gerador, além de problemas de isolamento que levam a curto circuito na máquina (SILVA, 2015).

Neste trabalho, o sensor ótico proposto para mapeamento térmico é baseado em redes de Bragg em fibra ótica (HILL, 1978). As redes de Bragg vêm sendo estudadas e aplicadas nas últimas décadas e pode-se destacar algumas de suas características com sensor: imunidade à interferência eletromagnética; pequenas dimensões da fibra ótica (milímetros de comprimento e micrometros de diâmetro); fabricado em material dielétrico (sílica); possibilidade de sensoriamento multiplexado e quase-distribuído em uma mesma fibra. Com base nestas características, tal sensor pode ser aplicado para mapeamentos térmicos em locais de difícil acesso (partes internas de máquinas elétricas).

As redes de Bragg em fibra ótica, ou simplesmente FBG (*Fiber Bragg Grating*), de forma simplificada, atuam como filtros óticos refletindo comprimentos de onda

específicos e permitindo a transmissão sem perdas dos demais. Este comportamento é obtido através da modificação do índice de refração de pequenas seções do núcleo da fibra. Assim sendo, o sensoriamento com redes de Bragg em fibra ótica é baseado no monitoramento do comprimento de onda refletido pela rede de Bragg, este comprimento de onda específico sofrerá uma variação caso seja imposto sobre ela uma alteração térmica ou esforços mecânicos. Portanto, como este parâmetro é dependente da temperatura e esforços mecânicos. Com isso, a variação no comprimento de onda pode ser traduzir em uma medida de temperatura e/ou deformação (OTHONOS, 1999).

1.1.1 Delimitação do tema

Este trabalho será focado na avaliação do desempenho de sensores a fibra ótica aplicados em mapeamento de máquinas elétricas. A aplicação de sensores a fibra ótica é alvo de estudo de diversos trabalhos (BORTOLLI, 2011; YOON, 2007; SOUZA, 2011) onde fica claro os seus potenciais e fragilidades como elemento sensível. Neste trabalho pretende-se apresentar um método para aumentar a robustez do sensor com o intuito de facilitar a sua aplicação em máquinas elétricas e obter uma aquisição de dados de temperatura mais confiável. Além disso, pretende-se realizar uma instrumentação com sensores quase-distribuídos no interior de uma máquina elétrica e em apresentar os resultados obtidos da medição de temperatura através de um mapa térmico.

Sensores aplicados em máquinas elétricas estarão submetidos a vibrações, esforços mecânicos e campos eletromagnéticos (SOUZA, 2011). O sensor FBG, por se tratar de um elemento que é eletricamente passivo, não sofrerá influências devido ao campo eletromagnético, porém apresenta sensibilidade a vibrações e esforços mecânicos (HILL 1997).

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A aplicação de sensores de redes de Bragg em fibra ótica já foi demonstrada e estuda em inúmeros trabalhos e alguns destes trabalhos trazem pontos que motivam a realização investigações afim de melhor entender e apontar soluções para os pontos levantados. Foi apontado em (LEE, 2006) dificuldades no monitoramento térmico realizado em máquinas elétricas devido a interferências mecânicas. Também se observa

em (SOUZA, 2011; DREYER, 2014) a necessidade de desenvolver dispositivos para aumentar a resistência mecânica dos sensores FBG, como consequência deste processo há alterações no comportamento do sensor original, como aumento no tempo de resposta e sensibilidade.

Se tratando de medição de temperatura interna de máquinas elétricas o método mais utilizado é baseado em termoresistências (BULGARELLI, 2006), conhecidos como RTD (*Resistance Temperature Detector*), no qual é basicamente uma resistência que varia seu valor de acordo com a temperatura. Desta forma, medindo a variação de corrente nos RTD's e utilizando a lei de Ohm é possível medir a temperatura. Estes dispositivos são dependentes de suas propriedades elétricas para atuarem de forma adequada, portando quando sujeitos a campos eletromagnéticos, como no interior de máquinas elétricas, podem ter o seu funcionamento prejudicado.

Considerando que os sensores FBGs necessitam de encapsulamento para aumentar a sua confiabilidade mecânica e o ambiente eletromagnético no qual pode afetar o funcionamento do principal dispositivo aplicado no monitoramento térmico de máquinas. Desta forma, considerando estas duas situações, neste trabalho será apresentado um método para encapsular sensores FBG para aumentar a resistência mecânica e validar um sistema de mapeamento térmico com um elemento sensível imune a campos eletromagnéticos como uma alternativa para a instrumentação de máquinas elétricas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos gerais

Validar um sistema de mapeamento térmico para máquinas elétricas e um método de encapsulamento para sensores a fibra ótica baseado em redes de Bragg.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudar os fenômenos e características físicas dos sensores baseados em rede de Bragg em fibra ótica.
- Desenvolver um encapsulamento para sensores de rede de Bragg em fibra ótica.
- Caracterizar os sensores encapsulados.
- Validar o sensor por meio de ensaios em máquinas elétricas.

- Obter um mapa térmico de uma máquina elétrica.

1.4 JUSTIFICATIVA

O monitoramento e estudo térmico de máquinas elétricas se faz necessário para obter um sistema confiável e eficiente, de forma a evitar paradas indesejadas por falhas em equipamentos (BULGARELLI, 2006; BECHARA, 2010). Com relação a aplicação de sensores a fibra ótica em máquinas, estes sensores são vantajosos devido sua multiplexação (vários sensores em uma única fibra), dimensões reduzidas, tempo de resposta e imunidade a interferência eletromagnética (HILL, 1997). Portanto, esforços no desenvolvimento de métodos e sistemas de mapeamento térmico de máquinas utilizando sensores a fibra ótica podem trazer benefícios conforme os pontos citados.

Neste trabalho, no qual serão aplicados sensores FBG para monitoramento de temperatura em máquinas elétricas, tem como meta apresentar o funcionamento do sistema proposto, que consiste no encapsulamento para aumentar a resistência mecânica do sensor, devido a sua fragilidade e necessidade de robustez em vista que ambientes industriais requerem equipamentos resistentes e confiáveis. Também, tem-se como objetivo apresentar os parâmetros de temperatura através de um mapeamento térmico, de forma a oferecer uma solução que auxilie a identificação de padrões de temperatura na operação de máquinas elétricas.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho é de natureza teórico e experimental. Portanto o desenvolvimento do trabalho e pesquisa foi dividido em duas etapas:

A primeira etapa é destinada a uma revisão bibliográfica, afim de reunir os conhecimentos necessários acerca de sensores de Redes de Bragg em fibra ótica. Especificamente, o estudo da aplicação para medição de temperatura e encapsulamento se fará necessária para o desenvolvimento do sensor proposto.

A segunda etapa é destinada ao desenvolvimento experimental. Ensaiar os modelos propostos para o encapsulamento, buscando entender o funcionamento do sensor durante a confecção e calibração. Uma vez confirmada a reprodutibilidade e

confiabilidade do sensor encapsulado serão realizados experimentos buscando comprovar a aplicabilidade do sensor para mapeamento térmico de máquinas elétricas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SENSORES EM FIBRA ÓTICA

Os sensores a fibra ótica possuem grande versatilidade com relação as suas aplicações e tradicionalmente são empregados na medição de temperatura, pressão, deformação e vibração. Também se destaca a atuação na engenharia civil para monitoramento de estruturas como pontes, prédios, estradas e represas. Na área de engenharia elétrica estes sensores têm sido utilizados em linhas de transmissão (SILVA,2015), sistemas elétricos de potência (ECKE, 2009), monitoramento de temperatura em transformadores e motores (SOUZA, 2011), painéis fotovoltaicos (SANTOLIN, 2016), turbinas de geradores eólicos (ECKE, 2009).

Os sensores a fibra ótica podem ser divididos basicamente em: instrumentação que é composta por interrogadores óticos, sistemas de aquisição, software e interfaces gráficas; e em dispositivos de sensoriamento, que no caso deste trabalho são as redes de Bragg. Os sistemas de instrumentação possuem um valor elevado em relação aos dispositivos de sensoriamento, fazendo com este seja um obstáculo para a implementação de sensores a fibra ótica. Entretanto, o mercado tem uma boa perspectiva de crescimento e desenvolvimento de novas soluções que irão disponibilizar sistemas de instrumentação mais acessíveis que impulsionará a aplicação destes sensores (MÉNDEZ, 2007)

Em contrapartida, os sensores a fibra ótica apresentam características que os tornando muito interessante e em alguns casos se tornam a única opção para a aquisição de medidas. O sensor proposto neste trabalho para mapeamento térmico apresenta algumas características que justificam o seu uso, tais como (SOUZA, 2011):

- Passivo: os sensores a fibra ótica não são alimentados eletricamente, o que faz com eles não apresentem perdas ou interferências devido a variações na sua alimentação e elevação da temperatura;
- Tamanho reduzido: as dimensões do sensor encapsulado proposto são reduzidas, possibilitando a medição de temperatura em locais de difícil acesso, de forma pontual e sem ocupar uma área relevante;
- Múltiplos sensores: Devido a característica dos sensores em rede de Bragg opera apenas em uma pequena faixa de comprimento de onda, é possível a

multiplexação de vários sensores em uma mesma fibra sendo que cada sensor irá operar em seu específico comprimento de onda;

- Imune a interferências eletromagnéticas: a fibra ótica opera como um guia de luz o que torna o sensor a fibra ótica ideal para aplicações em ambientes com elevadas correntes e campos magnéticos.
- Pequena atenuação de sinal: A fibra ótica possui uma atenuação 0,2 dB/km o que permite a aplicação de sensoriamentos remotos sem comprometer o sinal.

É também importante destacar as principais fragilidades dos sensores de redes de Bragg em fibra ótica, onde destaca-se o elevado custo para a sua fabricação e instrumentos de interrogação, medição cruzada no qual o sensor pode responder ao mesmo tempo a variações de temperatura e tensões mecânicas. Com relação as medidas cruzadas algumas aplicações têm sua complexidade elevada consideravelmente para que seja obtido a medida desejada, fazendo com que seja necessárias aplicações de técnicas processamento de sinais e o desenvolvimento de encapsulamentos.

2.1.1 Redes de Bragg em fibra ótica

As redes de Bragg em fibra ótica são uma estrutura periódica que rejeita uma banda ao redor do comprimento de onda de Bragg, não permitindo a propagação desses comprimentos de onda, funcionando como um refletor seletivo. Portanto, pode afirmar que as redes de Bragg tem um comportamento análogo ao de um filtro eletrônico rejeita faixa (OTHONOS, 1997).

Uma importante característica da FBG é que perturbações externas que possam atenuar a intensidade do sinal transmitido não afeta o comprimento de onda da FBG, uma vez que a FBG é apenas dependente do comprimento de onda. Quando uma FBG é iluminada por uma fonte ótica banda larga, somente os comprimentos de onda que satisfazem a condição de Bragg são refletidos, enquanto os demais são transmitidos. Com isso pode ser desconsiderado problemas devidos a ruídos provenientes de variações na intensidade do sinal.

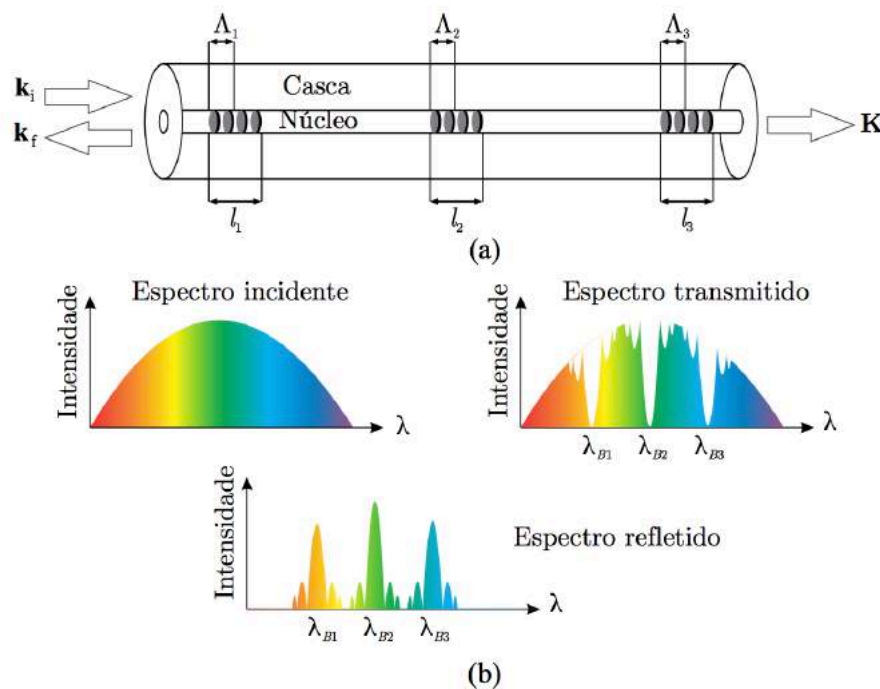
A condição de Bragg é dada pela Equação 2.1 (OTHONOS, 1997).

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (2.1)$$

onde λ_B é o comprimento de onda de Bragg, n_{eff} é o índice de refração efetivo e Λ é o período espacial da rede.

Quando a condição de Bragg é satisfeita, a contribuição da luz refletida por cada plano da rede contribui construtivamente na direção contrapropagante, formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede (OTHONOS; KALLI, 1999), de acordo com o esquema da figura 1.

Figura 1: Representação de uma FBG: (a) fibra óptica contendo três FBG's e (b) espectros associados.



Fonte: (SOUZA, 2011)

O índice de refração efetivo n_{eff} e o período espacial periódico da rede Λ são funções dependentes da temperatura e/ou deformações mecânicas, as quais, quando alteradas modificarão o espectro refletido pela FBG, que por sua vez fará com o comprimento de onda de Bragg da rede varie. A partir da equação 2.1, onde é dado a variação do comprimento da onda de Bragg, pode ser obtido a equação 2.2 (OTHONOS, 1997), onde é mostrado a dependência da temperatura e/ou deformações no comprimento de onda de Bragg.

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_{B,l} + \Delta\lambda_{B,t}$$

$$\Delta\lambda = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial l} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.2)$$

$$\Delta\lambda = S_l \Delta l + S_t \Delta T ,$$

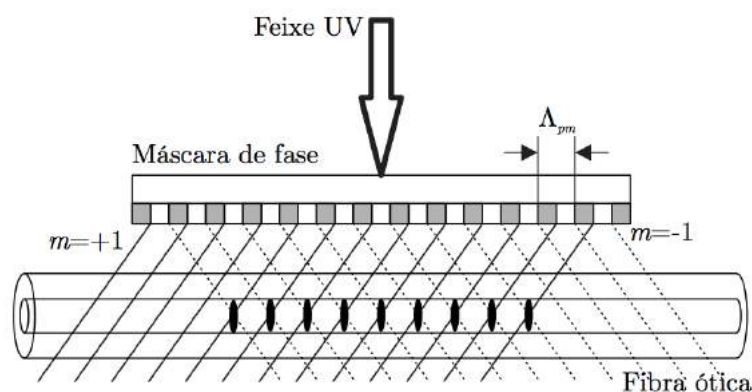
onde n índice de refração, Δl a variação de deformação, ΔT a variação de temperatura, $\Delta\lambda_{B,l}$ é a variação do comprimento de onda devido a deformação aplicada e $\Delta\lambda_{B,t}$ é o efeito térmico sob o mesmo parâmetro. Os termos S_l e S_t representam os coeficientes de sensibilidade de deformação e de temperatura dos sensores FBG.

2.1.2 Gravação de sensores FBG

O processo de gravação de sensores de redes de Bragg é muito delicado e para a sua confecção se faz necessário um sistema estável e preciso. Durante o processo há uma exigência de um sistema com uma estabilidade $1\ \mu\text{m}$ no padrão de interferência na fibra ótica, portanto a estabilidade do sistema é fundamental para o sucesso da gravação (OTHONOS, 1997). Para a gravação de uma FBG são utilizadas técnicas de gravação externas, no qual é aplicado um feixe de laser através da casca da fibra ótica. Dentre as técnicas pode-se destacar a técnica interferométrica, a máscara de fase e a técnica ponto por ponto (OTHONOS, 1997). A técnica da máscara é uma das técnicas mais utilizada devido ao seu baixo nível de complexidade em relação as demais técnicas, possuindo uma boa capacidade de repetitividade.

A máscara de fase atua como um elemento de difração, com uma serie de depressões longitudinais ao logo de sua superfície. Estas depressões são confeccionadas com uma grande precisão para que o seu padrão de difração permita a difração do feixe de laser por ela transmitido, e assim, ocorra a incidência de feixes de luz sobre o núcleo da fibra ótica (KASHYAP,1999), de acordo com o esquema da figura 2.

Figura 2: Máscara de fase com representação do feixe incidente e as ordens ± 1 .



Fonte: (Kashyap, 1999).

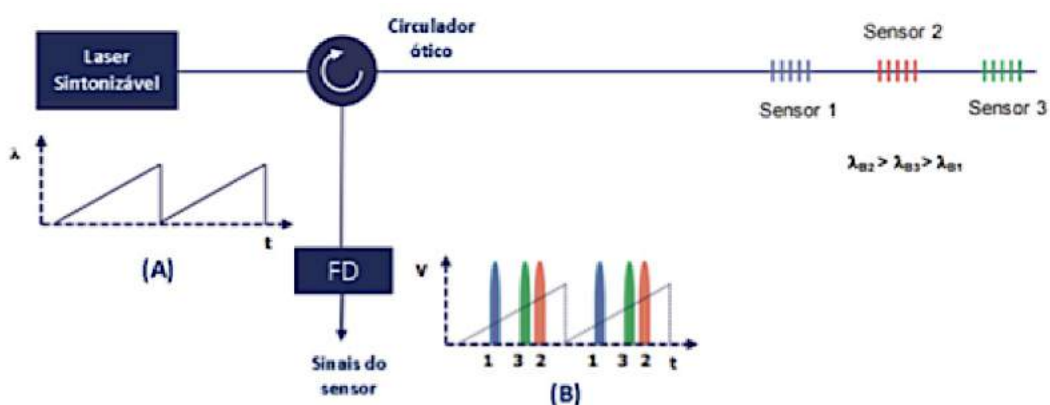
A técnica de máscara de fase é um importante fator na confecção das redes de Bragg, oferecendo um método simples, confiável e de custo reduzido em relação as demais técnicas. O fato de utilizar-se apenas um elemento ótico proporciona um método robusto e inerentemente estável para a reprodução de FBG's (HILL; MELTZ, 1997; OTHONOS, 1997).

2.1.3 Sistema de interrogação

Uma das vantagens dos sensores FBG é que o seu sinal é medido realizada em comprimento de onda, o que torna as medições imunes a variações de amplitudes devido a curvaturas na fibra ótica ou flutuações da fonte de laser. Uma das formas de interpretar o sinal de uma FBG consiste em iluminar a fibra ótica com uma fonte de luz de banda estreita ou laser sintonizável e medir o sinal refletido pela FBG com um interrogador ótico (WANG *et al.*, 2014).

Na Figura 3 um esquema ilustra o funcionamento do método utilizado para a interrogação dos sensores FBG's. O espectro da banda em modo de varredura proveniente do laser sintonizável, passa pela fibra ótica variando em comprimento de onda conforme o gráfico A. Os comprimentos de onda específicos são refletidos pelas FBG's, os quais variam de acordo com as variações de temperatura e deformações mecânicas, o gráfico B ilustra os espectros refletidos pelas FBG's encontrados pela varredura do laser. Os sinais refletidos passam pelo circulador ótico e são direcionados para o outro fotodetector (WANG *et al.*, 2014)

Figura 3: Esquema de interrogação.



FONTE: Adaptado (KALINOWSKI, 2017)

Uma vez obtido o sinal refletido das FBG's é realizado o monitoramento do pico do sinal com o auxílio de softwares. A variação do comprimento de onda do pico pode ser atribuída a uma variação de temperatura ou deformação mecânica de acordo com a aplicação da FBG como elemento sensível.

2.1.4 ENCAPSULAMENTO DE SENSORES FBG

Os sensores a fibra ótica, em especial os que possuem redes de Bragg como elemento sensor, podem necessitar de dispositivos de encapsulamento, de forma a oferecer maior resistência física e confiabilidade na aquisição das medidas desejadas (BORTOLLI, 2012). O processo de gravação das redes de Bragg na fibra ótica pode reduzir a resistência original da fibra ótica, devido a remoção da primeira camada de proteção (acrilato) da fibra e do processo de gravação das redes (YOON, 2007).

Em geral os métodos utilizados para o encapsulamento de sensores óticos alteram a sensibilidade com relação a resposta a agentes externos, que são os parâmetros que geralmente se deseja medir, em alguns casos este fenômeno é aceitável e em outros é necessário eliminá-los. Como consequência da influência do material utilizado no encapsulamento, que altera a sensibilidade do sensor, pode-se dizer que a medição ocorre de forma indireta, ou seja, um estímulo sobre o material do encapsulamento será transferido para o elemento sensível, no caso as redes de Bragg em fibra ótica. Neste processo pode se elevar o nível de incerteza nas medidas obtidas ou até alterar a linearidade do sensor, isto está diretamente ligado a quanto bem o material do encapsulamento pode transferir a medida para o elemento sensor.

A ocorrência de medidas cruzadas, ou seja, interferências externas diferentes das quais se deseja medir, acabam sendo introduzidas e geram medidas falsas. No caso dos sensores de rede Bragg um grande desafio é diferenciar ou eliminar as influências cruzadas, mecânicas e térmicas (BORTOLLI, 2012). Os encapsulamentos em sensores destinados a medir temperaturas, em sua grande maioria, buscam eliminar ou reduzir as interferências mecânicas. Porém, os materiais mais aplicados para este processo são metálicos, assim como descrito no parágrafo anterior, este material pode trazer algumas consequências.

Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de um encapsulamento que busque evitar os efeitos previamente descritos. Para tanto, será utilizado um tubo capilar de vidro

como material de revestimento do sensor e para a ancoragem uma cola UV especial para vidros. Estes materiais possuem características muito semelhantes às da sílica que compõem a fibra ótica (OTHONOS,1999). Com isto, pretende-se obter um sensor homogêneo, uma vez que as dilatações e contrações térmicas entre os materiais serão reduzidos devido ao coeficiente de dilatação térmica dos materiais serem aproximadamente iguais, mantendo a sensibilidade do sensor igual a original. O tamanho reduzido do encapsulamento irá contribuir para que não haja uma grande elevação no tempo de resposta do sensor, favorecendo uma rápida tomada de decisão caso seja detectado uma temperatura fora da margem especificada. Além disso, o tubo ofereceu a robustez necessária para ser aplicado em máquinas elétricas, estando sujeito a vibrações, esforços mecânicos.

Como o sensor será aplicado para a aquisição de temperatura, utilizar materiais no encapsulamento que possuem o mesmo coeficiente de dilatação térmica induz a afirmar que será mantido a sensibilidade a temperatura do sensor de rede de Bragg. Com isso, o sensor torna-se mais confiável, pois a medida obtida será de forma direta, considerando que os esforços entre o tubo de vidro, cola UV e sensor serão mínimos.

Durante a gravação dos sensores FBG ocorre um enfraquecimento da fibra ótica, devido ao processo de remoção da sua camada externa de acrilato e durante a exposição de laser ultravioleta que altera a estrutura do núcleo ocorre uma redução da sua resistência mecânica (OTHONOS, 1997).

Para se obter um sensor confiável e resistente ao manuseio é necessário confeccionar um encapsulamento para tornar as FBG's mais resistentes, ou até mesmo para buscar isolar o sensor de interferências indesejadas, sejam elas mecânicas ou térmicas. Podem ser encontrados trabalhos nos quais foram utilizados tubos metálicos como encapsulamento (SOUZA, 2011), tubos de teflon e colar os sensores diretamente sobre a superfície.

Sempre que o sensor é encapsulado é necessário verificar qual o impacto que material irá causar na sensibilidade e tempo de resposta da FBG. Pode ser verificado em (SOUZA, 2011), que o encapsulamento, além de oferecer maior robustez ao sensor, aumentou sensibilidade da FBG na medição de temperatura utilizando-se um tubo metálico devido ao coeficiente térmico do metal ser maior que o da fibra ótica. Portanto os materiais utilizados na encapsulação do sensor devem ser escolhidos observando essas influências que impactaram no desempenho do sensor.

2.2 MÁQUINAS ELÉTRICAS

Máquinas elétricas de forma geral são dispositivos que convertem energia mecânica em energia elétrica. Uma máquina elétrica pode ser chamada de gerador ou motor dependendo da sua aplicação. Quando este dispositivo é utilizado para transformar energia mecânica em energia elétrica ele está atuando como um gerador e quando aplicado de forma inversa, ou seja, na conversão de energia elétrica em mecânica, é chamado de motor. Dentro de máquinas elétricas ainda existem mais um dispositivo que integra este grupo, que é o transformador, este dispositivo de forma geral tem a função de elevar ou abaixar o nível de tensão, atuando em corrente alternada. O transformador, também classificado como uma máquina elétrica estática e gerador e motor como rotativas. Estes, são tratados dentro do mesmo grupo devido as semelhanças de seu princípio funcionamento que é fundamentado no fenômeno da indução eletromagnética (FITZGERALD, 2003).

As máquinas elétricas estão fortemente presentes desde indústrias até equipamentos simples encontrados em casas (FITZGERALD, 2003). Podemos encontrar máquinas elétricas em geladeiras, aspiradores de pó, processadores de alimentos, ventiladores e muitos outros eletrodomésticos. Já nas indústrias, os motores são responsáveis por gerar força motriz necessária para quase todo tipo de equipamento.

2.2.1 Falhas em Máquinas

As falhas em máquinas podem ocorrer por diversas causas, algumas por falhas de operação e outras por falta de supervisão do funcionamento do dispositivo. Falhas podem ser oriundas de inconsistências nos materiais e dispositivos do próprio equipamento, devido a carga na qual a máquina está aplicada, como consequência do ambiente e atmosfera, instabilidade e parâmetros incorretos no sistema de alimentação, aplicação e operação inadequados (BULGARELLI, 2006; BECHARA, 2010). Entre as principais causas de falhas pode se destacar (BULGARELLI, 2006):

- Falta entre fases;
- Sobre carga ou rotor travado;
- Reversão de fases;
- Desbalanceamento das correntes ou tensões;
- Subtensão ou sobretensão;

- Repartida ou partida quando o motor ainda está quente;
- Condições ambientais (umidade, temperatura, sujeiras, atmosferas explosivas)
- Falhas no isolamento dos enrolamentos;
- Falhas na ventilação;
- Falhas mecânicas gerais;

Portanto, ao se utilizar uma máquina elétrica deve ser observado situações com as citadas a cima, realizando uma análise crítica do que são requisitos mínimos para a correta operação e requisitos que podem aumentar a confiabilidade do dispositivo. A confiabilidade do dispositivo aumentara proporcionalmente a medida que se tem controle de parâmetros de operação da máquina. Podendo se aplicar dispositivos de segurança que atuem de forma preventiva, com relés de sobre corrente e proteção térmica, ou equipamento com um nível maior de inteligência capaz de atuar com base em múltiplos parâmetros, como motores com controladores que podem identificar a temperatura dos enrolamentos considerando a temperatura ambiente e permitindo somente a repartida ou partida do motor quando a temperatura dos enrolamentos atingir uma valor no qual a corrente de partida não danifique a isolação das bobinas (BULGARELLI, 2006).

2.2.2 Mapeamento térmico

A determinação e medição destes parâmetros térmicos podem ser realizados de diversas maneiras, é possível citar modelos matemáticos baseados em elementos finitos (YIXIAN, 2011), métodos de termográfica (FERREIRA, 2009), com base em parâmetros elétricos (WANG, 2015) e aplicando sensores de fibra ótica (MOHAMMED, 2016; SOUZA, 2011).

Máquinas elétricas possuem grande dependência da temperatura em seu funcionamento, onde a elevação da temperatura pode significar uma redução na eficiência, operação fora dos parâmetros nominais, falhas em isolação de seus enrolamentos e redução da vida útil. Com isso, são realizados estudos para determinar a temperatura interna em maquinas elétricas com base em parâmetro de corrente, tensão e resistências, afim de definir um modelo térmico (WANG, 2015; SOUZA, 2011). Também existem trabalhos voltados para a instrumentação de máquinas com sensores

internos para levantar parâmetros de temperatura e consequentemente atrela-los a parâmetros de sua operação e dimensionais de seus materiais (MOHAMMAD, 2016).

A determinação da temperatura dos enrolamentos e partes internas de máquinas elétricas através de modelos matemáticos traz somente valores médios e aproximados, que no caso de monitoramento em tempo real não contribui efetivamente para se determinar pontos específicos que estejam com elevadas temperaturas e possam causar falhas (ZHANG, 2015). Por outro lado, sensores convencionais quando posicionados no interior de máquinas elétricas podem sofrer com a influência dos campos eletromagnéticos e afetar o seu funcionamento (ZHANG, 2015).

Em (SOUZA, 2011), foi realizado um extenso trabalho a fim de validar o um modelo térmico de um motor de indução, para isto, foi realizado a instrumentação do motor com sensores de temperatura baseado em redes de Bragg em fibra ótica, distribuídos na parte interna. Com os resultados experimentais e simulações com base nos parâmetros do motor foi apresentado um modelo matemático de modelagem térmica do motor de indução.

Então, percebe-se que os esforços no levantamento de mapas térmicos de máquinas são focados na busca de parâmetros de operação para um melhor dimensionamento de forma a atender as suas necessidades de aplicação, evitando falhas inesperadas e aumentando a eficiência.

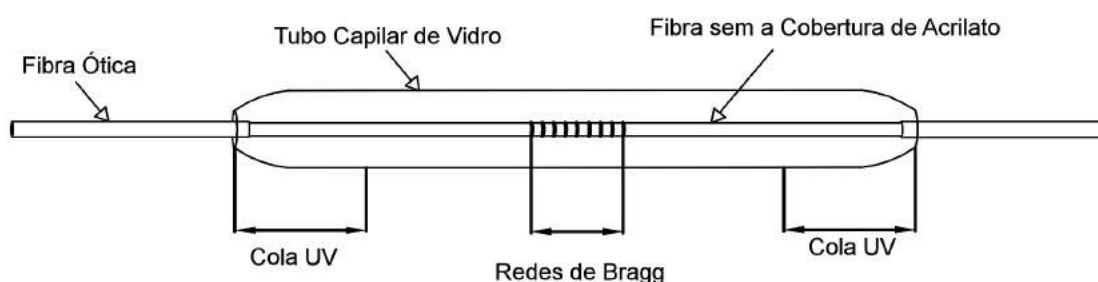
3 DESENVOLVIMENTO

3.1 ENCAPSULAMENTO

O encapsulamento estudado neste trabalho tem o propósito principal de oferecer maior robustez ao sensor, permitindo maior maneabilidade e resistência mecânica. A escolha dos materiais utilizados e processos foram escolhidos de forma a minimizar as interferências entre o sensor e os materiais. Essas interferências, são causadas pelo diferente coeficiente térmico de dilatação dos materiais que podem induzir tensões mecânicas durante a dilatação/contração dos mesmos. Por este motivo, foi utilizado um tubo capilar de vidro e cola UV, especial para vidros, que possuem o mesmo coeficiente térmico de dilatação da sílica que compões a fibra ótica.

Na figura 4, encontra-se um esquema ilustrativo, que não esta em escala, do sensor encapsulado com os respectivos materiais utilizados.

Figura 4: Esquema do encapsulamento desenvolvido.



Métodos de encapsulamento podem alterar as características de sensibilidade e tempo do sensor (SOUZA, 2011), que devem ser aferidas com o procedimento de calibração que será abordado na sequência (BORTOLOTTI, 2014). Entretanto, com o modelo de encapsulamento proposto espera-se que não haja grandes variações no desempenho do elemento sensível devido ao processo de encapsulamento, fazendo com que o sensor permaneça com sua sensibilidade original. Todavia, é esperado que haja uma redução do tempo de resposta, essa redução não trará grandes prejuízos para o sensor, pois os eventos de variação de temperatura são considerados eventos lentos e não necessitam uma elevada taxa de aquisição.

Durante a confecção do sensor, tomou-se o cuidado para que a cola UV estivesse diretamente em contato com a superfície da fibra ótica sem o acrilato, pois o este possui uma baixa resistência mecânica e pode ser arrancado com uma força relativamente baixa.

Portanto, aplicando-se a cola diretamente sobre a superfície de sílica haverá uma melhor adesão entre o vidro e a fibra ótica.

O tubo capilar utilizado possui um diâmetro externo de 1,6mm e interno de 1,1mm e para um melhor posicionamento do sensor foi necessário reduzir o diâmetro das extremidades do tubo, e assim, garantir que a fibra estivesse localizada ao centro do tubo. O diâmetro das extremidades do tubo foi reduzido com o aquecimento das pontas do tubo que ao se fundir, naturalmente reduz o seu diâmetro. Este procedimento é importante, pois durante a dilatação/contração térmica poderia ocorrer um erro na medição devido a parte sensível do sensor tocar a superfície do vidro ou receber tensões perpendiculares a fibra.

Durante o processo de cura da cola, é necessário aplicar uma luz UV por alguns minutos para que a cola se funda. Nesta etapa também é importante garantir que a fibra permaneça tensionada, pois curvaturas na fibra podem afetar o funcionamento do sensor por não garantir que seu deslocamento seja linear.

O desenvolvimento do encapsulamento, envolve diversas variáveis que podem afetar negativamente o funcionamento do sensor. Desta forma, se faz necessário a realização de diversos experimentos afim de se obter um procedimento que satisfaça os requisitos do sensor e que a sua aplicação seja realizada de forma confiável. Como resultado destes estudos e experimentos, chegou-se a um protótipo, mostrado na figura 5.

Figura 5: Protótipo do encapsulamento.



Na busca por aumentar a robustez e resistência mecânica do sensor foi realizado um experimento adicional, no qual a fibra foi revestida por um tubo de teflon específico para a aplicações em fibra ótica e a sua conexão com o tubo de vidro foi feita com um tubo de PVC termo contrátil. Entretanto, devido a característica do tubo termo contrátil, que é facilmente moldado com elevação da temperatura, o modelo foi descartado. Pode se verificar o resultado deste modelo na figura 6, onde alteração do formato do termo contrátil durante o processo de calibração, fez com a fibra se curvasse dentro do tubo e inutilizando o sensor.

Figura 6: Protótipo do encapsulamento com deformações causadas pelo termo contrátil.



Portanto, o protótipo da figura 5 foi escolhido para se dar sequência no desenvolvimento da instrumentação do motor elétrico, uma vez que o mesmo seja validado durante o procedimento da calibração que irá garantir que o sensor está funcionando como esperado.

3.2 CALIBRAÇÃO

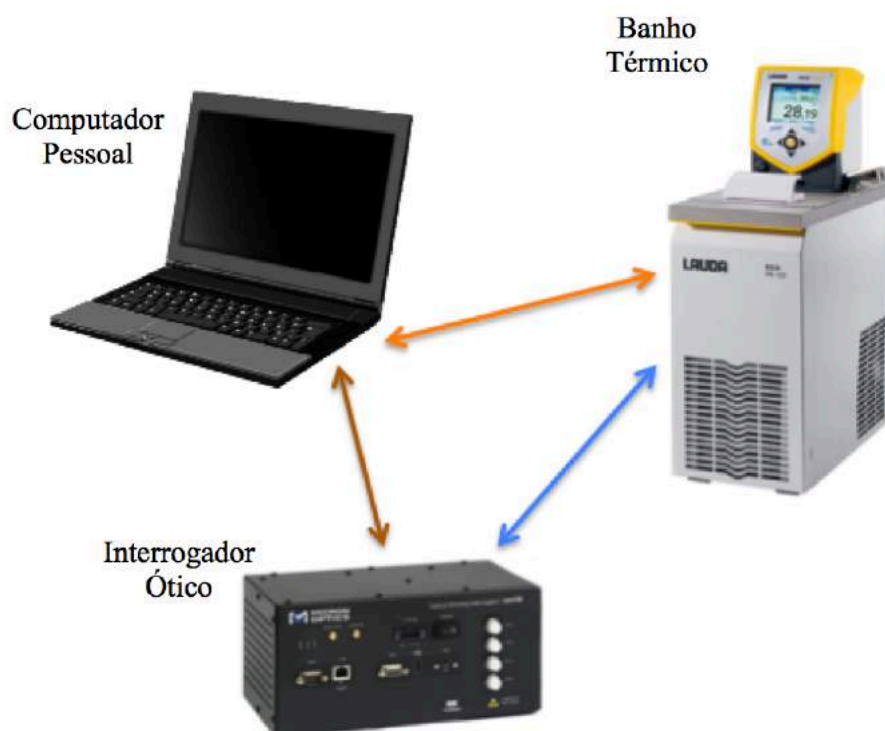
A calibração é uma etapa fundamental no desenvolvimento de um sensor, pois é onde atribui-se um significado para um valor que até então não havia nenhum significado, permitindo que o mesmo seja utilizado como um sensor (ALBERTAZZI, 2010). Neste trabalho a calibração do sensor, além de cumprir sua função intrínseca, terá o objetivo de validar o funcionamento do sensor. Uma vez o sensor calibrado, seu comportamento poderá ser verificado e comparado com sensores FBG's sem encapsulamento e, desta forma, realizar uma análise crítica dos resultados obtidos.

3.2.1 Sistema de calibração

Neste trabalho será utilizado o sistema de calibração de acordo com a figura 7, onde se encontra um esquema do arranjo experimental utilizado.

O banho térmico tem a função de ser o padrão de referência de temperatura. O interrogador ótico tem a função de fazer a leitura do sinal refletido pelos sensores, que estão dentro do banho térmico. Por final o computador, realiza o controle do banho térmico de acordo com os parâmetros de calibração e recebe os dados provenientes do interrogador ótico.

Figura 7: Esquema do sistema de calibração.



3.2.1 Determinação das incertezas

A determinação das incertezas do processo de caracterização dos sensores é uma etapa de grande importância pois possibilita realizar uma análise qualitativa dos resultados obtidos. Além de ser necessária para identificar se o sensor utilizado está dentro da classe de precisão requerida para a sua aplicação. As incertezas são divididas em incertezas do tipo A, que são derivadas do processo de matemático, e incertezas do tipo B, que são as incertezas associadas aos instrumentos utilizados (ALBERTAZZI, 2010).

Inicialmente deve-se calcular a média aritmética para cada valor de temperatura e comprimentos de onda obtidos. Na sequência, calcula-se o desvio padrão utilizando a equação (3.1) com os valores médios obtidos.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.1)$$

onde n é o número de amostras, x_i valor da amostra obtido e \bar{x} média aritmética.

A partir dos valores médios de temperatura e comprimento de onda será calculado os coeficientes da reta de regressão linear. A partir da determinação dos coeficientes da

reta é possível atribuir um valor de temperatura para cada comprimento de onda, através da equação determinada.

A primeira fonte de incerteza é devido à dispersão das amostras do sensor FBG, incerteza do tipo A, calculada através da equação (3.2). Utiliza-se somente apenas o maior desvio padrão.

$$u_1 = \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (3.2)$$

onde n é o número de amostras e S o desvio padrão.

A segunda fonte de incertezas vem da resolução da regressão linear (para eixos x , y e inclinação da reta). A partir da equação (3.4) é possível calcular a incerteza do coeficiente angular pela equação (3.5) e a incerteza da ordenada na origem pela equação (3.6), ambas do tipo A.

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{n-1}{n-2} (S_y^2 - b^2 S_x^2)}, \quad (3.4)$$

$$u_2 = \frac{S_{y/x}}{S_x \sqrt{n-1}}, \quad (3.5)$$

$$u_3 = \pm \frac{S_{y/x}}{\sqrt{n}}, \quad (3.6)$$

onde n é o número de pares de valores (x , y), S_y o desvio padrão da grandeza dependente (do comprimento de onda), S_x é o desvio padrão da grandeza independente (temperatura do banho térmico) e b o coeficiente dependente da reta $a+bx$.

Além disso, ainda é necessário calcular mais uma incerteza do tipo A, a incerteza determinada pela interpolação de um novo valor de y a partir de x , calculado através da equação (3.7).

$$u_4 = \pm S_{y/x} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)S_x^2}} \quad (3.7)$$

Para o banho térmico, incerteza do tipo B, é utilizado o valor da resolução do instrumento (R_b) e calcular-se a incerteza pela expressão (3.8).

$$u_5 = \frac{R_b}{2\sqrt{3}} \quad (3.8)$$

Para determinar a incerteza do interrogador ótico, também do tipo B, é utilizado o valor da resolução do instrumento (R_i) e calcula-se a incerteza pela expressão (3.9).

$$u_6 = \frac{R_i}{2\sqrt{3}} \quad (3.9)$$

O cálculo da incerteza combinada é denominado pelo desvio-padrão resultante da ação combinada das componentes aleatórias de todas as fontes de incertezas que afetam um processo de medição. Utiliza-se a equação (3.10) para calcular o seu valor.

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} \quad (3.10)$$

O cálculo dos graus de liberdade deve ser associado a incerteza padrão do número de graus de liberdade com que foi estimada. O número de graus de liberdade reflete o grau de segurança com que a estimativa do desvio padrão é conhecido. A equação (3.11) é utilizada para calcular os graus de liberdade de estimativa da incerteza-padrão do tipo A, sendo que n é a quantidade de medições efetuadas. Para as incertezas do tipo B, não é necessário o cálculo dos graus de liberdade, pois considera-se que o equipamento esteja calibrado, e assim, seu valor de grau de liberdade é infinito.

$$v = n - 1 \quad (3.11)$$

Entretanto, os graus de liberdade da incerteza combinada precisam ser calculados em conjunto, pois nessa incerteza todos os graus de liberdade de todas as fontes de incerteza são unificados. Para esse cálculo, é utilizado o valor de graus de liberdade de cada fonte de incerteza. Então, a equação de Welch-Satterthwaite (3.12) é utilizada para se encontrar o grau de liberdade da incerteza combinada.

$$v_{ef} = \frac{u_c^4}{\frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \frac{u_3^4}{v_3} + \frac{u_4^4}{v_4}} \quad (3.12)$$

onde v_{ef} é chamado de graus de liberdade efetivos da incerteza combinada, u_1 a u_4 são as incertezas, e v_1 a v_4 são os graus de liberdade obtidos para cada uma das incertezas do tipo A calculadas.

O cálculo da incerteza expandida é o intervalo dentro do qual para uma probabilidade de 95%, espera-se encontrar a componente aleatória dos erros de um processo de medição. Para se encontrar o valor dessa incerteza, utiliza-se a equação (3.13).

$$U = t u_c, \quad (3.13)$$

onde t é o coeficiente da distribuição t-Student correspondente ao número de graus de liberdade efetivos, ou seja, o valor obtido a partir da equação (3.10) e a 95% de probabilidade. A tabela 1 fornece os coeficientes da distribuição t-Student.

Tabela 1 - Coeficientes da distribuição t-Student. A tabela apresenta os valores de faixa de abrangência/probabilidade.

Graus de Liberdade	σ	$1,96\sigma$	$2,00\sigma$	$2,58\sigma$	$3,00\sigma$
	68,27%	95%	95,45%	99,00%	99,73%
1	1,837	12,706	13,968	63,656	235,811
2	1,321	4,303	4,527	9,925	19,206
3	1,197	3,182	3,307	5,841	9,219
4	1,142	2,776	2,869	4,604	6,62
5	1,111	2,571	2,649	4,032	5,507
6	1,091	2,447	2,517	3,707	4,904
7	1,077	2,365	2,429	3,499	4,53
8	1,067	2,306	2,366	3,355	4,277
9	1,059	2,262	2,32	3,25	4,094
10	1,053	2,228	2,284	3,169	3,957

Fonte: Fundamentos de Metrologia, Albertazzi (2010)

Desta forma fica apresentado o procedimento a ser utilizado para o processo de calibração e levantamento das incertezas das medidas obtidas.

3.2.2 Resultados

Foram calibrados dois sensores encapsulados e um sem encapsulamento afim de verificar e validar o desempenho do sensor encapsulado. O sistema de calibração foi programado com os seguintes parâmetros.

- Número de Degraus: 6.
- Tempo de Duração do Degrau: 5 Minutos.
- Temperatura Inicial: 20°C.
- Temperatura do Degrau: 10°C.
- Temperatura Máxima: 70°C.
- Número de Ensaios Realizados: 4.
- Taxa de aquisição: 1Hz.
- Tempo total aproximado utilizado: 6hrs.
- Variação utilizada: 0,05°C.

Portanto, este processo de calibração foi repetido 5 vezes para os pontos de temperatura selecionados, iniciando em 20°C e finalizando em 70°C com degraus de 10°C. Para cada degrau de temperatura, foi imposto que o valor de da variação da

temperatura deveria ser de $0,05^{\circ}\text{C}$, ou seja, a aquisição só ocorre quando a temperatura está dentro deste limite de variação. A duração de cada degrau foi de 5 minutos com aquisição de um ponto por segundo (taxa de aquisição 1Hz), a partir destes pontos é calculado a média aritmética que irá atribuir um comprimento de onda para cada degrau de temperatura. Desta forma, é possível atribuir um comprimento de onda para um determinado ponto de temperatura. Uma vez um finalizado um estepe o banho irá ajustar a temperatura para o próximo nível de temperatura e desta forma o processo de calibração é executado de forma interativa até completar todos os ciclos programados.

O resultado da calibração do sensor 1, o qual foi encapsulado, é apresentada no gráfico da figura 8. O gráfico traz o valor da média aritmética dos quatro valores obtidos para cada ponto de temperatura, com os seus respectivos desvios padrões e a equação da reta. A partir da equação da reta, pode se verificar que a sensibilidade do sensor 1 é igual a $10 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$. Pode-se observar pelos valores apresentados na tabela 2 que houve uma boa repetitividade e estabilidade durante a calibração.

Figura 8: Gráfico do resultado da calibração do sensor 1 encapsulado.

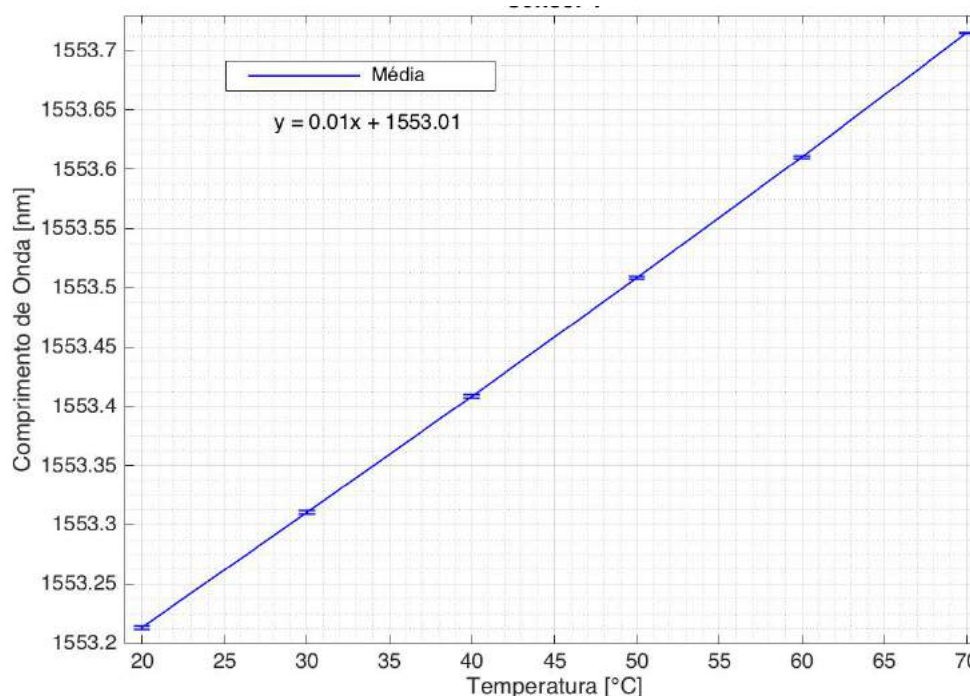


Tabela 2 – Dados obtidos na calibração do sensor 1.

Temperatura (°C)	Comprimento de onda médio (nm)	Desvio Padrão (nm)
20,0	1553.213	0.001
30,0	1553.310	0.001
40,0	1553.408	0.002
50,0	1553.508	0.001
60,0	1553.610	0.001
70,0	1553.715	0.000

Ainda para o sensor 1, foi realizado o levantamento das incertezas de acordo com o procedimento detalhado no item 3.2.1. A partir deste cálculo é possível determinar qual a incerteza expandida e fazer um comparativo entre a temperatura real e a temperatura medida com a sua respectiva incerteza, assim como mostrado no gráfico da figura 9. Na tabela 3, é apresentado os valores das incertezas obtidas, de forma que o valor da medida a ser realizada com esse sensor tem a possibilidade de ter um erro associado de mais ou menos 0,5 °C, no qual foi o maior valor encontrado para a incerteza.

Figura 9: Gráfico do resultado da determinação das incertezas do sensor 1 encapsulado.

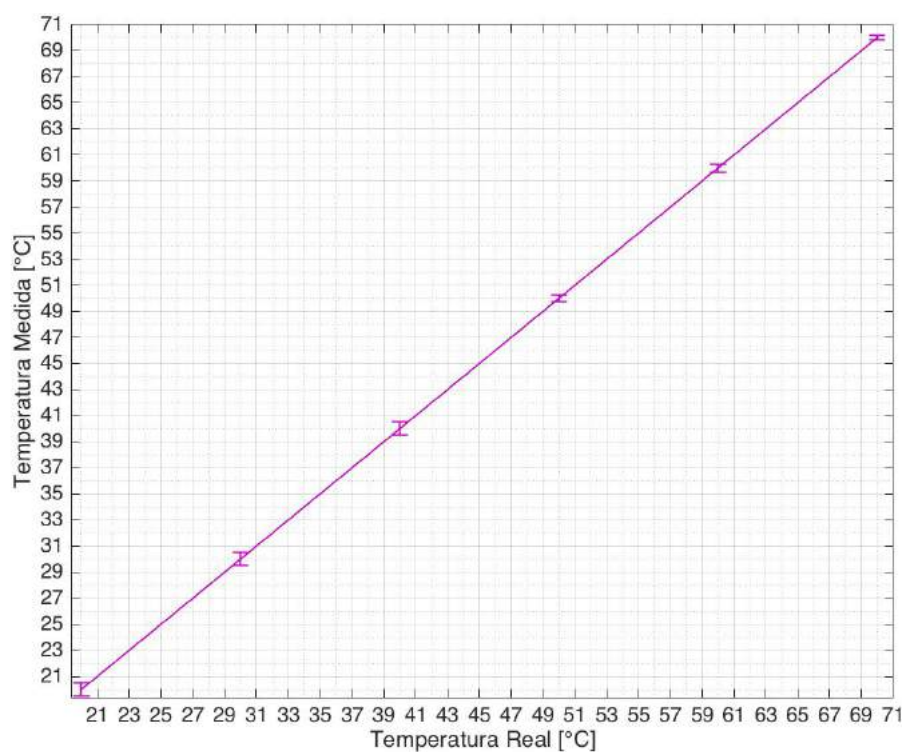


Tabela 3 – Dados obtidos na determinação das incertezas do sensor 1.

Temperatura Medida (°C)	Erro \pm (°C)
20.00	0.50
30.00	0.50
40.00	0.50
50.00	0.29
60.00	0.29
70.00	0.15

O mesmo processo de calibração e levantamento das incertezas foi realizado para o sensor 2, que também foi encapsulado. O resultado de calibração do sensor 2, apresentado no gráfico da figura 10 e seus valores encontram-se na tabela 4. A partir da equação da reta, pode se verificar que a sensibilidade do sensor 2 é igual a 10 pm/°C. Pode se observar que este sensor 2 apresentou um comportamento menos estável em relação ao sensor 1, quando comparado os valores do desvio padrão. Para o sensor 1 o maior valor de desvio obtido foi de 0,002 nm enquanto o sensor 2 apresentou um valor máximo de 0,005 nm.

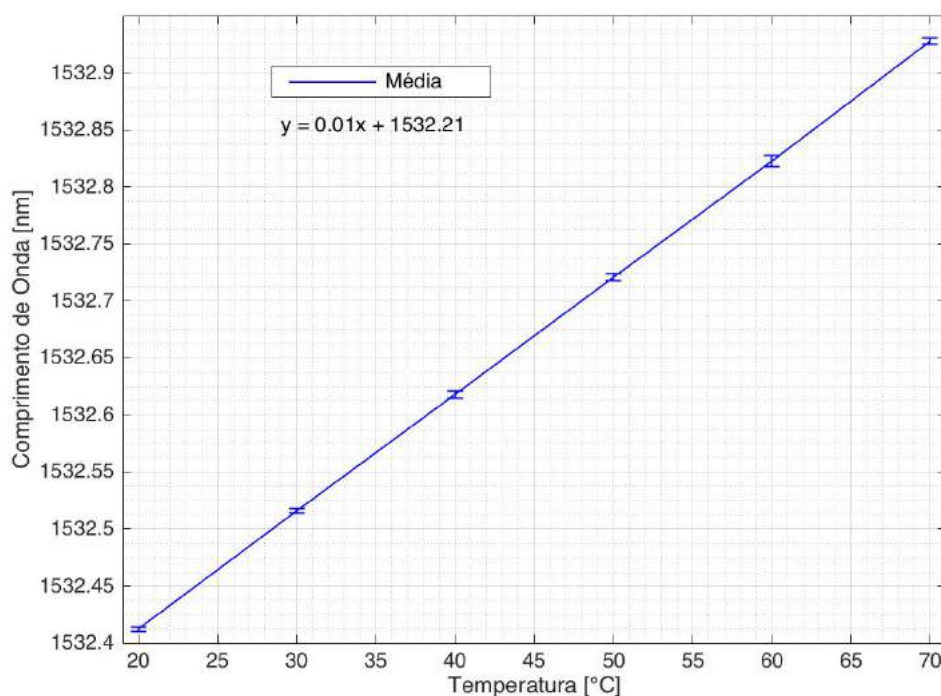
Figura 10: Gráfico do resultado da calibração do sensor 2 encapsulado.

Tabela 4 – Dados obtidos na calibração do sensor 2.

Temperatura (°C)	Comprimento de onda médio (nm)	Desvio Padrão (nm)
20,0	1532,413	0,002
30,0	1532,516	0,002
40,0	1532,618	0,003
50,0	1532,721	0,003
60,0	1532,823	0,005
70,0	1532,928	0,003

Conseqüentemente, os valores encontrados para as incertezas do sensor 2, são maiores em relação ao sensor 1, devido a uma maior dispersão nos valores medidos. O gráfico da figura 11 e tabela 5 trazem os resultados obtidos para o procedimento de levantamento da incerteza associada a medição realizada pelo sensor 2. Portanto, o valor máximo da incerteza, que será o valor do erro é de mais ou menos 1,58 °C.

Figura 11: Gráfico do resultado da determinação das incertezas do sensor 2 encapsulado.

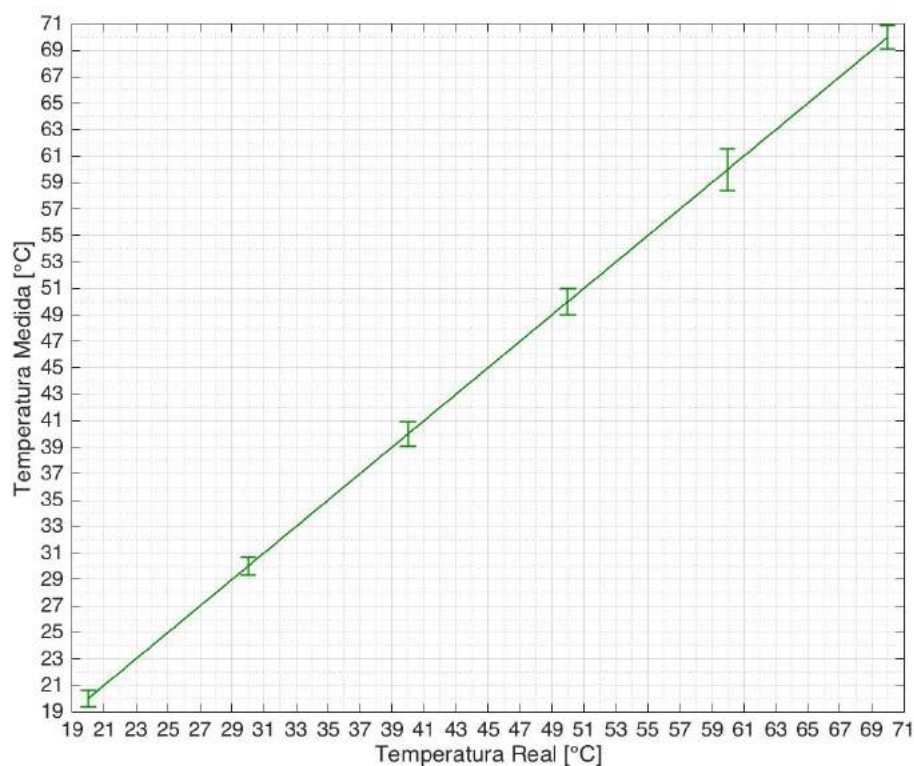


Tabela 5 – Dados obtidos na determinação das incertezas do sensor 2.

Temperatura Medida (°C)	Erro ± (°C)
20,00	0,63
30,00	0,65
40,00	0,91
50,00	1,00
60,00	1,58
70,00	0,89

Os mesmos passos foram realizados para o sensor 3, assim como foi realizado para os sensores 1 e 2, porém este sensor não foi encapsulado. Os resultados obtidos na calibração são apresentados no gráfico da figura 12 e tabela 6, pode ser verificado que este sensor obteve resultados similares aos outros dois. Mostrando que os sensores encapsulados não sofreram interferências significantes com relação a sua estabilidade e repetitividade, quando comparados ao sensor 3, sem encapsulamento.

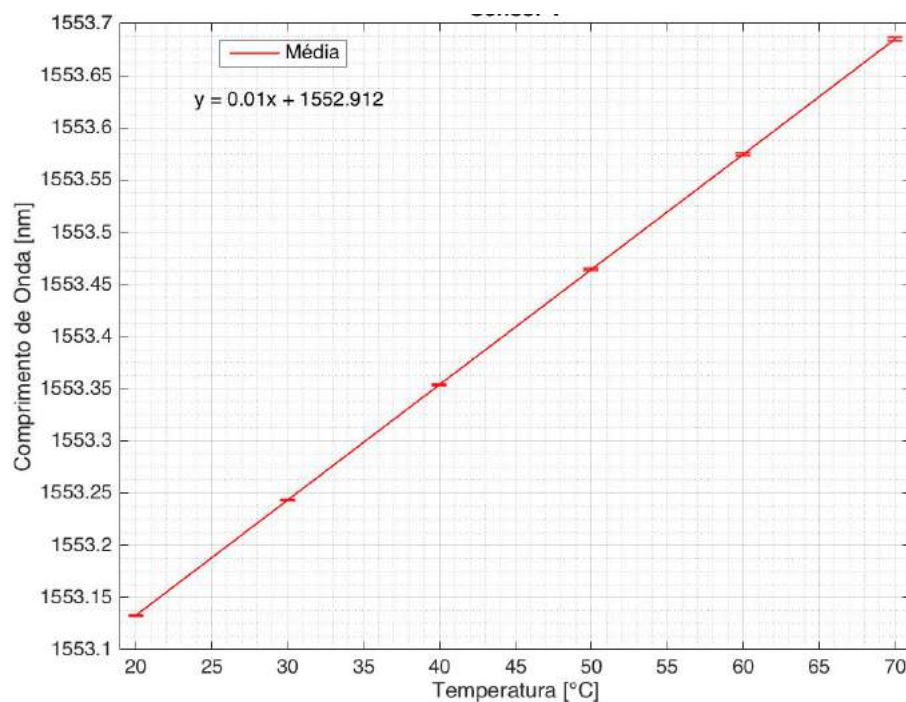
Figura 12: Gráfico do resultado da calibração do sensor 3 sem encapsulamento.

Tabela 6 – Dados obtidos na calibração do sensor 3 sem encapsulamento.

Temperatura (°C)	Comprimento de onda médio (nm)	Desvio Padrão (nm)
20,0	1553,133	0,000
30,0	1553,243	0,000
40,0	1553,354	0,000
50,0	1553,464	0,001
60,0	1553,575	0,001
70,0	1553,685	0,002

Por fim, o levantamento das incertezas do sensor 3 também foram determinadas. Pode ser verificado o seu resultado no gráfico da figura 13 e tabela 7. O erro, devido as incertezas é de mais ou menos $0,53^{\circ}\text{C}$.

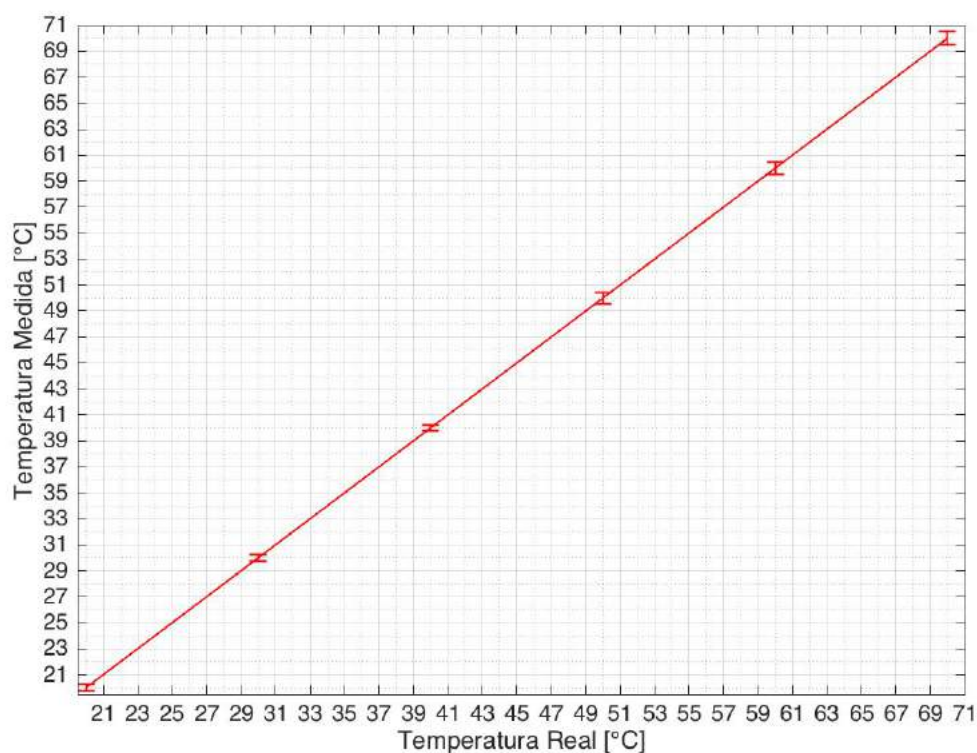
Figura 13: Gráfico do resultado da determinação das incertezas do sensor 3 sem encapsulamento.

Tabela 7 – Dados obtidos na determinação das incertezas do sensor 3.

Temperatura Medida (°C)	Erro \pm (°C)
20,00	0,24
30,00	0,24
40,00	0,24
50,00	0,44
60,00	0,45
70,00	0,53

Com o resultado da calibração dos sensores pode ser verificado que os três obtiveram a mesma sensibilidade que é igual a $10 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, ou seja, a sensibilidade do sensor foi mantida. Este resultado já era esperado, pois os materiais utilizados possuem os mesmos valores de dilatação térmica da fibra ótica, o que induz a afirmar que o sistema composto pela fibra ótica mais tubo capilar de vidro e cola UV se comportaram homogeneamente e obtendo erros aceitáveis para a aquisição de medidas de temperatura.

3.3 MAPEAMENTO TÉRMICO

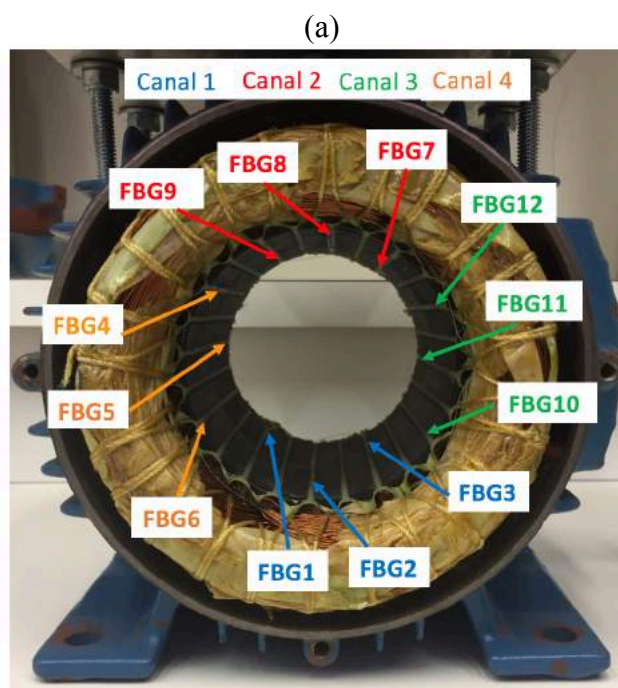
Para a validação do sensor encapsulado o mesmo será utilizado para instrumentar um motor elétrico trifásico de indução e como resultado espera-se apresentar um mapa térmico. Não fará parte desta validação a identificação de nenhum fenômeno ou parâmetro do motor a partir do mapa térmico, aqui será somente realizado uma experimentação afim de demonstrar as limitações e a aplicabilidade do sensor proposto, realizando as devidas considerações acerca do seu desempenho. Desta forma, os resultados serão discutidos, buscando levantar justificativas possíveis para os padrões térmicos encontrados levando em consideração as características do motor.

3.3.1 Instrumentação do motor elétrico

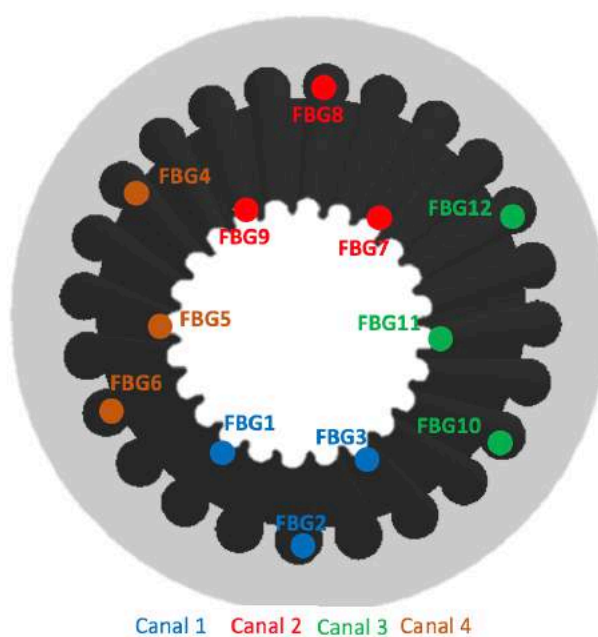
O motor utilizado é um motor elétrico de indução trifásico 220/380 V (Δ / Y), com potência de 5cv e corrente nominal de 13,1/7,58 A. A instrumentação do motor elétrico foi realizada de acordo com esquema da figura 14. Foram utilizados 12 sensores posicionados ao longo de 8 ranhuras do estator do motor que no total é composto por 24 ranhuras. As posições foram selecionadas de forma aleatória, mas respeitando uma

simetria entre os sensores para que posteriormente a formação da imagem térmica fosse facilitada. Também, foi definido a posição dos sensores em um local onde fosse possível operar o motor sem danificar o sensor e motor durante a operação do motor.

Figura 14: Esquema da posição dos sensores FBG instrumentados no motor elétrico: (a) Motor instrumentado, (b) Posição no modelo utilizado para gerar o mapa térmico.

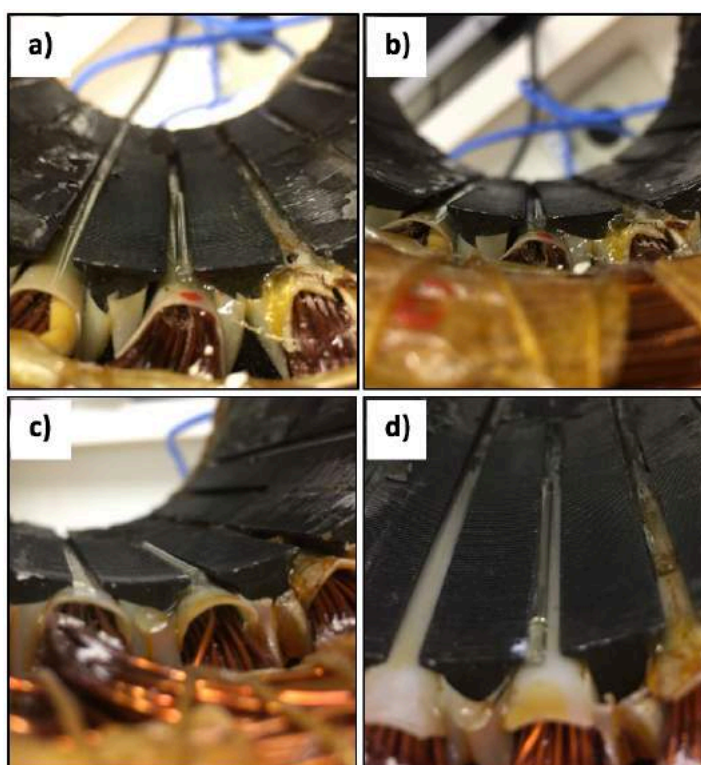


(b)



Inicialmente, quando o encapsulamento foi desenvolvido, foram consideradas que as dimensões do encapsulamento não se tornariam um impeditivo. Desta forma, foram consideradas que as dimensões do encapsulamento eram realmente reduzidas e com base em uma medição amostral das ranhuras de um motor disponível no laboratório no início do trabalho, que o encapsulamento atenderia as dimensões do espaço das ranhuras do estator. Entretanto, estas premissas não se tornaram validas considerando o motor disponível a ser instrumentado. Durante a instrumentação do motor foi verificado que as ranhuras do motor eram irregulares, fazendo com que alguns sensores encapsulados não coubessem nas ranhuras do estator, assim como mostrado na figura 15 (c) e (d). Porém, algumas ranhuras haviam espaço necessário para que o sensor fosse instalado, assim como mostra a figura 15 (a) e (b). Mesmo com este fato, de que alguns sensores não caberiam nas ranhuras e possível seriam danificados com a montagem do rotor, foi realizado a instrumentação do motor selecionando as ranhuras mais profundas e protegendo os sensores com cola epóxi. Porém, não foi obtido sucesso e os sensores foram danificados durante a montagem do rotor.

Figura 15: Posição dos sensores FBG encapsulados nas ranhuras do estator: (a) e (b) ranhuras com profundidade suficiente para acomodar os sensores, (c) e (d) ranhuras com profundidade insuficiente para acomodar os sensores.



Com o intuito de cumprir com os objetivos do trabalho, neste caso, a obtenção do mapa térmico e considerando que a funcionalidade do sensor encapsulado foi verificada com o processo de calibração, foi decidido dar sequência na instrumentação do motor com os sensores sem encapsulamento. Portanto, o motor foi instrumentado como planejado, seguindo as posições indicadas na figura 14. A instrumentação do motor com sensores sem o encapsulamento fez com que a dificuldade e risco de danificar os sensores durante o processo de instrumentação aumentasse significativamente. Além disso, os sensores estarão mais suscetíveis a interferências mecânicas devido a vibrações no interior do motor e a dilatação térmica das chapas de aço-silício que compõem o estator, que serão demonstradas nos resultados dos itens na sequência.

3.3.1 Ensaio de motor a vazio

O ensaio de motor a vazio consiste em colocar o motor em funcionamento sem que seja adicionado uma carga a ele, ou seja, o seu rotor irá girar sem nenhum impedimento (FITZGERALD, 2003). O motor para este ensaio foi ligado em estrela com partida direta, sendo utilizado uma banca trifásica nas dependências do laboratório do SEMAP, na UTFPR. Pode ser verificado na figura 16 a configuração utilizada para o ensaio. Foram utilizados três multímetros para monitorar a tensão das fases, um amperímetro alicate para a medição das correntes das fases e neutro, uma câmera térmica para a verificação da temperatura externa do motor, um interrogador ótico para realizar a aquisição do sinal dos sensores FBG, um notebook para a execução dos softwares de aquisição do sinal do sensor e câmera térmica e o motor instrumentado a ser analisado.

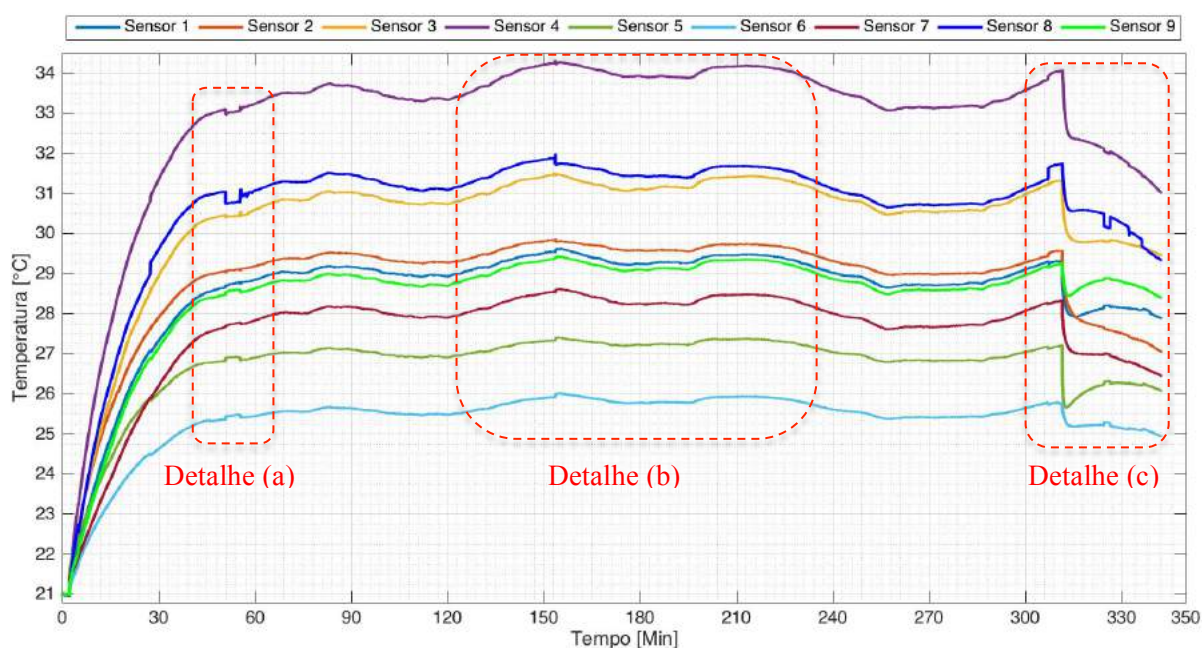
Figura 16: Configuração do ensaio de motor a vazio.



O ensaio teve uma duração aproximada de 5 horas e 30 minutos sendo realizada aquisição dos dados de temperatura ao longo de todo o ensaio, com uma taxa de amostragem de 1Hz. A taxa de aquisição poderia ser feita com amostragem superior, sendo a taxa de aquisição máxima do interrogador igual a 1kHz, porém com uma taxa maior seria possível observar um sinal mais ruidoso devido as vibrações do motor, que podem ser captadas pelo sensor FBG. Além de que as alterações de temperatura não são evento rápidos, tornando a aquisição de um ponto por segundo (1Hz) adequada. Pode ser verificado no gráfico da figura 17 a evolução da temperatura medida por cada sensor ao longo da duração do ensaio. Na figura 17, apenas constam 9 sensores, pois o canal 3 do interrogador ótico estava com intermitências que causaram ruídos e perdas do sinal durante o ensaio.

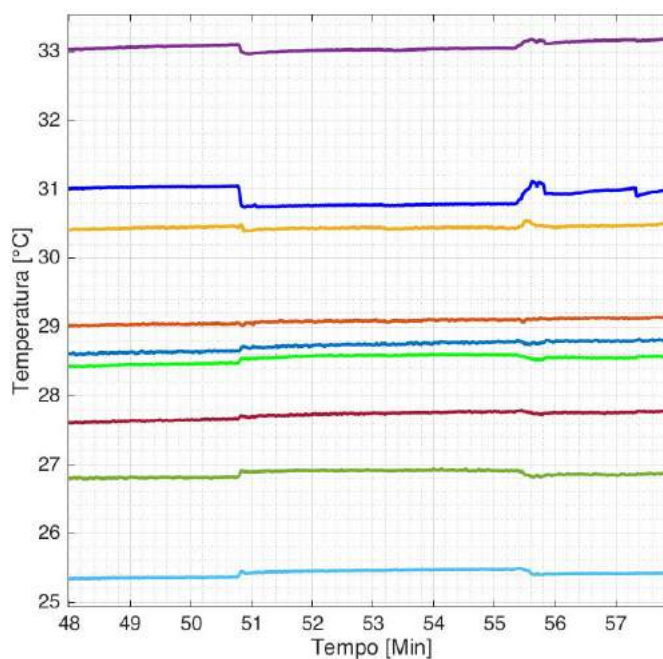
A temperatura do motor atingiu valores de regime após aproximadamente 1 hora de ensaio. Neste gráfico da figura 17, também se nota que há uma variação de aproximadamente 8°C entre o ponto de maior temperatura e o de menor, segundo a NBR7094, norma brasileira sobre especificações de motores (ABNT, 2003) a variação de temperatura entre dois diferentes pontos no interior do motor pode chegar a até 10°C , portanto a variação está dentro do esperado.

Figura 17: Temperatura durante o ensaio de motor a vazio.



No gráfico da figura 17, foram destacados alguns pontos que merecem ser discutidos de forma mais específica. No detalhe (a), o qual foi aproximado e apresentado no gráfico da figura 18, mostra uma variação da temperatura, assim como pode ser observado em outros pontos do ensaio (25 min, 155 min, 310 min, 320 min). Esta variação se deve a uma interferência mecânica, pois durante o ensaio foi necessário girar o motor para que fosse possível obter imagens térmicas com a câmera térmica de diferentes posições. Nota-se que em que alguns sensores a temperatura se elevou e em outros a temperatura foi reduzida, possivelmente porque alguns sensores foram tracionados e outros comprimidos com deslocamento das chapas do estator. Portanto, fica evidente a resposta do sensor a esforços mecânicos, estas influências poderiam ser reduzidas ou evitadas se o sensor estivesse encapsulado. Entretanto, a variação na temperatura por interferências mecânicas atingiu o seu valor máximo de $0,25^{\circ}\text{C}$, próximo do tempo de 325 minutos, o que mostra que apesar do sensor estar exposto a interferências mecânicas, as mesmas não atingiram valores significativos, para este ensaio. Além disso, vale destacar que o erro máximo determinado na seção 3.2.2 para um sensor FBG sem encapsulamento foi de mais ou menos $0,53^{\circ}\text{C}$.

Figura 18: Detalhe (a) figura 17: Interferências mecânicas.



Durante o ensaio foi observado que houve um desbalanceamento nos valores de tensão, causando uma corrente de neutro de aproximadamente 20% do valor da corrente de fase, de acordo como valores apresentados na tabela 8. Como resultado desta variação,

foi possível notar uma variação na temperatura durante o período em que motor já havia atingido sua temperatura de regime, este efeito está destacado no detalhe (b) da figura 17 e apresentado de forma aproximada na figura 19. Esta variação teve um valor máximo de aproximadamente 1,0 °C. Esta alteração na temperatura ocorre como consequência da variação no torque do motor devido o desbalanceamento da tensão. Este mesmo fenômeno foi reportado em (SOUZA, 2011), onde o desbalanceamento nas tensões causou uma oscilação de aproximadamente 0,5 °C.

Figura 19: Detalhe (b) figura 17: Variação devido ao desbalanceamento nas tensões.

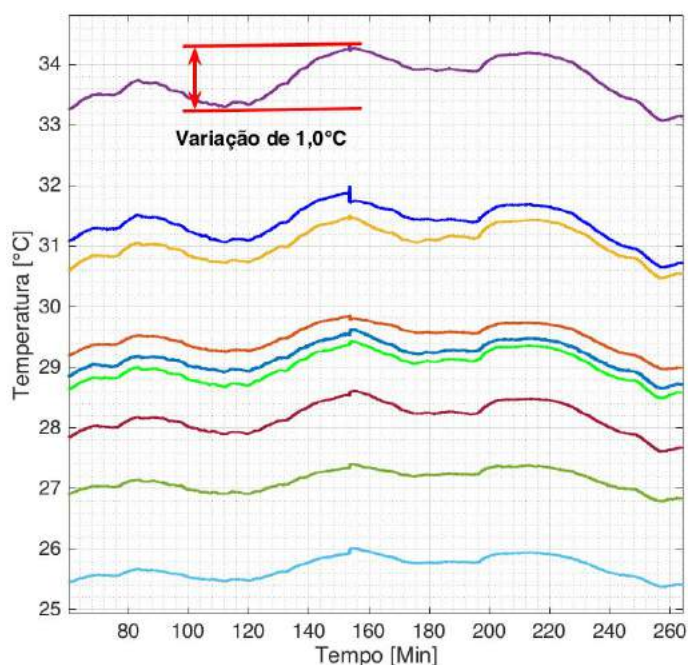


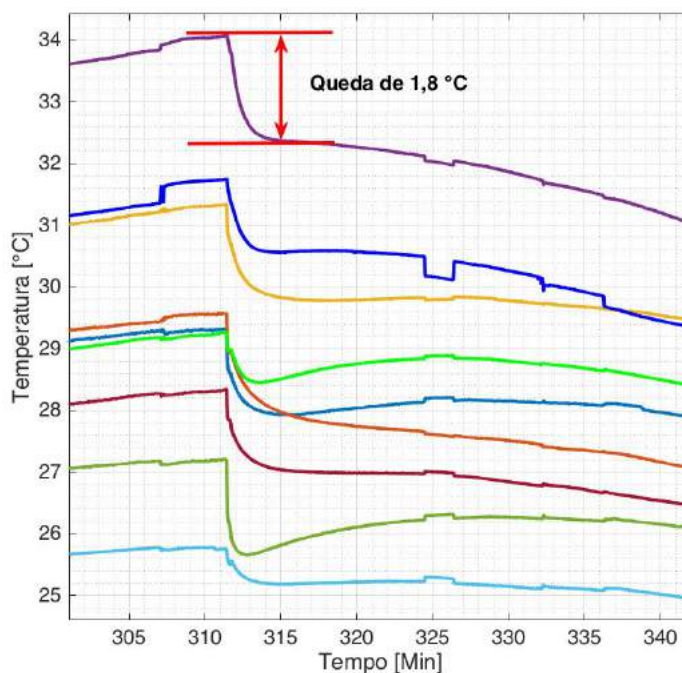
Tabela 8 – Dados obtidos na determinação das incertezas do sensor 3.

Tensão (V)			Corrente (A)			
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Neutro
128,00	127,70	128,20	1,54	1,54	1,39	0,29
128,00	127,80	128,40	1,59	1,44	1,45	0,30
127,60	127,80	127,90	1,41	1,49	1,52	0,32
128,00	128,70	128,70	1,61	1,53	1,51	0,27

No detalhe (c) da figura 17, destacado na figura 20, mostra o momento em que o motor foi desligado. É possível verificar que há uma queda rápida na temperatura de aproximadamente 1,8 °C. Também se nota que há uma homogeneização da temperatura,

com queda da temperatura em alguns pontos e elevação temperatura em outros. Isto sugere que durante o funcionamento do motor de fato há uma distribuição não uniforme da temperatura. Esta distribuição não uniforme pode ter origens elétricas, eletromagnéticas ou até mesmo falhas mecânicas.

Figura 20: Detalhe (c) figura 17: Desligamento do motor.

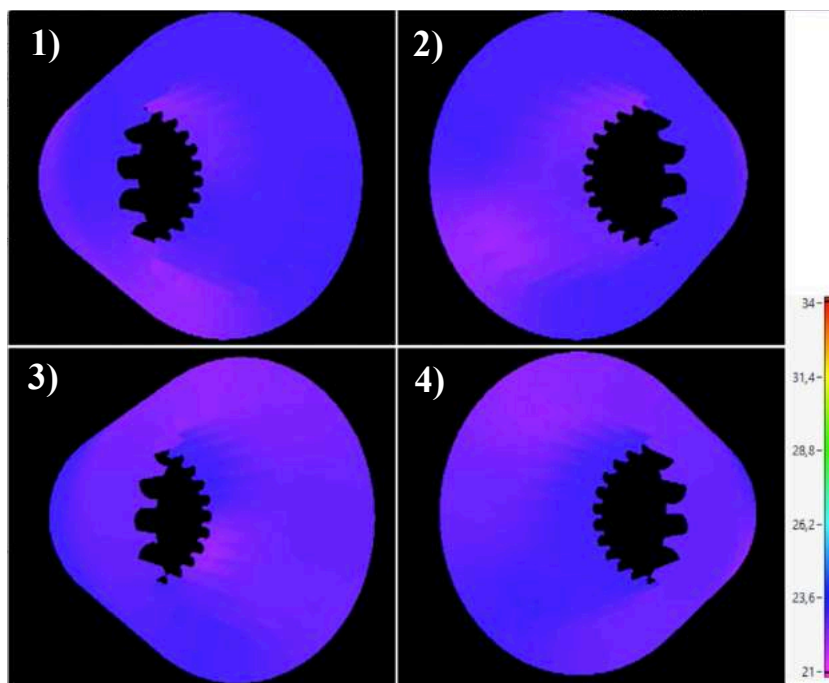


A partir da aquisição de temperatura dos sensores no interior do motor, foi possível apresentar a distribuição térmica ao longo do estator. Esta distribuição será feita através de um mapa térmico que oferece a vantagem de se uma ferramenta que apresenta a distribuição da temperatura de forma visual para o operado da máquina, facilitando a identificação de pontos com diferentes temperaturas. O mapa térmico foi posteriormente processado, porém é possível obter estas imagens em tempo real, considerando somente o atraso devido ao processamento do sinal recebido dos sensores FBG.

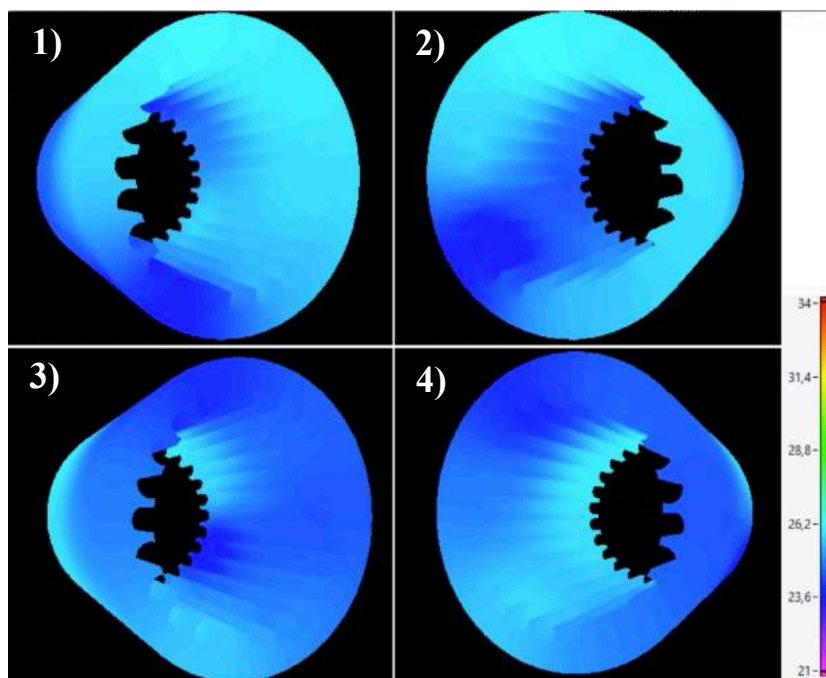
As imagens apresentadas na figura 21 foram obtidas de uma interpolação linear dos sensores distribuídos ao longo do estator, conforme apresentado anteriormente na figura 14 (b). Desta forma, foi obtido um vídeo da evolução da temperatura ao longo das 5 horas 30 minutos de ensaio. Desta forma, as imagens apresentadas na figura 21 são registro capturados durante a execução do vídeo. O mapa térmico apresenta quatro diferentes vistas do estator do motor: 1) vista frontal esquerda; 2) vistas frontal direita; 3) vista posterior esquerda; 4) vistas posterior direita.

Figura 21: Mapa térmico: (a) 1 minuto, (b) 10 minutos, (c) 20 minutos, (d) 30 minutos, (e) 40 minutos, (f) 50 minutos, (g) 90 minutos.

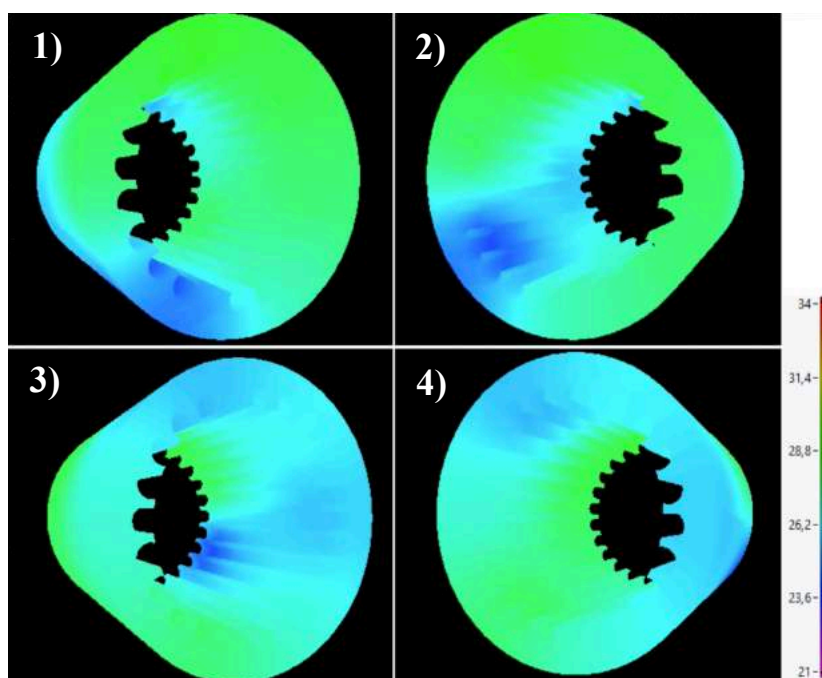
(a)



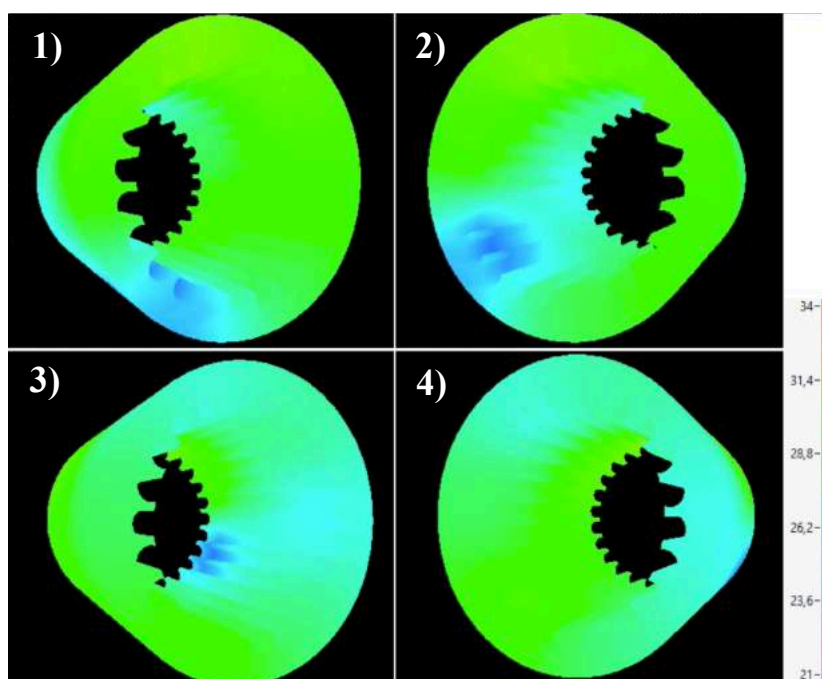
(b)



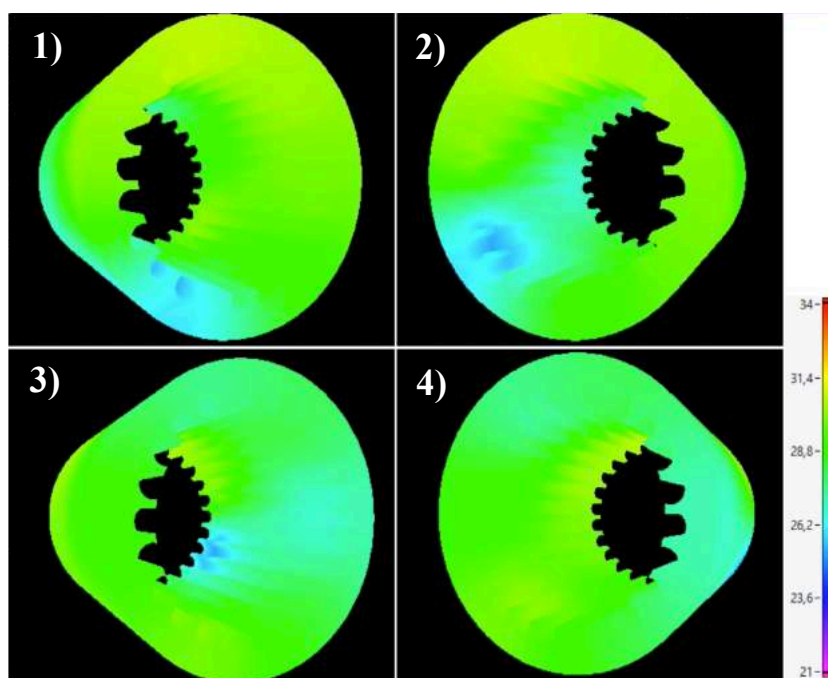
(c)



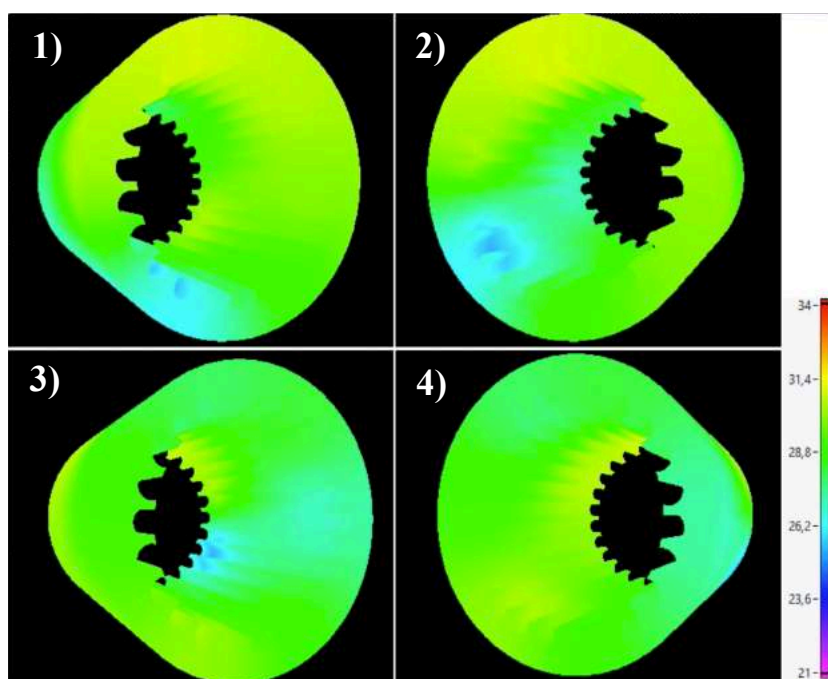
(d)

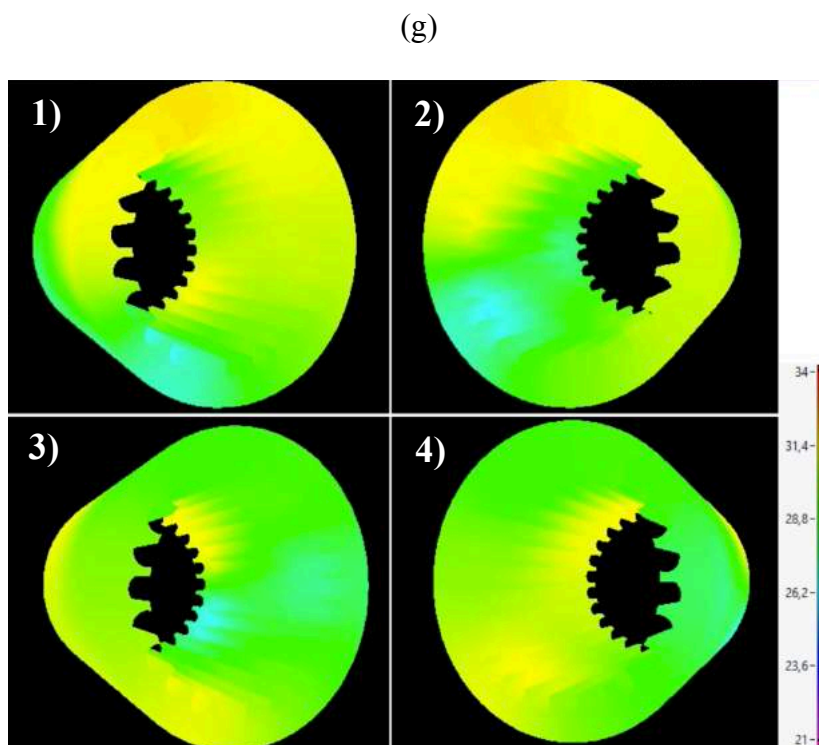


(e)



(f)

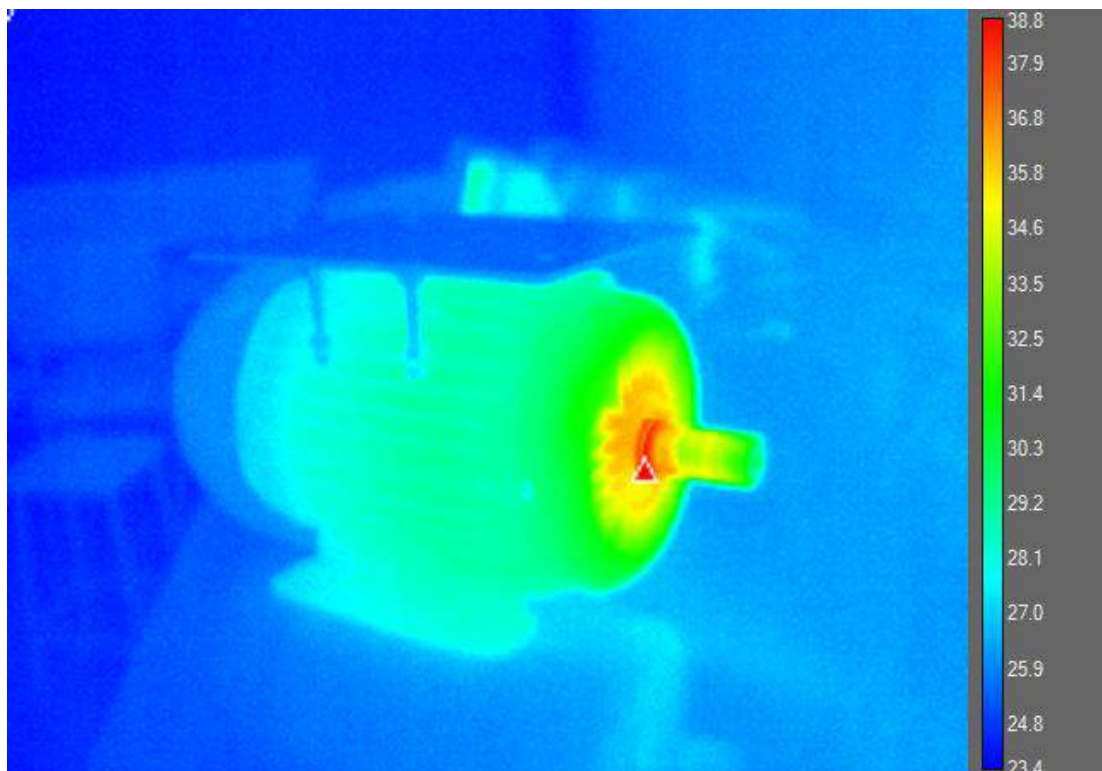




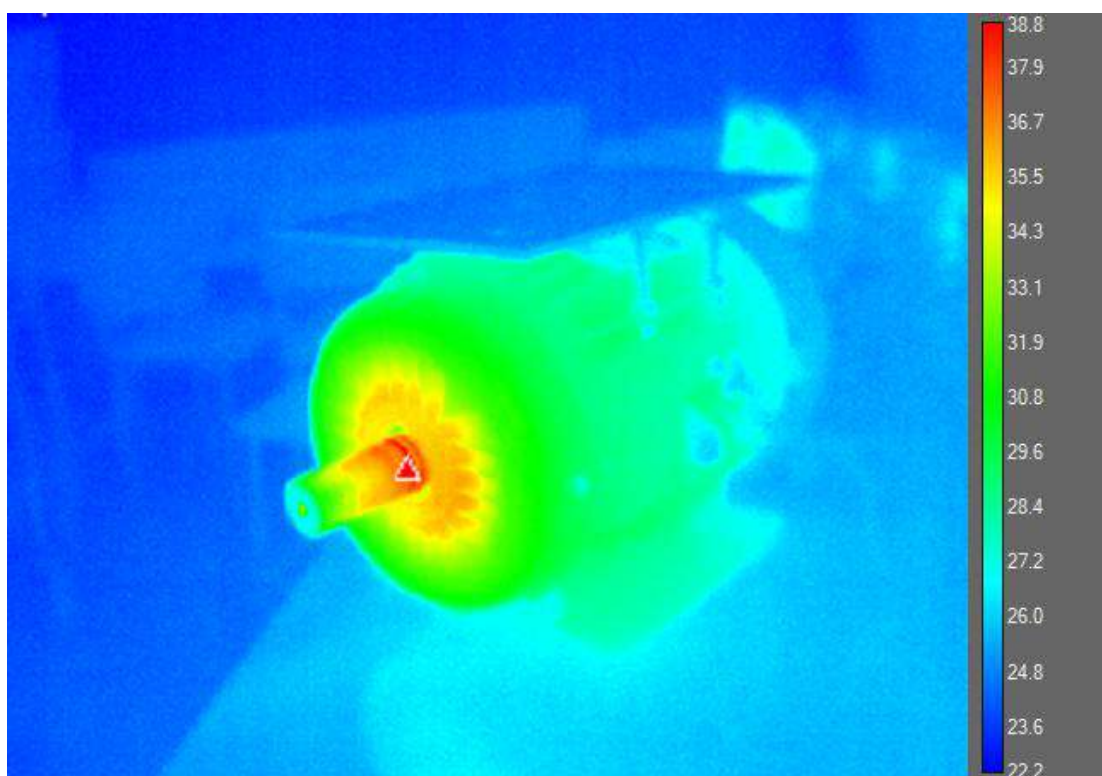
Na figura 22 e 23, encontra-se a imagem térmica capturada pela câmera térmica. O fato de que o motor possui ventilação externa e uma série de elementos que fazem com que o padrão de temperatura interno seja diferente do externo, dificultando a identificação da temperatura de operação interna do motor, apenas observando a parte externa do equipamento. Entretanto, nestas duas figuras, 22 e 23, as quais foram obtidas após a temperatura do motor estar em regime, ou seja, após 1 hora de ensaio, pode-se observar que há uma semelhança com a imagem obtida nos mapas térmicos da figura 21. Esta semelhança, é mais evidentemente na figura 21 (g) onde os menores padrões de temperatura na parte posterior do motor (detalhes 3 e 4) que é a região mais próxima da ventilação. Conseqüentemente, observa-se que a região com a temperatura mais elevada se encontram na parte frontal do motor, que é a região mais distante da ventilação. Portanto, com base nos resultados, é possível afirmar que internamente a distribuição térmica é semelhante a externa, porém devido a ventilação externa e troca de calor com o ambiente a temperatura externa é obviamente menor.

Figura 22: Imagem térmica obtida por câmera térmica: (a) vista da lateral esquerda, (b) vista da lateral direita.

(a)



(b)



3.3.2 Ensaio de “rotor travado”

O ensaio de rotor travado consiste em impedir que o rotor do motor entre em movimento, esta situação pode ser evidenciada na prática quando a carga em que o motor deve suprir é superior à sua potência, fazendo com que o rotor fique travado (FITZGERALD, 2003). Este ensaio, faz com que a corrente se eleve significativamente, e o tempo em que o motor pode operar com esta corrente elevada geralmente está na ordem de segundos. Neste ensaio em específico, o rotor não foi bloqueado e sim removido, o que reproduz uma reação muito semelhante a situação de rotor travado, desta forma, consideramos este ensaio uma simulação muito próxima de uma situação de rotor travado.

O principal objetivo deste ensaio, não foi verificar o funcionamento e identificar parâmetro do motor, mas sim, conseguir visualizar o interior do motor com a câmera térmica. Desta forma, se torna possível comparar o resultado da imagem térmica gerada a partir dos sensores FBG contra o resultado obtido com a câmera térmica de uma forma mais confiável e direta.

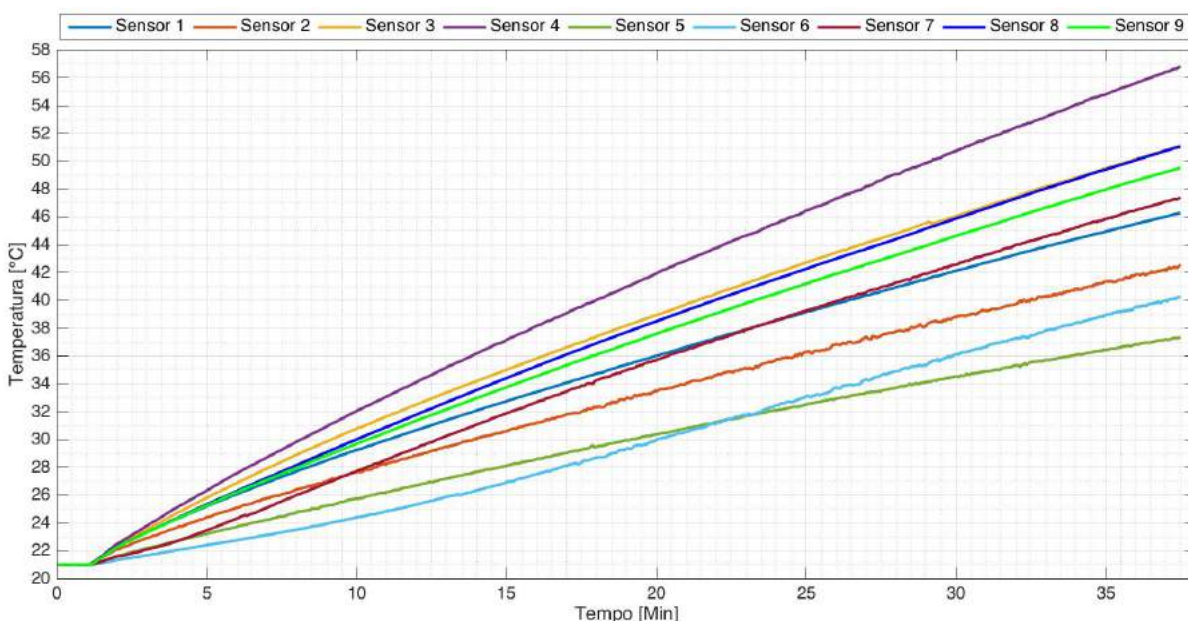
O ensaio foi executado de forma semelhante ao ensaio de motor a vazio do item 3.3.1, utilizando os mesmos equipamentos. Porém, para este ensaio foi necessário alimentar o motor com uma tensão reduzida para que não se ultrapassasse a corrente nominal do motor, e por consequência danificar as bobinas do motor. Para tanto, foi adicionado um variac trifásico e a configuração do ensaio pode ser verificada na imagem da figura 23.

Figura 23: Configuração do ensaio de “rotor travado”.



A corrente nominal do motor quando ligado em estrela é igual a 7,58A, desta forma, a tensão do motor foi ajustada em aproximadamente 15Vca e a corrente do motor por fase ficou a igual aproximadamente 4,5 A. Estes valores, apesar de estarem abaixo dos nominais poderiam danificar o motor caso a temperatura na qual a classe do motor especificada como segura fosse superada. Para o motor ensaiado a sua classe de isolamento é F, o que permite que a sua temperatura máxima de operação seja igual a 155°C. No gráfico da figura 24, pode se observar que a temperatura máxima foi de aproximadamente 57 °C com 37 minutos de ensaio. Como a temperatura neste ensaio se elevou rapidamente não foi necessário estender a duração do ensaio para que fosse possível obter dados suficientes para a analisar o funcionamento do sensor. Além de que continuar o ensaio estaria gerando um estresse térmico que faz com que a vida útil do motor seja reduzida.

Figura 24: Temperatura durante o ensaio de motor a vazio.



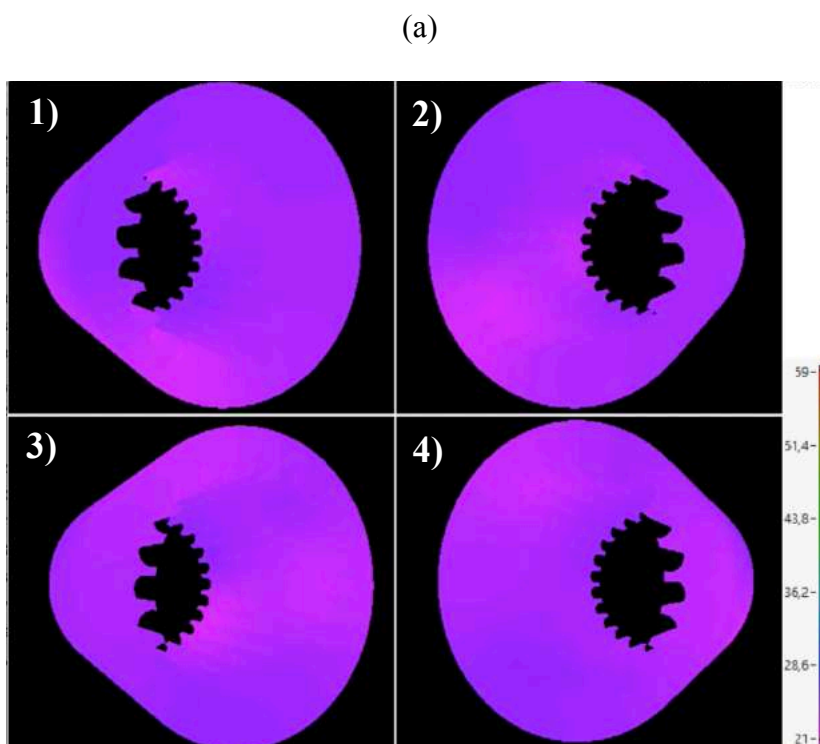
No gráfico da figura 24, nota-se que a temperatura se elevou de forma rápida, se comparado ao ensaio com o motor a vazio. Considerando as temperaturas iniciais e finais do sensor 4, o qual teve a maior temperatura para os dois ensaios, a sua taxa de elevação de temperatura foi de aproximadamente 0,2 °C/min para o ensaio de motor a vazio e 1,0 °C/min para o ensaio de rotor travado. Estas taxas, foram calculadas considerando o tempo de 60 minutos para o primeiro ensaio e 37 minutos para o segundo. Portanto, de

fato quando ocorre o travamento o rotor a temperatura pode facilmente atingir valores que danifiquem o motor, rompendo o isolamento de condutores e das chapas do estator.

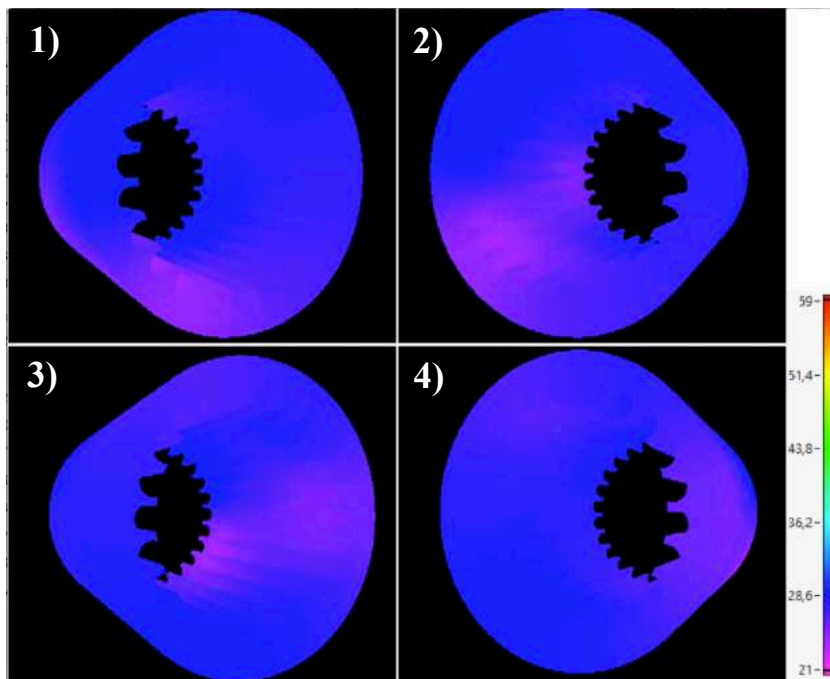
Ainda pode ser verificado na figura 24 que a temperatura dos sensores se mantiveram proporcionalmente similares, os sensores 4, 3 e 8 obtiveram as maiores temperaturas em ambos os ensaios e os sensores 5 e 6 permaneceram entre as menores temperaturas. Este resultado indica que o motor manteve o mesmo padrão de temperatura nos dois casos ensaiados, porém proporcionalmente as temperaturas no ensaio de rotor travado foram maiores, devido a elevação da corrente.

O mapa térmico mostrado nas imagens da figura 25 foi obtido da mesma forma que no item anterior (3.3.1). Neste mapa térmico a evolução da temperatura é apresentada de forma mais clara devido a maior variação da temperatura, onde a temperatura inicial era de 21°C e a máxima foi de 57 °C. O mapa térmico apresenta quatro diferentes vistas do estator do motor: (1) vista frontal esquerda; (2) vistas frontal direita; (3) vista posterior esquerda; (4) vistas posterior direita.

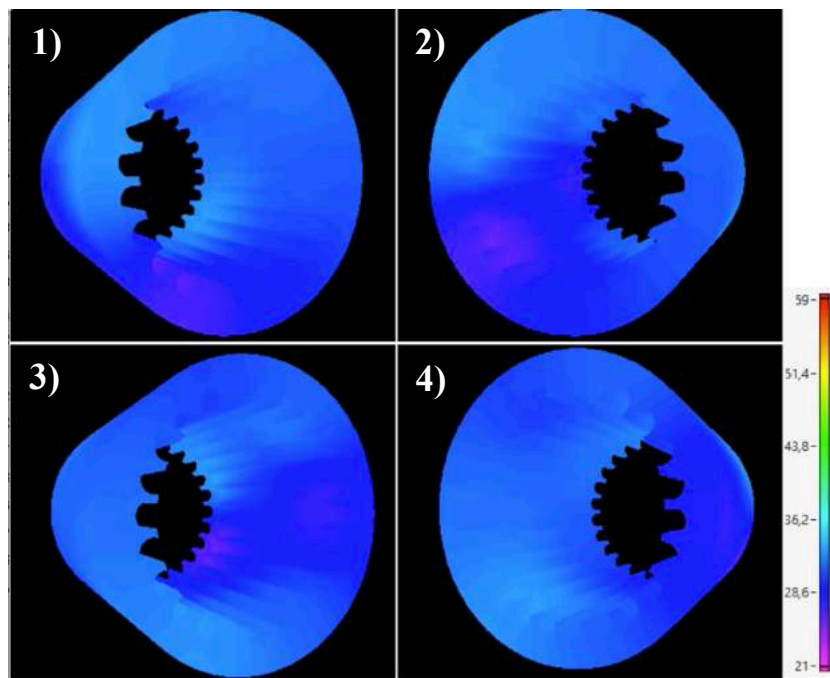
Figura 25: Mapa térmico do ensaio de rotor travado: (a) 1 minutos, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos, (d) 10 minutos, (e) 15 minutos, (f) 20 minutos, (g) 30 minutos, (h) 35 minutos, (i) 37 minutos.



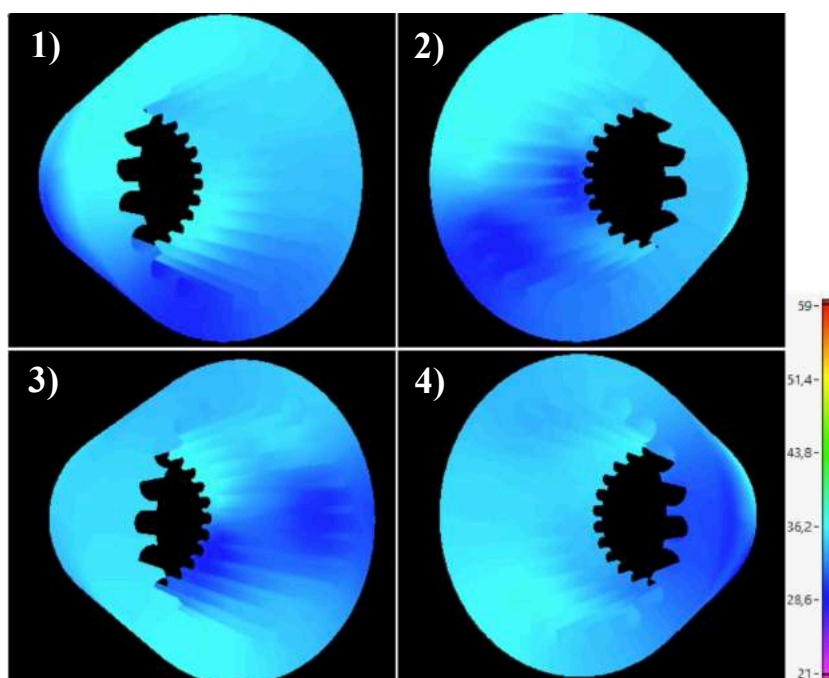
(b)



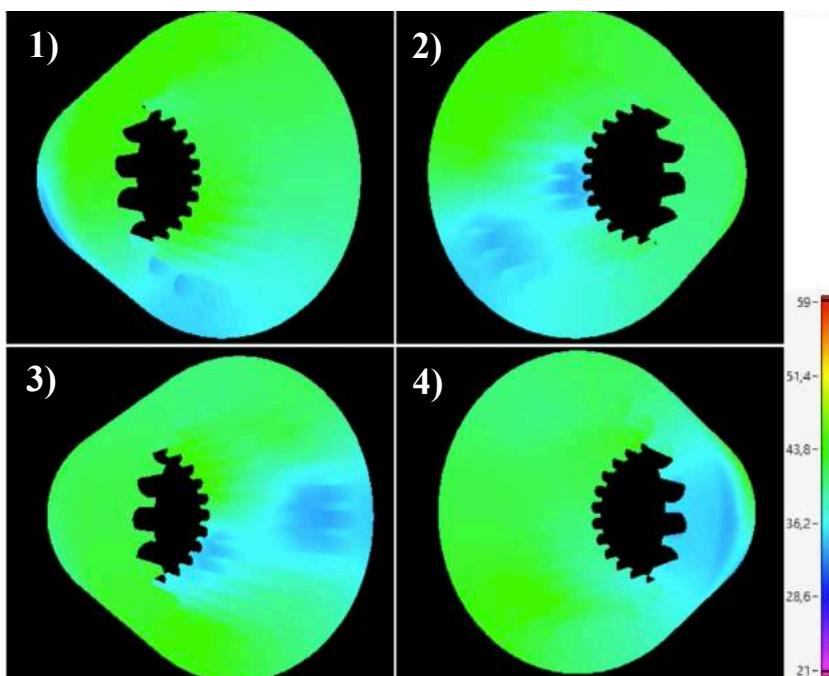
(c)



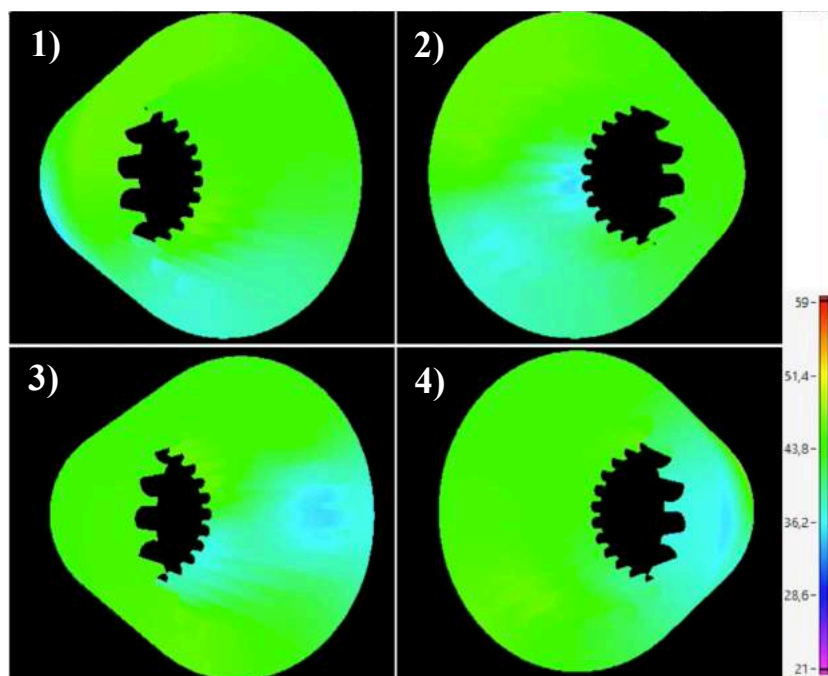
(d)



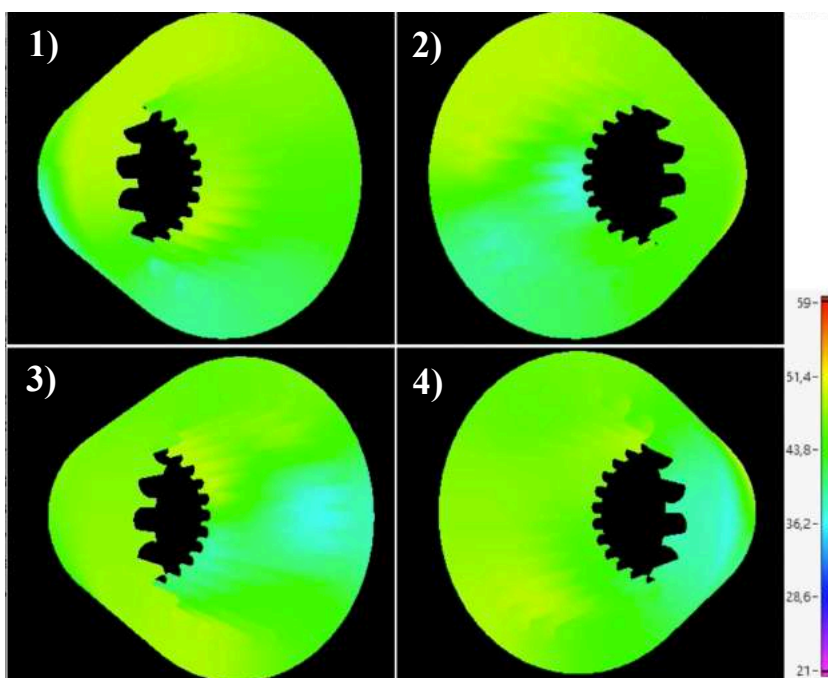
(e)



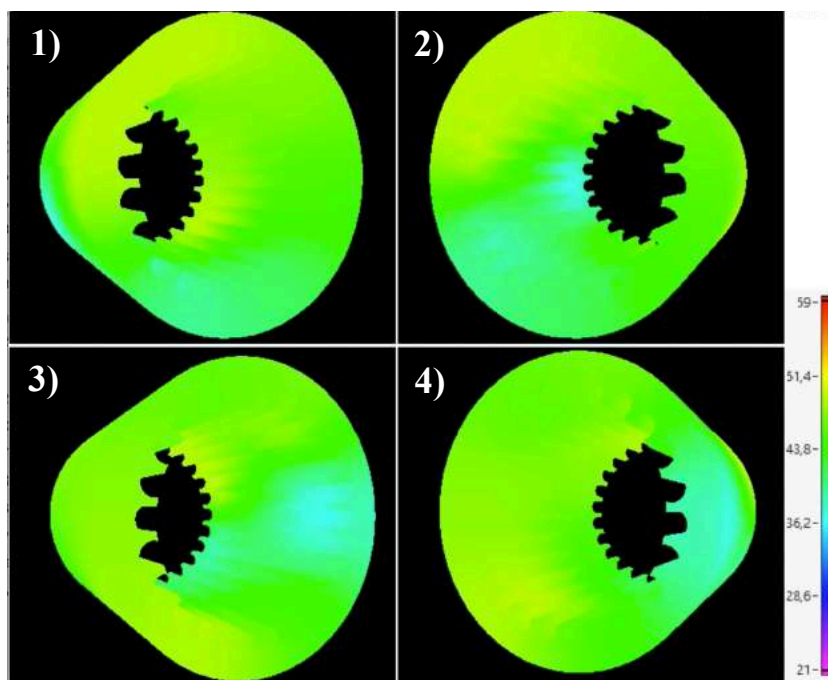
(f)



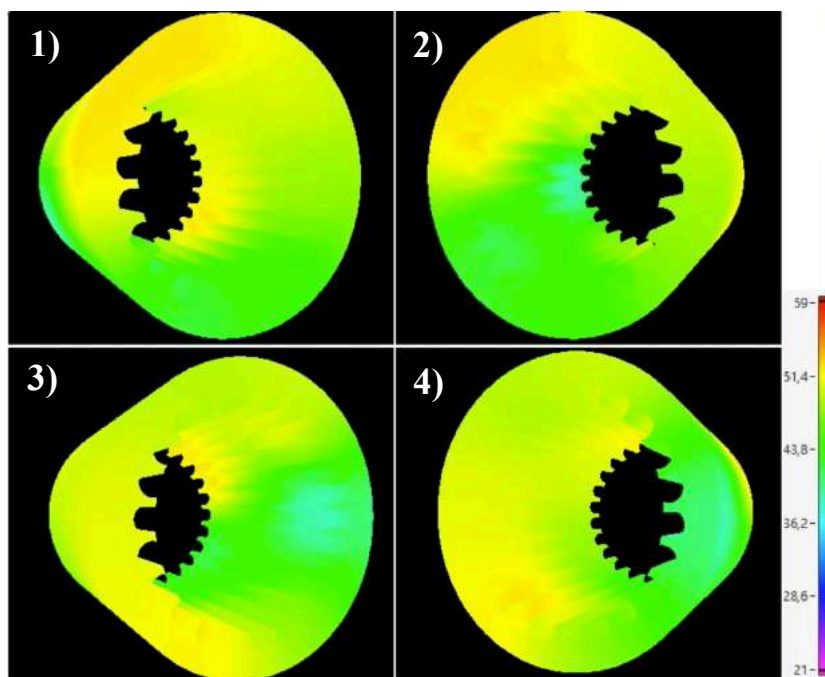
(g)



(h)



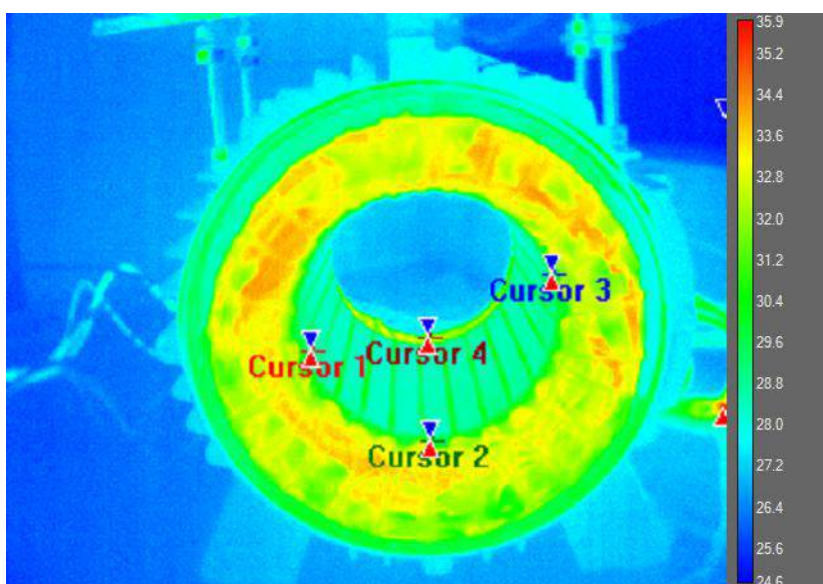
(i)

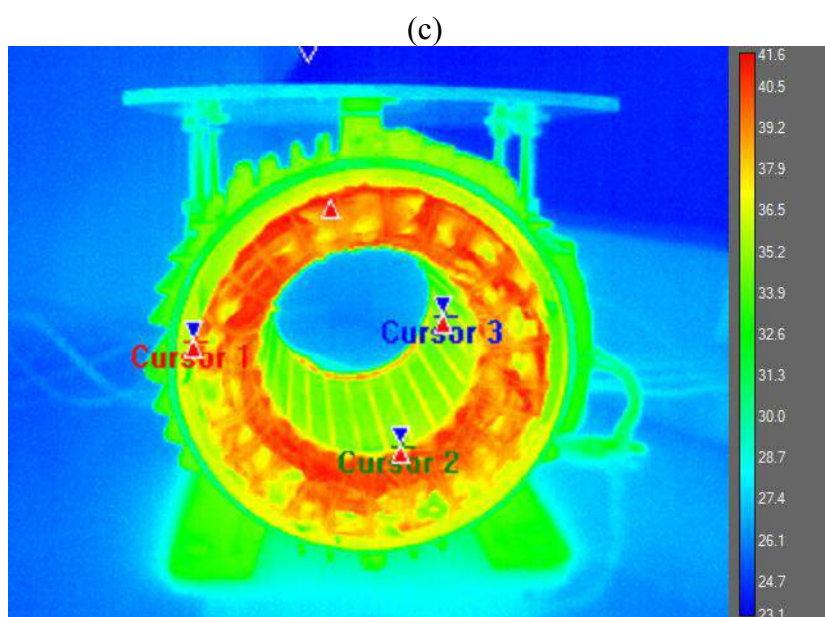
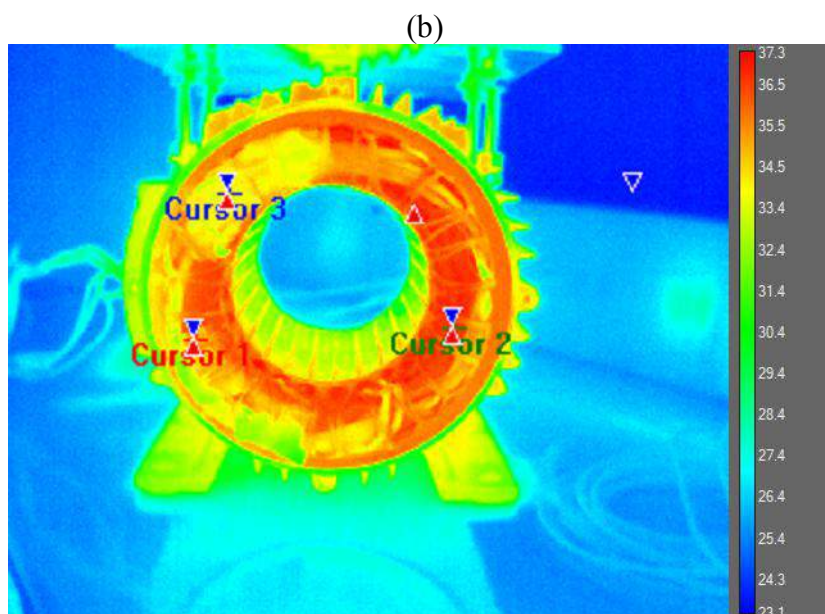


Assim como no ensaio de motor a vazio, do item anterior, para este ensaio as imagens obtidas pela câmera térmica da figura 26 mostra alguns padrões que podem ser também encontrados no mapa térmico obtido com os sensores FBG das imagens da figura 25. Na figura 26, mais especificamente na figura 26 (a), na qual foi obtida no início do ensaio pode se verificar que alguns pontos de maior temperatura similares aos encontrados na figura 25, mais evidente na figura 25 (i) (1 e 2), que são da parte frontal do motor. Entretanto pode se observar alguns padrões que diferem nos dois métodos, que de acordo com os dados obtidos se torna difícil levantar hipóteses.

Figura 26: Imagem obtida com a câmera térmica: (a) imagem frontal no início do ensaio, (b) imagem posterior no fim do ensaio, (c) imagem frontal no fim do ensaio.

(a)

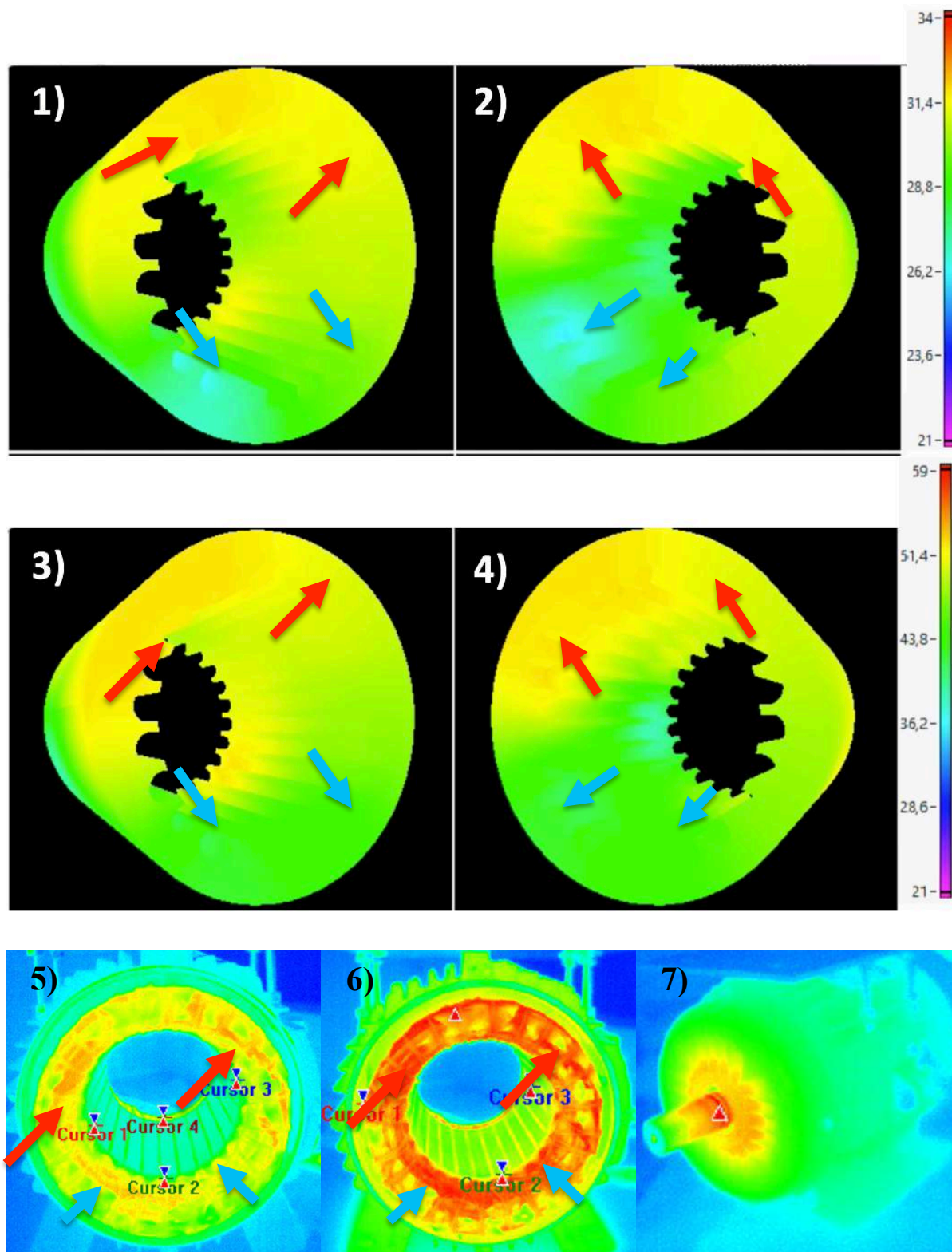




3.3.3 Comparação dos resultados

A partir dos dois ensaios realizados, é importante estabelecer algumas comparações e justificar os resultados obtidos. Para tanto, é apresentado na figura 27 algumas figuras afim de analisar os resultados encontrados para a parte frontal do motor. Os detalhes (1) e (2) são referentes ao ensaio de motor a vazio, (3) e (4) são referentes ao ensaio de rotor travado. Os demais, obtidos com a câmera térmica, são referentes ao início do ensaio de rotor travado (5) e final (6), ensaio de motor a vazio (7).

Figura 27: Comparativo da parte frontal: (1) e (2) imagem do ensaio de motor a vazio; (3) e (4) imagem do ensaio de rotor travado; (5) e (6) imagens térmicas do ensaio de rotor travado; (7) imagem térmica do ensaio de motor a vazio.

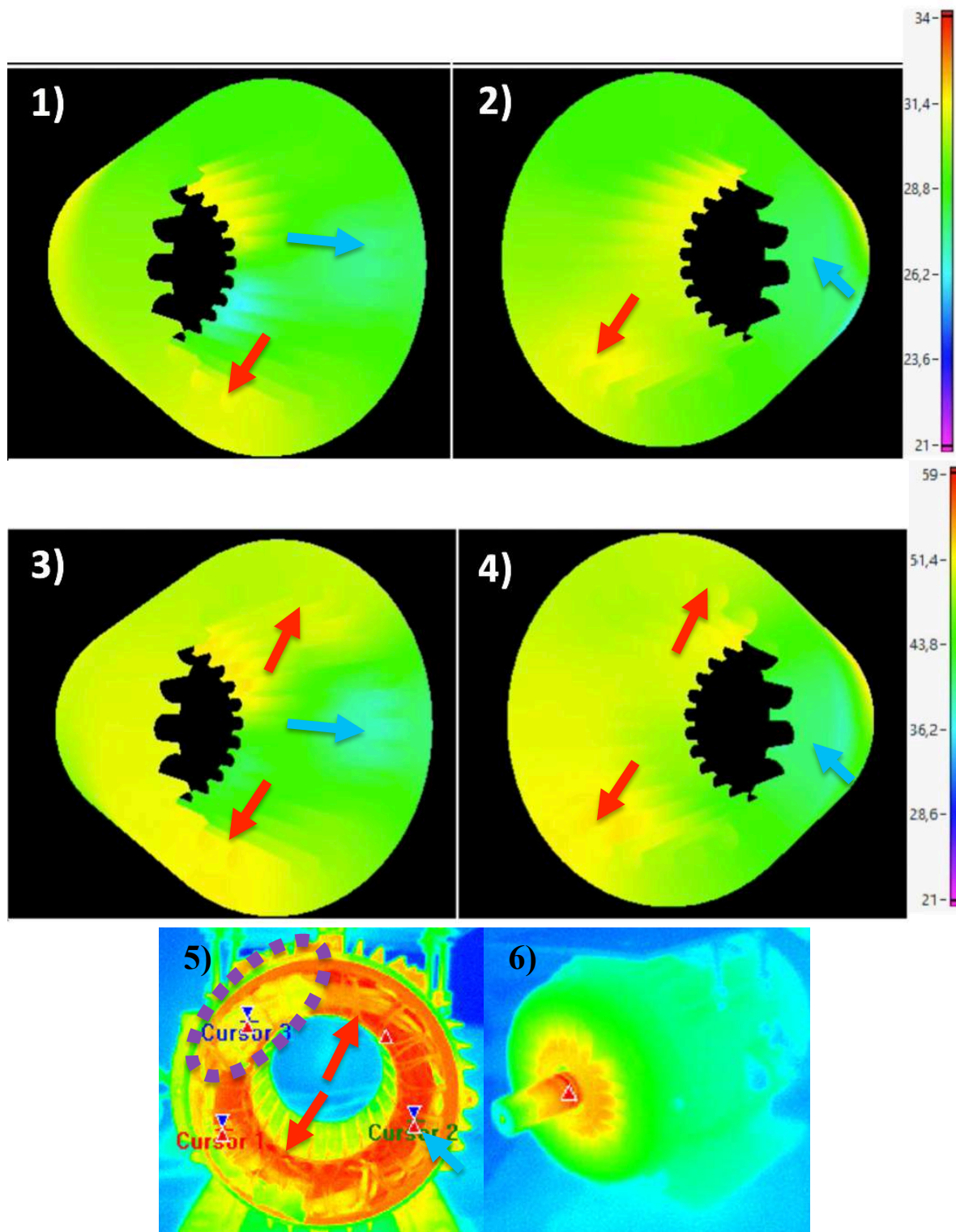


Na figura 27, foram destacados os pontos onde as temperaturas apresentaram os maiores valores (flechas vermelhas) e pontos com as menores temperaturas (flechas azuis). Pode se observar que há uma similaridade nos pontos destacados, entretanto algumas fontes de incertezas podem ser apontadas nas medições feitas com os sensores FBG e câmera térmica. A imagem obtida pela pode ser afetada pela distância, cor do objeto e composição do material. Além disso, alguns materiais podem refletir os raios infravermelhos emitidos por outros corpos. Com relação ao modelo do mapa térmico, podemos apontar falhas devido ao processo de interpolação linear utilizado e pela composição dos materiais no interior do motor. No interior do motor e mais precisamente onde foi posicionado os sensores, encontram-se matérias como as bobinas de cobre, chapas de aço-silício do estator e materiais isolantes. Estes materiais, possuem propriedades mecânicas e condutividade térmica diferentes. Desta forma, pode se verificar que existem varias fontes de incertezas nos métodos utilizados.

Na figura 28, são mostradas imagens de forma análoga a figura 27, porém nela é apresentado a parte posterior do motor. Os detalhes (1) e (2) são referentes ao ensaio de motor a vazio, (3) e (4) são referentes ao ensaio de rotor travado. Os demais, obtidos com a câmera térmica, (5) é referente ao final do ensaio de rotor travado e (6) ensaio de motor a vazio.

Assim como a figura 27, na figura 28 fora destacado os pontos com de maiores temperaturas (flechas vermelhas), menores temperatura (flechas em azuis) e detalhe destacado com linha pontilhada. As conclusões a respeito dos padrões de temperatura seguem as mesmas linhas das acima colocadas para a imagem 27. Entretanto, para o detalhe destacado com a linha pontilhada, a temperatura é menor pois naquela região há uma maior concentração material isolante, o que faz que a elevação de temperatura causada pelas bobinas não se propague da mesma forma com que ocorre nas demais regiões.

Figura 28: Comparativo da parte posterior: (1) e (2) imagem do ensaio de motor a vazio; (3) e (4) imagem do ensaio de rotor travado; (5) e (6) imagens térmicas do ensaio de rotor travado; (7) imagem térmica do ensaio de motor a vazio.



4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os resultados de validação de um método para mapear termicamente máquinas elétricas utilizando sensores FBG, bem como os resultados de caracterização dos sensores, determinação de incertezas, ensaios com motores elétricos e comparação do mapa térmico obtido com imagens térmicas obtidas com uma câmera térmica.

A partir da caracterização dos sensores, com encapsulamento e sem encapsulamento, verificou-se a funcionalidade do sensor. A sensibilidade dos três sensores ensaiados se mantiveram igual a $10 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$. Entretanto o maior erro obtido para o sensor encapsulado foi igual a $1,58^{\circ}\text{C}$, enquanto para o sensor sem encapsulamento foi igual a $0,53^{\circ}\text{C}$. Contudo, as dimensões do encapsulamento inviabilizaram a instrumentação do motor utilizando os mesmo, desta forma a validação do sensor encapsulada ficou limitada ao processo de calibração. Os resultados obtidos, com esta validação, mostraram que o método de encapsulamento apresentou valores coerente e possibilita sua aplicação para medições de temperatura.

Com relação ao modelo apresentado para geração de mapa térmico, ficou claro a necessidade de encapsulamento dos sensores, pois como apresentado na Figura 17 o sensor pode sofrer interferência mecânicas que de acordo com o ensaio foi de $0,25^{\circ}\text{C}$. Além disso, houve uma elevação da dificuldade de instrumentar o motor devido ao risco de danificar o sensor.

O mapa térmico se mostrou uma ferramenta com um potencial muito interessante para identificar os padrões de temperatura no interior do motor. A possibilidade de instrumentar o motor com um grande número de sensores, as dimensões reduzidas (sem encapsulamento) e a imunidade a campos eletromagnético são as suas principais vantagens observadas. Entretanto, a validação do modelo de mapeamento necessita de uma investigação mais elaborada, realizando um numero maior de ensaios, aumentando o numero de sensores e utilizar algoritmos de regeneração de imagens podem elevar a confiabilidade da imagem obtida.

Portando, realizando as devidas considerações e limitando a operação do sistema proposto observando as suas características e particularidades, os resultados obtidos foram coerentes e mostram que o sistema pode ser aplicado para mapeamento de máquinas elétricas. Contudo, os resultados motivam a continuação do trabalho afim obter um

modelo com maior confiabilidade e apontar como ele pode ser aplicado para identificar falhas e parâmetros específicos de máquinas elétricas.

REFERÊNCIAS

- A. Mohammad and S. Djurović. Evaluation of fiber-optic sensing performance for embedded thermal monitoring of electric machinery wound componentes. **2016 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)**, Bar, 2016.
- A. Mohammed, S. Djurović, A. C. Smith and K. Tshiloz. FBG sensing for hot spot thermal monitoring in electric machinery random wound componentes. **2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)**, Lausanne, 2016.
- ABNT. Rotating electrical machines - induction motors - specification. **NBR 7094**, 2003.
- ALBERTAZZI. Armando G. Jr. SOUSA, André R. de. Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial. Barueri: **Editora Manole**, 2010;
- BECHARA, Ricardo. Análise de falhas em transformadores de potência. 2010.118f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica). **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2010.
- 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.
- BULGARELLI, Roberval. Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais. 2006. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) - **Escola Politécnica, University of São Paulo**, São Paulo, 2006.
- C. Wang, H. Liu, X. Liu, X. Zhang and Z. Chen. A sensor-less method for online thermal monitoring of switched reluctance machine. **2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, Pattaya, 2015.
- 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.
- ECKE, W.; WILLSCH, R.; BARTELT, H. Fibre-optic structural health monitoring in the energy industry. In: **OptoElectronics and Communications Conference**, 2009. OECC 2009. 14th. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1 –2.
- F. J. T. E. Ferreira, A. T. de Almeida, J. F. S. Carvalho and M. V. Cistelecan, "Experiments to observe the impact of power quality and voltage-source inverters on the temperature of three-phase cage induction motors using an infra-red camera," **2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference**, Miami, FL, 2009, pp. 1311-1318.
- Fernando Bortolotti, Kleiton Morais Sousa, Jean Carlos Cardozo da Silva, Hypólito José Kalinowski. Packaging, characterization and calibration of fiber Bragg grating temperature sensors. MOMAG 2014: 16o SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e

11° CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Curitiba, Brasil, 2014.

Fitzgerald, A. E., C. Kingsley, Jr. e S. D. Umans: *Electric Machinery*, 6a ed., Nova York: **McGraw-Hill**, 2003.

H. Zhang. Online Thermal Monitoring Models for Induction Machines. In **IEEE Transactions on Energy Conversion**, vol. 30, no. 4, pp. 1279-1287, Dec. 2015.

Hyuk-Jin Yoon, and Chun-Gon Kim. The mechanical strength of fiber Bragg gratings under controlled UV laser conditions. **IOP - Institute of Physics. Smart Materials and Structures**, v.16, n. 4, 2007.

J. h. Lee, S. g. Kim, H. j. Park and M. Song. Investigation of Fiber Bragg Grating Temperature Sensor for Applications in Electric Power Systems. 2006 **IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials**, Bali, 2006, pp. 431-434.

K. Hill and G. Meltz. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, vol. 15, no. 8, pp. 1263 –1276, Aug. 1997.

Kalinowski, Alessandra, *Caracterização e Calibração de um Sensor a Fibra Ótica Baseado em Redes de Bragg para Análise Biomecânica*. In. Dissertação (Mestre em Ciências) – **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná**. Curitiba, 2017.

KASHYAP, R., “Fiber Bragg Grating”, San Diego, **Academic Press**, 1999.

L. Yixian and A. A. O. Tay. Finite element thermal stress analysis of a solar photovoltaic module. **37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, Seattle, WA, 2011

OTHONOS, A. Fiber bragg gratings. *Review of Scientific Instruments*, v. 68, n. 12, p. 4309–4341, 1997.

OTHONOS, A.; KALLI, K. *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. London: Artech House Print on Demand, 1999.

Santolin, Edson Antonio. *Aplicação de Sensores a Fibra Ótica no Monitoramento Térmico de Painel Fotovoltaico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná**. Pato Branco, 2016.

Silva, Erlon da Vagner. *Medição de Temperatura Utilizando Sensoriamento Óptico Distribuído e Quase-Distribuído em Geradores Elétricos de Potência*. **IV Seminário de Eficiência Energética no Setor Elétrico - SEENEL**, Costa do Sauipe, v. único, 2015.

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, Kleiton 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

Sun, Bohua. Smart Materials and Structures. Lecture at **Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH)**, Zurich, 14 Sept.,2015

T. Lundquist and W. Knuth. Finally fiber optic sensing of power transformer “Hotspots” is paying off. 2008 **International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis**, Beijing, 2008

WANG, Y. et al. Hardware embedded fiber sensor interrogation system using intensive digital signal processing. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 13, n. 2, p. 139–155, 2014.

X. Sun, T. J. Silverman, Z. Zhou, M. R. Khan, P. Bermel and M. A. Alam. Optics-Based Approach to Thermal Management of Photovoltaics: Selective-Spectral and Radiative Cooling. **In IEEE Journal of Photovoltaics**, vol. 7, no. 2, pp. 566-574, March 2017.