

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROPOSIÇÃO E COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE
MAPEAMENTO TÉRMICO VOLUMÉTRICO PARA
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

IVAN PAULO DE FARIA

Itajubá, Março de 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROPOSIÇÃO E COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE MAPEAMENTO TÉRMICO VOLUMÉTRICO PARA TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

IVAN PAULO DE FARIA

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

ORIENTAÇÃO: Prof. Dr. MANUEL LUÍS BARREIRA MARTINEZ

Universidade Federal de Itajubá

CO-ORIENTAÇÃO: Prof. Dr. MARCEL FERNANDO DA COSTA PARENTONI

Universidade Federal de Itajubá

Itajubá, Março de 2012

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Cristiane N. C. Carpinteiro- CRB_6/1702

F224p

Faria, Ivan Paulo de

Proposição e comparação de técnicas de mapeamento térmico volumétrico para transformadores de potência / por Ivan Paulo de Faria. -- Itajubá (MG) : [s.n.], 2012.

139 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez.

Coorientador : Prof. Dr. Marcel Fernando da Costa Parentoni.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Transformadores de potência. 2. Mapeamento térmico volumétrico. 3. Sensores em fibra óptica. I. Martinez, Manuel Luis Barreira, orient. II. Parentoni, Marcel Fernando da Costa, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

DEDICATÓRIA

*A Meus Pais Donizete e Lúcia, A
Meus Irmãos Lucas e Gabriel e A
Minha Irmã Tainara.*

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez, orientador deste trabalho, pela confiança em mim depositada, pela oportunidade cedida para que eu pudesse realizar meu mestrado junto ao LAT, pelo suporte financeiro cedido pelo laboratório, pela atenção e amizade.
- Ao Prof. Dr. Marcel Fernando da Costa Parentoni, meu co-orientador, por ter me guiado pelos caminhos desta pesquisa, por ter me motivado na escrita deste trabalho, pelo acompanhamento ininterrupto do andamento e das revisões desta dissertação. Meus sinceros agradecimentos.
- À minha namorada, Michelly, pelo apoio, paciência e compreensão e por estar sempre ao meu lado e disposta a me ajudar.
- Aos meus pais Donizete e Lúcia, muito obrigado pelo incentivo e apoio sempre a mim prestados. Aos meus irmãos Lucas e Gabriel e a minha irmã Tainara, pelo carinho, atenção e amor que continuamente demonstraram.
- Aos colegas de trabalho do Laboratório de Alta Tensão, especialmente aos amigos Gustavo Lopes, Renan de Faveri, Renato Capelini, Rogério Salustiano e Victor Telles, pelo apoio prestado e pela amizade.
- À CAPES pelo suporte financeiro concedido para a realização desta pesquisa.
- A Deus, pela vida.

RESUMO

Os perfis de temperatura dos transformadores são comumente obtidos por meio de sensores instalados no topo do óleo do equipamento. Através dessa metodologia, faz-se a estimativa do valor do ponto mais quente do transformador bem como sua perda de vida útil. Entretanto, esse método está sujeito a baixa exatidão no cálculo da temperatura e apresenta o inconveniente de não localizar o ponto de maior solicitação térmica.

Para se mensurar a temperatura diretamente nas partes ativas do transformador, e, portanto, minimizar os erros provenientes da estimativa, deve-se adotar técnicas que operem sem danificar o meio dielétrico do equipamento. Simultaneamente, tais tecnologias também carecem de serem aptas a realizar a medição em diversos locais do transformador, pois assim se pode localizar seu ponto mais quente.

Buscando-se alcançar uma metodologia capaz de atender aos requisitos supracitados, este trabalho tem como objetivo apresentar técnicas de medição de temperatura capazes de realizar o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência. Por meio de uma abordagem que percorre desde os sensores convencionais aos fundamentados em fibras ópticas, desenvolve-se um estudo e compara-se tanto tecnicamente quanto economicamente as configurações hábeis a serem aplicadas à proposição deste trabalho.

Palavras-chave: Transformadores de Potência, Mapeamento Térmico Volumétrico, Sensores em Fibra Óptica.

ABSTRACT

The transformers temperature profiles are usually obtained by thermal sensors installed at the top of the tank. Through this methodology, it is possible to estimate the hot-spot temperature and the transformer loss life. However, this method can have low accuracy due to uncertainties related to the test method and this technique can not indicate the hot-spot.

Sensors that do not damage the equipment dielectric insulation must be installed for direct temperature measurement into transformer windings. Besides, the technology has to be able to measure the temperature in several winding points to be possible to localize the hot-spot.

This work presents temperature measurement techniques those must be able to attend the requirements above and to get the volumetric thermal mapping together in power transformers. Different technologies, since conventional sensors until fiber optic sensors, are compared to active the objective described.

Keywords: Power Transformers, Volumetric Thermal Mapping, Fiber Optical Sensors.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
SUMÁRIO	viii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas	xx
Lista de Abreviaturas e Símbolos	xxi
<i>1 Introdução</i>	1
1.1 Considerações Iniciais	2
1.2 Relevância do Tema.....	2
1.3 Objetivos e Contribuições Esperadas	5
1.4 Estrutura da Dissertação	5
<i>2 Considerações sobre o Mapeamento Térmico Volumétrico em Transformadores</i>	7
2.1 Considerações Iniciais	8
2.2 Definições Preliminares	8
2.3 Características do Mapeamento Térmico Volumétrico em Transformadores	11
2.4 Aplicabilidade de Técnicas de Medição de Temperatura no Mapeamento Térmico Volumétrico	14
2.4.1 Requisitos.....	14
2.4.2 Informações Gerais	16
2.4.2.1 Sensores Convencionais	16
2.4.2.2 Sensores em Fibra Óptica	17
2.5 Considerações Finais	18
<i>3 Técnicas de Monitoramento de Temperatura Via Fibras Ópticas</i>	19
3.1 Considerações Iniciais	20
3.2 Técnicas de Sensoriamento Baseadas em Fibra Óptica.....	20
3.2.1 Classificação dos Sensores em Fibras Ópticas Quanto à Região Sensora.....	22
3.2.1.1 Sensores em Fibras Ópticas Intrínsecos.....	22
3.2.1.2 Sensores em Fibras Ópticas Extrínsecos	22
3.2.2 Classificação dos Sensores em Fibras Ópticas Quanto à Modulação.....	24

3.2.2.1	Sensores Baseados na Modulação da Intensidade da Luz	24
3.2.2.2	Sensores Baseados na Modulação da Fase da Luz	25
3.2.2.3	Sensores Baseados na Modulação do Comprimento de Onda da Luz.....	25
3.2.2.4	Sensores Baseados na Modulação da Polarização da Luz.....	26
3.3	Sensores de Temperatura Pontuais em Fibras Ópticas	27
3.3.1	Decaimento Fluorescente.....	27
3.3.1.1	Conceituação da Fluorescência.....	27
3.3.1.2	Tipos de Sensores baseados no Decaimento Fluorescente	28
3.3.1.3	Utilização dos Sensores de Fluorescência para Medição de Temperatura	30
3.3.2	Redes de Bragg	34
3.3.2.1	Conceituação das Redes de Bragg	34
3.3.2.2	Utilização dos Sensores Baseados em Redes de Bragg para Medição de Temperatura	37
3.4	Sensores de Temperatura Distribuídos em Fibras Ópticas	46
3.4.1	Espalhamento Linear Rayleigh.....	47
3.4.1.1	Conceituação do Espalhamento Rayleigh.....	47
3.4.1.2	Utilização do Espalhamento Rayleigh como Sensor de Temperatura	49
3.4.2	Espalhamento não-Linear Raman.....	54
3.4.2.1	Conceituação do Espalhamento Raman.....	54
3.4.2.2	Utilização do Espalhamento Raman como Sensor de Temperatura	56
3.4.3	Espalhamento não-Linear Brillouin.....	61
3.4.3.1	Conceituação do Espalhamento Brillouin.....	61
3.4.3.2	Utilização do Espalhamento Brillouin como Sensor de Temperatura	62
3.5	Considerações Finais	69
4	<i>Aplicação das Técnicas de Monitoramento de Temperatura em Transformadores</i>	71
4.1	Considerações Iniciais	72
4.2	Sistemas Baseados em Técnicas Convencionais de Medição de Temperatura	72
4.2.1	Considerações Preliminares	72
4.2.2	Aplicações em Transformadores	73
4.3	Sistemas Baseados no Decaimento Fluorescente para Medição de Temperatura	86
4.3.1	Considerações Preliminares	86
4.3.2	Aplicações em Transformadores	87
4.4	Sistemas Baseados em Redes de Bragg para Medição de Temperatura.....	94
4.4.1	Considerações Preliminares	94

4.4.2	Aplicações em Transformadores	95
4.5	Sistemas Baseados no Espalhamento de Luz para Medição de Temperatura	106
4.5.1	Considerações Preliminares	106
4.5.1.1	Aplicações em Transformadores	107
4.6	Considerações Finais	111
5	<i>Análise para o Dimensionamento do Mapeamento Térmico Volumétrico em Transformadores</i>	112
5.1	Considerações Iniciais	113
5.2	Análises Preliminares dos Requisitos para a Obtenção do Monitoramento Térmico Volumétrico	113
5.3	Comparação entre as Técnicas Baseadas no Sistema FBG com as Baseadas no Sistema DTS/DTSS	118
5.3.1	Esquemas de Instalação	118
5.3.2	Detalhes Técnicos	123
5.3.3	Custos Relativos	128
5.4	Considerações Finais	133
6	<i>Conclusões</i>	134
6.1	Conclusões e Contribuições	135
6.2	Trabalhos Publicados	138
6.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	139
7	<i>Referências Bibliográficas</i>	140

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Aplicação dos sensores de temperatura: (a) Inserção do sensor em um transformador com enrolamento do tipo disco; (b) Alocação do sensor em um transformador com enrolamento transposto (IEC, 2011).	4
Figura 1.2 – (a) Inserção do sensor em um espaçador; (b) Aplicação do conjunto sensor e espaçador no enrolamento de um transformador do tipo núcleo envolvente (IEC, 2011).	4
Figura 2.1 – Exemplos de medidores de temperatura. Termômetro baseado na expansão/contração do mercúrio e medidor digital utilizando-se termopares (THERMOMAX, 2012).....	8
Figura 2.2 – Exemplo de medição registrada da temperatura (PARENTONI, 2010).	9
Figura 2.3 – Mapeamento da temperatura terrestre (NASA, 2012a).....	9
Figura 2.4 – Exemplos de mapeamento térmico registrado. Traduzida do trabalho de UKIL et al. (2011).	10
Figura 2.5 – Exemplo de mapeamento térmico tridimensional (NASA, 2012b).	10
Figura 2.6 – Exemplo ilustrativo do mapeamento térmico volumétrico (ANSY, 2012).....	11
Figura 3.1 – Classificação dos sensores em FO quanto à região sensora.	21
Figura 3.2 – Classificação dos sensores em FO quanto à modulação da luz.....	21
Figura 3.3 – Sensor em FO intrínseco: atuação do mensurando diretamente no guia óptico. Traduzida do trabalho de YIN et al. (2008).....	22
Figura 3.4 – Sensor em FO extrínseco: transdutor óptico acoplado ao guia óptico. Traduzida do trabalho de YIN et al. (2008).....	23
Figura 3.5 – Exemplo de sensor extrínseco com confinamento da luz. Modulação do feixe óptico realizada por redes inscritas no núcleo de uma fibra óptica. Adaptada do trabalho de ZIMMERMANN et al. (2007).....	23
Figura 3.6 – Modificação da casca da fibra óptica. Traduzida do trabalho de RIGHINI et al. (2009).....	24
Figura 3.7 – Fibra óptica de alto valor de birrefringência.	27
Figura 3.8 – Pulso de luz e sinal fluorescente emitido. Traduzida do trabalho de LUNDQUIST e KNUTH (2008).	28
Figura 3.9 – Sensor óptico baseado no decaimento fluorescente utilizando configuração topo (BORTONI et al., 2007).	29

Figura 3.10 – Sensor óptico baseado no decaimento fluorescente utilizando configuração evanescente (CALDAS, 2003).	30
Figura 3.11 – Esquemático utilizado para o monitoramento de temperatura: sensor <i>alexandrite</i> . Traduzida do trabalho de AUGOUSTI et al. (1987).	31
Figura 3.12 – Correlação da variação do tempo de decaimento fluorescente com a temperatura do meio. Traduzida do trabalho de AUGOUSTI et al. (1987).	32
Figura 3.13 – Esquemático do sistema de monitoramento de temperatura: sensor fluorescente Cr^{3+} :YAG; fonte de luz de 470 nm; fotodetector utilizado para medição do decaimento fluorescente. Traduzida do trabalho de AIZAWA et al. (2006).	32
Figura 3.14 – (a) Comportamento do tempo de decaimento fluorescente para diferentes tipos de dopagens; (b) Comportamento da intensidade do sinal para o sensor Cr^{3+} : YAG. Ambos os comportamentos em função da temperatura. Traduzida do trabalho de AIZAWA et al. (2006).	33
Figura 3.15 – Tempo de decaimento em relação a temperatura do meio. Traduzida do trabalho de LUNDQUIST e KNUTH (2008).	34
Figura 3.16 – Diagrama esquemático da estrutura da rede de Bragg e aspectos da luz incidente, transmitida e refletida pela rede.	35
Figura 3.17 – Sistema de inscrição de rede de Bragg. Traduzida do trabalho de MOREY et al. (1989).	37
Figura 3.18 – Variações do comprimento de onda de Bragg com a temperatura para a rede inscrita. Traduzida do trabalho de MOREY et al. (1989).	38
Figura 3.19 – Esquemático dos sensores FBG distribuídos em uma fibra óptica. Traduzida do trabalho de RAO et al. (1997).	38
Figura 3.20 – Comparação da medição de temperatura por meio dos sensores FBG com termopares. Traduzida do trabalho de RAO et al. (1997).	39
Figura 3.21 – Esquemático da montagem utilizada para compensação da variação de temperatura na leitura da deformação mecânica. Traduzida do trabalho de LIN e WANG (2009).	40
Figura 3.22 – Variação do comprimento de onda com a deformação mecânica. Traduzida do trabalho de LIN e WANG (2009).	40
Figura 3.23 – Variação do comprimento de onda com a temperatura. Traduzida do trabalho de LIN e WANG (2009).	41
Figura 3.24 – Variação do comprimento de onda central versus temperatura (SILVA et al., 2003).	41

Figura 3.25 – Variação do comprimento de onda de seis sensores FBG em função da temperatura (ALLIL, 2010).	42
Figura 3.26 – Relação entre o comprimento de onda e a temperatura para uma das redes de Bragg utilizadas no trabalho de ALLIL (2010).	43
Figura 3.27 – Esquemático dos pontos de instalação dos sensores FBG para o monitoramento térmico do gerador (ALLIL, 2010).	43
Figura 3.28 – Medição registrada da temperatura no gerador (ALLIL, 2010).	44
Figura 3.29 – Esquemático do sistema de inscrição de sensores FBG na fibra óptica (FRAZÃO et al., 2006).	44
Figura 3.30 – Variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura (FRAZÃO et al., 2006).	45
Figura 3.31 – Sistema composto por vários sensores FBG em quatro fibras ópticas (FRAZÃO et al., 2006).	45
Figura 3.32 – Medição de temperatura por meio de termopar e sensores FBG (FRAZÃO et al., 2006).	46
Figura 3.33 – Direções de espalhamento da luz pelo fenômeno da dispersão Rayleigh. Traduzida do trabalho de ELLIOT (2002).	48
Figura 3.34 – Variação da dispersão Rayleigh com o comprimento de onda da luz incidente. Traduzida do trabalho de ELLIOT (2002).	48
Figura 3.35 – Perdas totais e Rayleigh em uma fibra óptica de sílica. Traduzida do trabalho de BASS e STRYLAND (2002).	49
Figura 3.36 – Esquemático da medição de temperatura baseado no espalhamento Rayleigh. Traduzida do trabalho de SANG et al. (2008).	50
Figura 3.37 – Correlação entre o espectro do espalhamento para a fibra aquecida e para a temperatura ambiente. Traduzida do trabalho de SANG et al. (2008).	50
Figura 3.38 – Esquemático do reator onde as fibras ópticas foram inseridas. Parcialmente traduzida do trabalho de SANG et al. (2008).	51
Figura 3.39 – Medição de temperatura: comparação entre quatro tipos de fibra o termopar. Traduzida do trabalho de SANG et al. (2008).	51
Figura 3.40 – Detecção da temperatura ao longo de uma fibra óptica utilizando-se o espalhamento Rayleigh. Traduzida do trabalho de SOLLER et al. (2006).	52
Figura 3.41 – Sistema utilizado para a medição de temperatura com alta resolução espacial. Traduzida do trabalho de KEE et al. (2000).	53

Figura 3.42 – Medição de temperatura ao longo da fibra óptica. Traduzida do trabalho de KEE et al. (2000).	53
Figura 3.43 – Espectro de frequência dos espalhamentos de luz que ocorrem em fibras ópticas. Traduzida do trabalho de THEVENAZ (2011).	55
Figura 3.44 – Espectros do comprimento de onda do espalhamento de luz Rayleigh, Raman e Brillouin. Traduzida do trabalho de INAUDI e GLISIC (2006).	57
Figura 3.45 – Esquemático do sistema de medição de temperatura baseado no fenômeno Raman. Traduzida do trabalho de THEVENAZ (2011).	58
Figura 3.46 – Implementação de um sistema de monitoramento de temperatura para cabos isolados (INAUDI e GLISIC, 2006).	59
Figura 3.47 – Medição de temperatura ao longo de um cabo isolado para diferentes valores de carregamento. Traduzida do trabalho de INAUDI e GLISIC (2006).	59
Figura 3.48 – Esquemático do sistema de medição utilizando-se o efeito Raman. Traduzida do trabalho de (STODDART et al., 2005).	60
Figura 3.49 – Variação da temperatura em função do comprimento da fibra óptica. Traduzida do trabalho de STODDART et al. (2005).	60
Figura 3.50 – Arranjo experimental utilizado para detecção da variação da frequência de Brillouin frente as variações de deformação mecânica. Traduzida do trabalho de HORIGUCHI et al. (1989).	62
Figura 3.51 – Variação da frequência de Brillouin versus deformação. Traduzida do trabalho de HORIGUCHI et al. (1989).	63
Figura 3.52 – Esquemático utilizado para a comprovação da variação da frequência de Brillouin frente a modificações da temperatura do meio. Traduzida do trabalho de CULVERHOUSE et al. (1989).	63
Figura 3.53 – A temperatura da fibra 1 foi acrescida de 11 °C e observou-se o deslocamento de 29 MHz na frequência de Brillouin. A fibra 2 foi resfriada a 0 °C e observou-se o deslocamento de 153 MHz à direita (CULVERHOUSE et al., 1989).	64
Figura 3.54 – Averiguação da dependência do sinal de Brillouin com a temperatura. Traduzida do trabalho de PARKER et al. (1998).	65
Figura 3.55 - Constatação das variações do sinal de Brillouin com deformações mecânicas. Traduzida do trabalho de PARKER et al. (1998).	65
Figura 3.56 – Esquemático do sistema utilizado para a detecção simultânea da temperatura e deformação mecânica em uma fibra óptica monomodo. Traduzida do trabalho de PARKER et al. (1998).	66

Figura 3.57 – Registros do espectro de Brillouin para vários locais da fibra óptica frente a variações de temperatura e deformação mecânica. Traduzida do trabalho de PARKER et al. (1998).	66
Figura 3.58 – Variação da intensidade do sinal Brillouin ao longo do cabo óptico. Traduzida do trabalho de WEBB et al. (2000).	67
Figura 3.59 – Variação da temperatura ao longo da fibra óptica. Traduzida do trabalho de WEBB et al. (2000).	67
Figura 3.60 – Distribuição da temperatura ao longo da fibra óptica. Traduzida do trabalho de WAIT e HARTOG (2001).	68
Figura 3.61 – Temperatura da fibra óptica na extremidade da mesma. Traduzida do trabalho de WAIT e HARTOG (2001).	69
Figura 4.1 – Variação de temperatura para diferentes pontos de medição através de termopares durante a sobrecarga com circulação forçada de óleo. Traduzida do trabalho de PIERCE (1992a).	74
Figura 4.2 – Valores da variação da temperatura ao longo da bobina para a condição de circulação forçada do óleo isolante durante sobrecarga. Traduzida do trabalho de PIERCE (1992a).	74
Figura 4.3 – Comparação da medição de temperatura durante a sobrecarga em diferentes pontos da bobina com condição de circulação forçada do óleo. Traduzida do trabalho de PIERCE (1992a).	75
Figura 4.4 – Esquemático do modelo térmico para o cálculo da temperatura do ponto mais quente do transformador. Traduzida do trabalho de ELMOUDI (2008).	76
Figura 4.5 – Transformador sob teste. Os pontos na figura representam a localização dos termopares instalados no equipamento. Traduzida e adaptada do trabalho de ELMOUDI (2008).	76
Figura 4.6 – Temperatura do topo do óleo para diferentes posições do termopar. Traduzida do trabalho de ELMOUDI (2008).	77
Figura 4.7 – Valores medidos e calculados para a temperatura do topo do óleo (a) e do ponto mais quente do transformador (b). Traduzida do trabalho de ELMOUDI (2008).	77
Figura 4.8 – Modelo utilizado para a predição da temperatura do topo do óleo. (a) Modelo para transformador no tempo; (b) Modelo para transformador abrigado. Traduzida do trabalho de MAMIZADEH e ISKENDER (2009).	78

Figura 4.9 – Variação da temperatura para os transformadores 1 e 2 e valores de temperatura obtidos por meio da simulação. Traduzida do trabalho de MAMIZADEH e ISKENDER (2009).	79
Figura 4.10 – (a) Comportamento térmico axial da bobina de maior tensão para diferentes condições de TAP utilizadas. (b) Comportamento axial da temperatura para bobina de menor tensão. Traduzida do trabalho de PIERCE (1992b).	80
Figura 4.11 – Comportamento térmico radial da bobina de maior tensão para ventilação natural e forçada. Traduzida do trabalho de PIERCE (1992b).	80
Figura 4.12 – (a) Protótipo desenvolvido; (b) Detalhe do termorresistor (PT-100); (c) Detalhe dos termopares. Traduzida do trabalho de MALEEWAT et al. (2007).	81
Figura 4.13 – Resultado da medição e da estimativa da temperatura do ponto mais quente do transformador com carregamento de 1,7 pu durante 3 horas. Traduzida do trabalho de MALEEWAT et al. (2007).	82
Figura 4.14 – Enrolamento do transformador com a instalação de termopares e sensores em fibra óptica. Traduzida do trabalho de LI et al. (2009).	83
Figura 4.15 – Variação da temperatura do topo do óleo (TOT) e do ponto mais quente do equipamento (HST) para valores calculados (cal) e medidor experimentalmente (test). (a) Carregamento de 1 pu e (b) carregamento de 1,1 pu. Traduzida do trabalho de LI et al. (2009).	83
Figura 4.16 – Ensaio com carregamento nominal do transformador. (a) Medição da elevação de temperatura; (b) Extrapolação dos valores térmicos (SOUSA, 2011).	84
Figura 4.17 – (a) Transformador sob teste; (b) Detalhe da inserção de um termopar no enrolamento de maior tensão do equipamento (PARENTONI, 2010).	85
Figura 4.18 – Curvas de elevação de temperatura para carga linear e não-linear (PARENTONI, 2010).	86
Figura 4.19 – Esquemático da medição de temperatura utilizado. Traduzida do trabalho de MCNUTT et al. (1984).	89
Figura 4.20 – Sumário do comportamento térmico para diferentes valores de corrente do enrolamento. Traduzida do trabalho de MCNUTT et al. (1984).	89
Figura 4.21 – Esquemático da instalação dos sensores no transformador. Traduzida do trabalho de NORTON et al. (1987).	91
Figura 4.22 – Penetradores desenvolvidos para conectar internas ao interrogador. Traduzida do trabalho de NORTON et al. (1987).	91

Figura 4.23 – Esquemático simplificado do sistema de medição baseado no decaimento fluorescente. Traduzida do trabalho de LUNDQUIST e KNUTH (2008).	92
Figura 4.24 – Pulso de excitação e emissão de luz pelo sensor fluorescente. Traduzida do trabalho de LUNDQUIST e KNUTH (2008).	93
Figura 4.25 – Comportamento térmico com relação ao aumento de carga em um transformador de 600 MVA. Medição de temperatura via decaimento fluorescente. Traduzida do trabalho de LUNDQUIST e KNUTH (2008).	94
Figura 4.26 – Esquemático dos ensaios experimentais para medição de temperatura por meio de sensores FBG. Traduzida do trabalho de TEUNISSEN et al. (2001).	96
Figura 4.27 – Aspectos da sensibilidade e da linearidade dos três sensores FBG inscritos no guia óptico. Traduzida do trabalho de TEUNISSEN et al. (2001).	96
Figura 4.28 – Medição da temperatura em um mesmo ponto (a) por meio de um sensor FBG e (b) através de um termopar. Traduzida do trabalho de KIM et al. (2008).	98
Figura 4.29 – (a) Esquemático do sistema de sensoriamento térmico via FBG; (b) Variação da temperatura em um dos sensores instalados no transformador de 3 MVA. Traduzida do trabalho de KIM et al. (2008).	98
Figura 4.30 – (a) Esquemático do sistema de monitoramento utilizado. (N-ASE: fonte de luz do sistema; OSP: Processador do sinal óptico; OMux: Multiplexador; Sn: Sensores FBG); (b) Foto do transformador de 20 MVA durante ensaio de elevação de temperatura com sistema de leitura integrado. Traduzida do trabalho de RIBEIRO et al. (2008).	99
Figura 4.31 – Medição de temperatura obtida através da instalação dos diversos sensores no transformador de 20 MVA. Traduzida do trabalho de RIBEIRO et al. (2008).	99
Figura 4.32 – Esquemático do sistema de medição de temperatura utilizado para o monitoramento térmico do transformador. Traduzida do trabalho de WEI-GEN et al. (2008).	100
Figura 4.33 – Medição da temperatura por meio de um FBG e respectivo termopar instalados no transformador. Traduzida do trabalho de WEI-GEN et al. (2008).	100
Figura 4.34 – Medição da temperatura pelo método convencional (topo do óleo) e pela inserção de sensor FBG em contato direto com os enrolamentos do transformador (ZIMMERMANN et al., 2007).	101
Figura 4.35 – Variação do índice de refração relativo de um sensor FBG com a temperatura. Traduzida do trabalho de TEUNISSEN et al. (2002).	102

Figura 4.36 – Arranjo experimental para a averiguação da influência do guia óptico no dielétrico do transformador. Traduzida do trabalho de TEUNISSEN et al. (2002). ...	103
Figura 4.37 – Enrolamento da primeira camada da bobina de menor tensão com a fibra entre as espiras do enrolamento (PICANÇO, 2009).....	104
Figura 4.38 – Configuração do ensaio de elevação de temperatura (PICANÇO, 2009).	105
Figura 4.39 – Registro do comportamento térmico da (a) bobina de menor tensão e (b) bobina de maior tensão (PICANÇO, 2009).	105
Figura 4.40 – Distribuição radial da temperatura no início da bobina e a 1/3 da mesma (PICANÇO, 2009).	106
Figura 4.41 – Faixa de medição de temperatura do sistema Raman. Traduzida do trabalho de YU et al. (2006).	108
Figura 4.42 – Esquemático de um fio condutor integrado com fibra óptica. Traduzida do trabalho de DOWNES e LEUNG (2004).	109
Figura 4.43 – Sistema DTS para o mapeamento térmico ao longo do enrolamento de um transformador de 22 MVA. Traduzida do trabalho de UKIL et al. (2011).....	110
Figura 4.44 – Mapeamento térmico dos enrolamentos de um transformador utilizado para alimentar uma locomotiva. Traduzida do trabalho de UKIL et al. (2011).	110
Figura 5.1 – Espectro de alguns tipos de materiais empregados nos sensores fluorescentes. Traduzida do trabalho de HANAMI et al. (2008).	115
Figura 5.2 – Esquemático do sistema utilizado na técnica de dois fótons. Traduzida do trabalho de RUDDOCK e HAN (2005).....	116
Figura 5.3 – Esquemático da instalação dos sensores FBG em transformadores: utilização de interrogador com um canal acoplado ao sistema multiplexador, flanges de conexão ao tanque do equipamento, diversos sensores em uma mesma fibra e vários guias ópticos no transformador.....	119
Figura 5.4 – Esquemático da instalação dos sensores DTS/DTSS em transformadores: sistema multiplexador no tempo incorporado ao interrogador, instalação de diversas fibras dentro do equipamento.	120
Figura 5.5 – Detalhes do arranjo e da instalação do sistema FBG nos enrolamentos do transformador. Instalação do conjunto fibra e sensores de forma helicoidal, detalhes da placa de conectores ópticos para transformadores e imagem de um sensor FBG real.	121
Figura 5.6 – Detalhes do arranjo do sistema DTS/DTSS nos enrolamentos do transformador. Interrogador na configuração terminação dupla.	122

Figura 5.7 – Comparação e detalhe do sensor FBG com encapsulamento e da fibra óptica monomodo com camadas de proteção.	123
Figura 5.8 – Bobina do transformador com inserção da fibra óptica de forma helicoidal. .	123
Figura 5.9 – Variação do tempo de leitura do sistema DTSS Rayleigh de acordo com o tipo de interrogador. Medições realizadas em fibras de 70 m. Traduzida de (LUNA TECHNOLOGIES, 2012).....	126
Figura 5.10 – Comportamento da resolução de temperatura do sistema DTS Raman em função do tempo de leitura e da distância da região sensora. Traduzida de (SENSORNET, 2012).....	127
Figura 5.11 – Variações da resolução de temperatura do sistema DTSS Brillouin com a resolução espacial, tempo de leitura e comprimento da região sensora. Traduzida de (OMNISENS, 2012).	127

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Número mínimo de sensores recomendados para transformadores trifásicos segundo IEC 60076-2 (IEC, 2011).	3
Tabela 1.2 – Número mínimo de sensores recomendados para transformadores monofásicos segundo IEC 60076-2 (IEC, 2011).	3
Tabela 4.1 – Valores nominais dos transformadores utilizados no experimento. Tabela adaptada de (MAMIZADEH e ISKENDER, 2009).	78
Tabela 4.2 – Características gerais dos sistemas baseados no decaimento fluorescente.	87
Tabela 4.3 – Características gerais dos sistemas baseados em redes de Bragg.	95
Tabela 4.4 – Características gerais dos sistemas baseados no espalhamento de luz.	107
Tabela 5.1 – Comparação técnica dos sensores (APSENSING, 2012), (FIBER SENSING, 2012), (MICRON OPTICS, 2012), (OMNISENS, 2012), (OZOPTICS, 2012), (SENSORNET, 2012).....	124
Tabela 5.2 – Dados relativos ao equipamento base para a comparação de custos.	128
Tabela 5.3 – Sistema 1: Configuração FBG para o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.	129
Tabela 5.4 – Sistema 2: Configuração DTSS Brillouin para o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.	130
Tabela 5.5 – Sistema 3: Segunda configuração FBG para o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.	131
Tabela 5.6 – Sistema 4: Configuração DTS Raman para o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.	132
Tabela 5.7 – Comparação dos sistemas.	132

Lista de Abreviaturas e Símbolos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DTS	<i>Distributed Temperature Sensors</i>
DTSS	<i>Distributed Temperature and Strain Sensors</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FO	Fibra Óptica
GB	<i>Chinese Standard</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
OFDR	<i>Optical Frequency Domain Reflectometry</i>
PCS	<i>Plastic Clad Silica</i>
UV	Ultravioleta
WTI	Winding Temperature Indicator
$\Delta\phi$	Varição da Fase da Luz
λ	Comprimento de Onda da Luz no Vácuo
l	Comprimento o Guia de Onda
Δl	Varição do Comprimento do Guia de Onda
n_w	Índice de Refração do Meio
Δn_w	Varição do Índice de Refração do Meio
λ_B	Comprimento de Onda Bragg
η_{eff}	Índice de Refração Efetivo do Núcleo
Λ	Período da Rede de Bragg
$\Delta\lambda_B$	Varição do Comprimento de Onda de Bragg
ΔT	Varição da Temperatura da Rede
Δl	Varição do Comprimento da Grade
h	Constante de Planck

$\Delta\nu$ Espalhada	Diferença entre a Frequência do Raio Incidente e a Luz
k	Constante de Boltzmann
T	Temperatura do Meio
ν_B	Frequência de Brillouin
V_a	Velocidade da Onda Acústica no Meio
λ_i	Comprimento de Onda da Luz Incidente

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os principais objetivos desta dissertação de mestrado, bem como descreve a estrutura utilizada ao longo do texto.

1.2 Relevância do Tema

A determinação do valor da temperatura do ponto mais quente do transformador é um fator utilizado para quantificar o nível de carregamento e envelhecimento do equipamento. Essa informação, agregada à duração das maiores solicitações térmicas, permite determinar a perda de vida útil do transformador. Com o conhecimento do carregamento e da sua duração, é possível chegar-se a um adicional financeiro, estabelecido por norma de acordo com a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2002).

Tradicionalmente, o perfil de temperatura medido é obtido a partir de um método indireto que se baseia na corrente que circula em um resistor padrão, como previsto na norma ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 5380 (NBR 5380, 1993). Essa sistemática apresenta basicamente três inconvenientes, a saber:

- Baixa exatidão do cálculo da temperatura dos enrolamentos;
- Não representação da temperatura do ponto mais quente;
- Não localização dos pontos de maiores solicitações térmicas.

Atualmente, existem técnicas modernas de monitoramento térmico que podem ser aplicadas diretamente aos enrolamentos do transformador. Geralmente, a aplicação dessas tecnologias ocorre de forma pontual, onde alguns sensores – na ordem de unidades – são inseridos em contato direto com a isolação dos condutores das bobinas do equipamento. De acordo com a norma IEC 60076-2 (IEC, 2011), as instalações desses sensores devem ser feitas em locais onde as maiores solicitações térmicas são esperadas. Essa mesma norma sugere que as regiões de temperaturas mais elevadas se encontram nas extremidades superiores dos enrolamentos.

Entretanto, em (PICANÇO, 2009) observa-se que a localização do ponto de maior solicitação térmica ocorre a 1/3 da altura do enrolamento de menor tensão, na primeira camada do mesmo, para transformadores de distribuição. Tal constatação foi alcançada devido à inserção de 12 sensores, baseados em redes de Bragg, diretamente aos enrolamentos de um determinado transformador, distribuídos ao longo das bobinas do equipamento. Desse modo, a constatação prática da localização do ponto mais quente realizada nesse trabalho permite o questionamento quanto à posição da região de maior solicitação térmica do transformador.

As Tabela 1.1 e Tabela 1.2, baseadas na norma IEC 60076-2 (IEC, 2011), apresentam as quantidades mínimas de sensores para transformadores trifásicos e monofásicos, respectivamente.

Tabela 1.1 – Número mínimo de sensores recomendados para transformadores trifásicos segundo IEC 60076-2 (IEC, 2011).

Potência Nominal [MVA]	Sistema de Resfriamento	Número de Sensores e Fase de Instalação				
		Total	Fase Central		Fases Laterais	
			Enrolamento de Maior Tensão	Enrolamento de Menor Tensão	Enrolamento de Maior Tensão	Enrolamento de Menor Tensão
$20 \leq S_N < 100$	ON.. OF..	8	2	2	1	1
	OD..	6	1	1	1	1
$S_N \geq 100$	Todos os sistemas	8	2	2	1	1

Tabela 1.2 – Número mínimo de sensores recomendados para transformadores monofásicos segundo IEC 60076-2 (IEC, 2011).

Potência Nominal [MVA]	Sistema de Resfriamento	Número de Sensores		
		Total	Fase Central	
			Enrolamento de Maior Tensão	Enrolamento de Menor Tensão
$S_N \geq 50$	Todos os sistemas	4	2	2

As Figura 1.1 e Figura 1.2 apresentam formas de instalação dos sensores em transformadores com diferentes tipos de enrolamentos e núcleos, conforme encontrado na norma IEC 60076-2 (IEC, 2011).

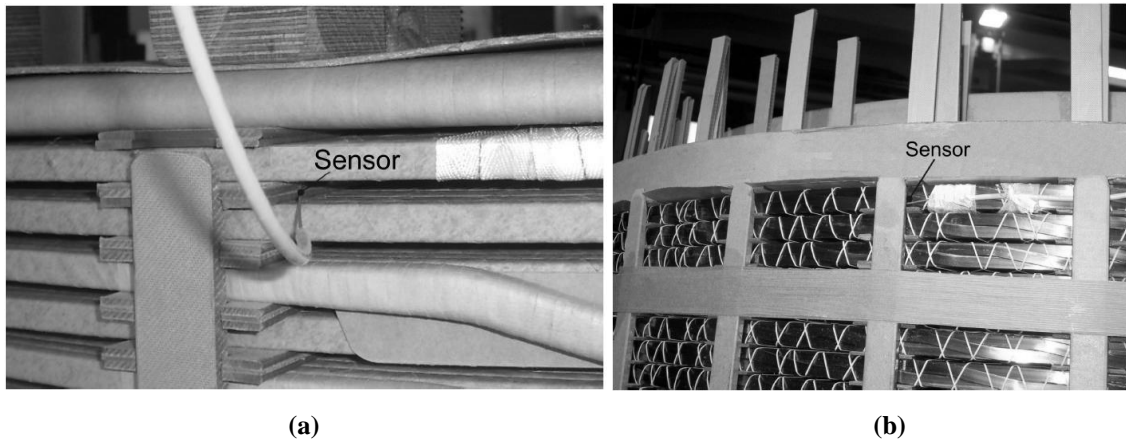


Figura 1.1 – Aplicação dos sensores de temperatura: (a) Inserção do sensor em um transformador com enrolamento do tipo disco; (b) Alocação do sensor em um transformador com enrolamento transposto (IEC, 2011).

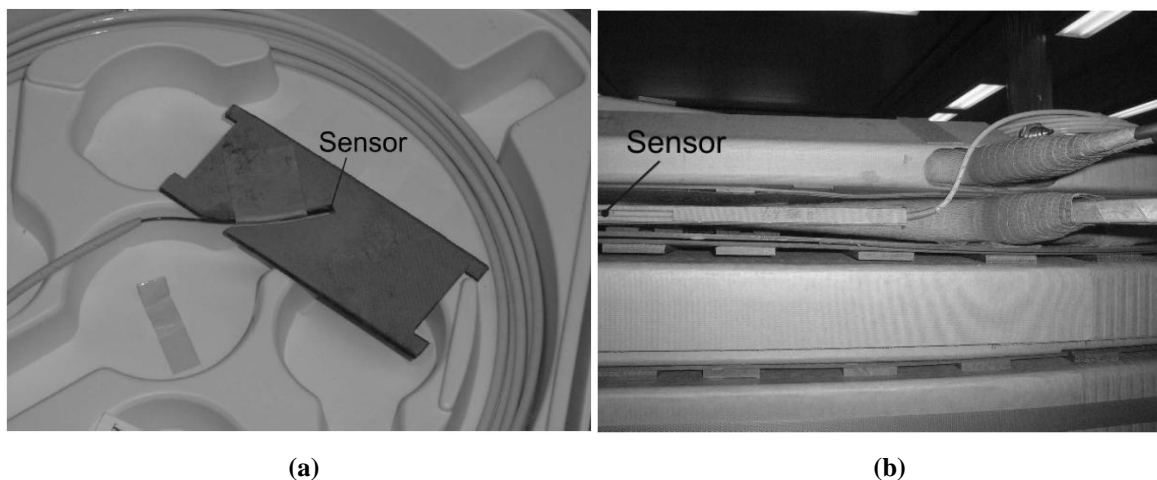


Figura 1.2 – (a) Inserção do sensor em um espaçador; (b) Aplicação do conjunto sensor e espaçador no enrolamento de um transformador do tipo núcleo envolvente (IEC, 2011).

Tomando-se como base os aspectos de medição de temperatura vigentes, permite-se alguns questionamentos acerca do tema:

- A forma de cálculo de vida útil do transformador baseada na estimativa da temperatura através do método resistivo conduz a valores verdadeiros?
- As maiores solicitações térmicas realmente ocorrem nas extremidades superiores dos enrolamentos do transformador?
- A utilização do número mínimo de sensores proposto pelas Tabela 1.1 e Tabela 1.2 é suficiente para garantir que a leitura de temperatura seja realmente a do ponto mais quente?

- A localização das maiores solicitações térmicas são fixas ou podem variar de acordo com o carregamento?

As respostas às questões supracitadas são fundamentais para a operação, manutenção, cálculo da vida útil técnica e econômica, otimização do processo de refrigeração, auxílio no projeto e fabricação de transformadores de potência. Com as metodologias usualmente empregadas para o monitoramento do equipamento, podem-se fornecer informações que levem a respostas não adequadas aos questionamentos levantados. Esse fato pode acarretar na má operação, mau planejamento e, conseqüentemente, prejuízos econômicos desnecessários para o sistema.

1.3 Objetivos e Contribuições Esperadas

Este trabalho tem como objetivo principal realizar o levantamento, a proposta e a comparação de técnicas de medição de temperatura que possam ser utilizadas para se obter o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência. Dessa forma, pode-se listar as quatro principais metas deste trabalho:

- Descrição dos benefícios da aplicação do mapeamento térmico volumétrico para transformadores de potência;
- Abordagem do princípio de funcionamento de técnicas de sensoriamento térmico baseadas em fibras ópticas;
- Demonstração da aplicação das técnicas convencionais e baseadas em fibras ópticas para o monitoramento térmico em transformadores;
- Comparação técnica, detalhes da instalação e dos custos de cada tecnologia aplicada ao mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação de mestrado está estruturada em seis capítulos, conforme exibidos a seguir:

-
- Capítulo 1 – Introdução: São exibidos os objetivos do trabalho bem como as contribuições esperadas. Da mesma forma, é exposta a metodologia de trabalho utilizada;
 - Capítulo 2 – Considerações sobre o Mapeamento Térmico Volumétrico: São conceituados desde os sistemas de medição de temperatura até os sistemas de mapeamento térmico volumétrico. As características da aplicação do mapeamento térmico volumétrico em transformadores são expostas, bem como os requisitos para a utilização da metodologia;
 - Capítulo 3 – Técnicas de Monitoramento de Temperatura via Fibras Ópticas: Nesse capítulo, tem-se por objetivo apresentar, classificar e descrever os sensores de temperatura baseados em fibras ópticas. Os modos de funcionamento e os resultados de medição realizadas por esses dispositivos são apresentados;
 - Capítulo 4 – Aplicação das Técnicas de Monitoramento de Temperatura em Transformadores: Capítulo no qual são apresentadas aplicações para o monitoramento de temperatura em transformadores. São exibidas desde a utilização das técnicas convencionais até as baseadas em fibras ópticas para o monitoramento térmico em transformadores;
 - Capítulo 5 – Comparação das Técnicas de Mapeamento Térmico Volumétrico em Transformadores: Capítulo destinado a análise das características técnicas de cada sistema, das peculiaridades da instalação dos sensores em transformadores e dos custos relativos a cada sistema;
 - Capítulo 6 – Conclusões: São comentadas as contribuições deste trabalho, bem como as sugestões para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Considerações sobre o Mapeamento Térmico Volumétrico em Transformadores

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo descrever as definições básicas relativas à medição, ao registro e ao mapeamento da temperatura em transformadores de potência. Neste tópico, são apresentados os benefícios do mapeamento térmico volumétrico em transformadores bem como os requisitos necessários para a aplicação desse sistema. As exposições da aplicabilidade de algumas técnicas de medição de temperatura e suas características são descritas.

2.2 Definições Preliminares

Para melhor entendimento da proposta deste trabalho, torna-se indispensável descrever alguns conceitos ligados aos sistemas de medição de temperatura. Sendo assim, os tópicos listados abaixo apresentam definições que têm por objetivo esclarecer ideias relacionadas ao mapeamento térmico volumétrico. Para tanto, optou-se por utilizar uma sequência de descrições abordando desde a definição de medição de temperatura, passando pelo sistema de registro e mapeamento térmico, até obter o significado de mapeamento térmico tridimensional e, por fim, conceituar o mapeamento térmico volumétrico. Portanto, a seguir são especificados os conceitos, um a um, dos termos atrelados à medição térmica.

- **Medição de Temperatura:** Por definição, a medição de temperatura é a quantificação, a determinação do comportamento térmico de um dado sistema. Existem diversos instrumentos capazes de realizar a medição de temperatura, constituindo desde sistemas simples a sofisticados. A título de exemplo, a Figura 2.1 exibe dois medidores de temperatura.

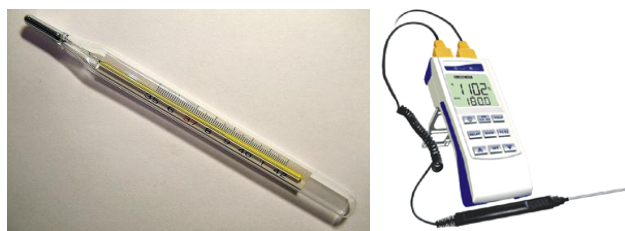


Figura 2.1 – Exemplos de medidores de temperatura. Termômetro baseado na expansão/contração do mercúrio e medidor digital utilizando-se termopares (THERMOMAX, 2012).

- **Medição Registrada de Temperatura:** É o ato de mensurar e armazenar, com periodicidade, o valor da temperatura. O registro dos valores de temperatura pode ser realizado manualmente, transcrevendo as medições térmicas ao longo do tempo, ou automaticamente, por meio de equipamentos dedicados a gravar os dados relativos à temperatura. Esse conceito também é comumente conhecido como monitoramento térmico. A Figura 2.2 traz a medição registrada de temperatura ao longo de 55 minutos de ensaio. Os valores de temperatura foram gravados entre intervalos de 5 segundos.

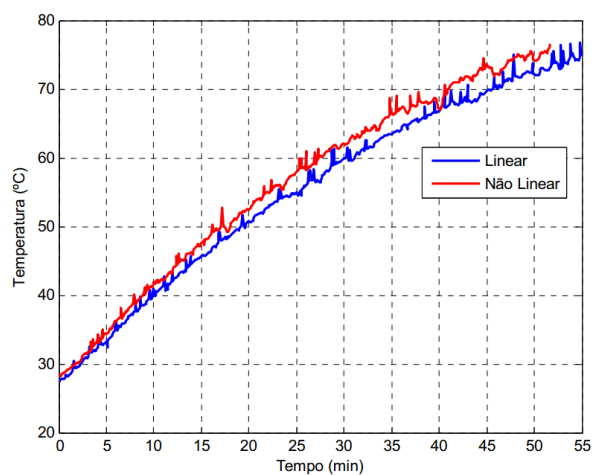


Figura 2.2 – Exemplo de medição registrada da temperatura (PARENTONI, 2010).

- **Mapeamento Térmico:** Pode ser determinado como a medição da temperatura em diversos pontos de um sistema de forma a obter a distribuição térmica do mesmo, conforme pode ser ilustrado pela Figura 2.3 que apresenta o mapeamento térmico terrestre.

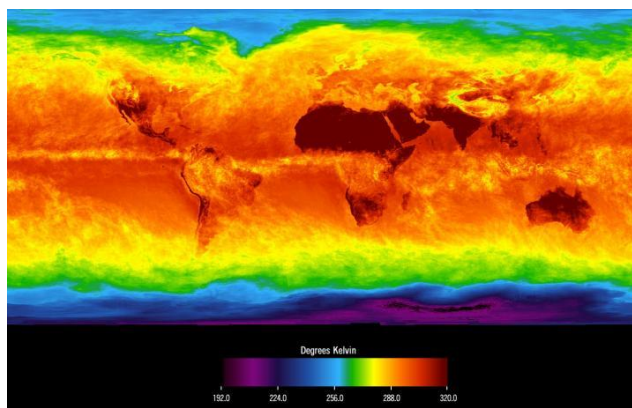


Figura 2.3 – Mapeamento da temperatura terrestre (NASA, 2012a).

- **Mapeamento Térmico Registrado:** Pode ser definido como a medição registrada da temperatura em diversos pontos de um sistema de forma a obter a evolução térmica do mesmo. Basicamente, esse conceito é formado pelo mapeamento térmico aliado à medição registrada de temperatura. A Figura 2.4 exhibe um gráfico relativo ao mapeamento térmico registrado.

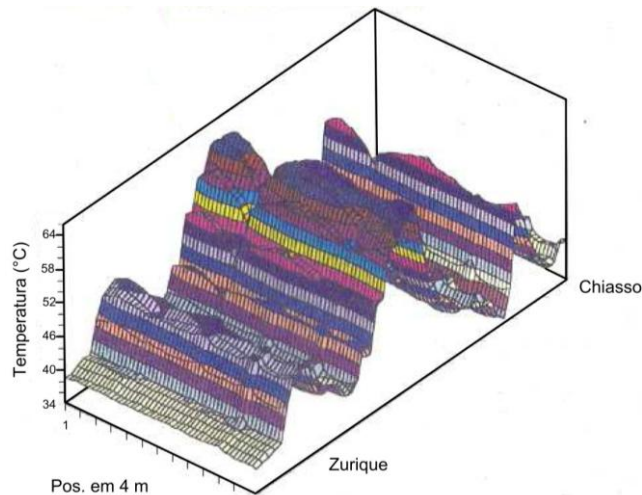


Figura 2.4 – Exemplos de mapeamento térmico registrado. Traduzida do trabalho de UKIL et al. (2011).

- **Mapeamento Térmico Tridimensional:** Pode ser definido como a visualização do aspecto térmico tridimensional de um sistema, equipamento ou objeto, porém restrito à temperatura da superfície do componente. A Figura 2.5 apresenta uma imagem ilustrativa que exemplifica o mapeamento térmico tridimensional. Nota-se que é exibida a distribuição da temperatura somente na superfície do sistema, ou seja, não é possível identificar a temperatura interna do objeto em questão.

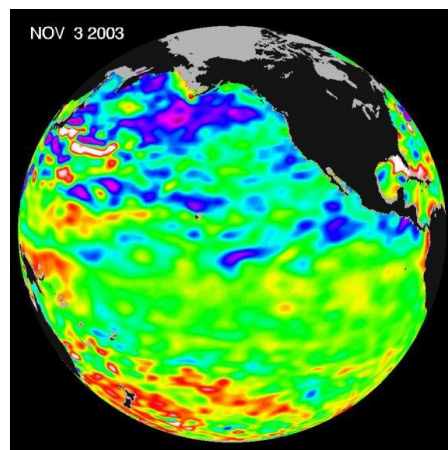


Figura 2.5 – Exemplo de mapeamento térmico tridimensional (NASA, 2012b).

- **Mapeamento Térmico Volumétrico:** Pode ser determinado como o mapeamento da temperatura nas partes mais internas do sistema até atingir a superfície do mesmo. Para esclarecimento desse conceito, pode-se considerar o objeto monitorado como composto de diversas camadas sobrepostas umas as outras. Realizando-se o mapeamento térmico de cada camada e, por fim, agregando-se as diversas camadas térmicas do sistema, obtém-se o mapeamento térmico de todo o volume do sólido. Um exemplo ilustrativo desse tipo de mapeamento é mostrado na Figura 2.6. Nota-se que é realizada uma espécie de varredura da temperatura de todas as partes do sólido.

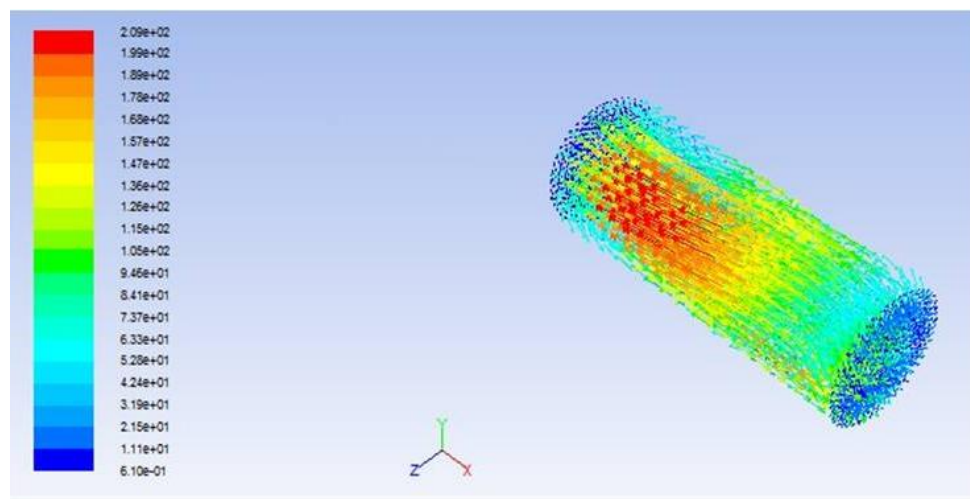


Figura 2.6 – Exemplo ilustrativo do mapeamento térmico volumétrico (ANSY, 2012).

2.3 Características do Mapeamento Térmico Volumétrico em Transformadores

O mapeamento térmico volumétrico em transformadores apresenta diversas particularidades importantes para a operação do equipamento. Prezando enfatizar algumas dessas peculiaridades para o melhor entendimento da função desse sistema, destacam-se determinados itens, conforme apresentado a seguir:

- **Mapeamento Completo:** O sistema de mapeamento térmico volumétrico em transformadores é alcançado por meio da medição de temperatura nas diversas partes constituintes do equipamento como núcleo, enrolamentos, óleo, tanque, isolação sólida entre outras partes.

- **Registro da Temperatura em Pontos Importantes:** Com o emprego do mapeamento térmico volumétrico aliado ao registro dos valores de temperatura, é possível obter o comportamento térmico das mais diversas partes do equipamento. Assim, pode-se monitorar a temperatura em pontos críticos do transformador como, por exemplo, no papel isolante dos condutores.
- **Localização do Ponto mais Quente:** O mapeamento térmico volumétrico trabalha com uma densidade elevada de sensores distribuídos ao longo de todo volume do equipamento. Dessa forma, é possível localizar, com boa estimativa espacial, o local de maiores solicitações térmicas.
- **Registro da Temperatura do Ponto mais Quente:** Como o sistema dispõe de uma gama elevada de sensores, e comparando-se os resultados obtidos pelos termômetros, pode-se identificar e registrar a temperatura do ponto mais quente do transformador, sem a necessidade de estimativas.
- **Não Uso de Modelos Matemáticos:** Como se trabalha com a medição térmica diretamente nas partes constituintes do transformador, pode-se dispensar o uso de modelos térmicos para o equipamento, uma vez que esses trazem apenas uma estimativa da temperatura devido as suas limitações.
- **Acréscimo da Quantidade de Informações:** Devido ao elevado número de sensores instalados, há também um grande volume de dados relativos ao comportamento térmico do transformador. Dessa forma, pode-se amparar, com maior competência, a tomada de decisão relativa à operação do equipamento.

Os itens supracitados apresentam algumas das potencialidades do mapeamento térmico volumétrico. No entanto, para desfrutar desse potencial, é necessário o desenvolvimento de programas de gerenciamento dos dados obtidos por esse sistema. Com o tratamento adequado dos valores de temperatura, podem-se obter diversas informações de importantes para o correto funcionamento do transformador. Algumas das principais características associadas a tal software de gerenciamento térmico são listadas, conforme encontrado a seguir:

-
- Permitir a visualização dos enrolamentos do transformador sob diferentes modos, como, por exemplo, visualização em órbita, projeção, perspectiva, pontual entre outras;
 - Realizar o registro histórico da evolução térmica do transformador sob diferentes condições de operação;
 - Com base no banco de dados dos valores da temperatura do equipamento frente às situações de carga, pode-se trabalhar com a previsão de aquecimento do transformador para um determinado carregamento;
 - Controlar e otimizar a operação da ventilação forçada durante o ciclo de carga do equipamento. Particularmente, operar o sistema de refrigeração de maneira eficiente, principalmente nos períodos de carregamento acima do nominal;
 - Avaliar a viabilidade econômica do carregamento acima do nominal com base nos seguintes fatores: histórico térmico, consumo energético da refrigeração, estimativa do valor e duração do sobre-carregamento, perda de vida útil do transformador;
 - Calcular a perda de vida útil do transformador com base nos registros de temperatura do ponto de maior solicitação térmica do equipamento;
 - Detectar problemas de refrigeração como, por exemplo, bloqueio dos ventiladores, obstruções dos canais de óleo entre outros;
 - Alarme e comando precisos baseados na temperatura do ponto mais quente do equipamento;
 - Visualizar, em tempo real, o comportamento térmico do transformador bem como obter os perfis térmicos do equipamento.

2.4 Aplicabilidade de Técnicas de Medição de Temperatura no Mapeamento Térmico Volumétrico

Uma vez listadas as características do mapeamento térmico volumétrico, torna-se necessário descrever as condições necessárias para a aplicabilidade desse sistema em transformadores, bem como relatar sobre algumas das técnicas de medição de temperatura e suas particularidades. Assim sendo, os itens subsequentes abordam sobre esses temas supracitados.

2.4.1 Requisitos

Os principais pré-requisitos necessários para se alcançar o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência são listados a seguir. Os tópicos abordam características consideradas fundamentais para a operação de tal sistema.

- **Quantidade de Pontos de Medição:** Deve-se trabalhar com uma elevada quantidade de sensores de temperatura para a obtenção do mapeamento térmico volumétrico. O alcance de um elevado número de termômetros dentro do transformador pode ser atingido por meio da utilização de multiplexadores, operando no domínio do tempo e/ou do comprimento de onda. A operação em paralelo dos interrogadores, que contêm a fonte e o detector óptico, também coopera para o aumento do número de pontos de medição térmica.
- **Esquema de Instalação:** Os sensores devem ser instalados ao longo das camadas dos enrolamentos, preferencialmente durante o processo de bobinamento dos mesmos, nas direções axiais e radiais para que se possa constituir o mapeamento térmico volumétrico do equipamento.
- **Tempo de Leitura e Aquisição de Dados:** A princípio, deve-se operar com um sistema de leitura, aquisição e processamento de dados da ordem de unidades de minutos, pois as constantes térmicas de transformadores de potência em geral são elevadas. Entretanto, se desejado obter as variações transitórias de temperatura durante condições de curto-circuito, idealmente necessita-se de um

sistema com tempo de leitura, aquisição e processamento de dados da ordem de segundos.

- **Resolução e Exatidão Térmica:** As técnicas de monitoramento aplicadas no mapeamento térmico volumétrico em transformadores preferencialmente devem operar com resolução e exatidão na leitura de temperatura da ordem de unidades de graus Celsius, uma vez que se tem como um dos objetivos distinguir os pontos de maiores solicitações térmicas.
- **Temperatura Máxima:** Os sensores de temperatura devem operar continuamente até 150°C , uma vez que esta é a temperatura máxima estimada de operação do transformador (TEUNISSEN et al., 2002) e suportar uma temperatura transitória de até 250°C , tomando-se como base uma condição severa de curto-circuito passante no equipamento com duração de 2 s (HEATHCOTE, 2007).
- **Resolução e Exatidão Espacial:** Os valores dessas duas grandezas podem variar de acordo com o porte e diâmetro das bobinas do transformador, com o modo de instalação dos sensores, com a quantidade viável de termômetros inseridos no equipamento entre outros fatores.
- **Calibração:** Os sensores térmicos preferencialmente devem ser imunes a possíveis calibrações durante a operação do sistema, uma vez que se torna impraticável a retirada dos sensores para averiguação de seus estados de funcionamento.
- **Material Constituinte:** O conjunto formado por sensores e meio transmissor instalado no transformador deve ser constituído por material dielétrico de forma a minimizar a influência no meio isolante do transformador.
- **Influência Mecânica:** O arranjo do sistema de sensoriamento deve ser extremamente pequeno de modo a evitar ao máximo possíveis alterações no projeto do transformador.

- **Suportabilidade**: Os sensores e o meio transmissor devem ser capazes de suportarem as condições químicas, mecânicas e elétricas do ambiente interno do transformador.

2.4.2 Informações Gerais

Descritos os pré-requisitos indispensáveis para se desenvolver um sistema de monitoramento térmico volumétrico, os itens subsequentes abordam determinados aspectos coerentes com as técnicas convencionais e baseadas em fibra óptica para medição de temperatura.

2.4.2.1 Sensores Convencionais

Alguns dos sensores convencionais aplicados para a medição de temperatura em transformadores, como por exemplo, termopares e termorresistores, apresentam certas características comuns que norteiam a operação desses dispositivos. Algumas das peculiaridades desses sensores devem ser destacadas, conforme apresentadas a seguir.

Os sensores convencionais citados são formados por materiais condutores. Desse modo, esses sistemas podem apresentar os seguintes inconvenientes:

- Interferências eletromagnéticas: os sensores convencionais estão sujeitos a interferências eletromagnéticas, fatos que podem levar a valores errôneos de leitura de temperatura;
- Problemas de isolamento: pode induzir a diminuição da suportabilidade dielétrica do meio isolador;
- Diversidade de cabos: cada sensor é inserido em um cabo específico. Portanto, para a utilização de diversos sensores, há também a necessidade de utilização de um número equivalente de cabos, podendo potencializar os possíveis problemas de isolamento.

2.4.2.2 Sensores em Fibra Óptica

Há diversos tipos de sensores de temperatura em fibra óptica. Pode-se citar como exemplo, os sensores baseados no decaimento fluorescente, os sensores embasados em redes de Bragg e os sensores fundamentados no espalhamento de luz do guia óptico. Esses três tipos de termômetros apresentam características bastante distintas entre si. Desse modo, faz-se necessário relatar sobre algumas das peculiaridades dos sistemas de medição de temperatura baseados nos guias ópticos.

Os sensores em fibra óptica baseados no decaimento fluorescente são empregados em transformadores para a medição de temperatura diretamente nos enrolamentos do equipamento. Esse tipo de sensor opera de forma pontual, ou seja, o elemento fluorescente é inserido no guia óptico e apenas essa região é sensível à temperatura. Os modelos comerciais desses dispositivos apresentam apenas um elemento sensor por fibra, geralmente inserido em um dos terminais do guia de luz. Assim, para se trabalhar com um grande número de locais de monitoramento, deve-se também inserir o mesmo número de fibras no transformador.

Os termômetros em fibra óptica embasados em redes de Bragg, conhecidos como sensores FBG (*Fiber Bragg Gratings*), também são pontuais. No entanto, apresentam certas vantagens em relação ao número de sensores por guia óptico, pois é possível inscrever dezenas de grades de Bragg em um mesmo guia de luz. Além dessa facilidade, pode-se realizar a medição simultânea dos elementos inseridos em uma mesma fibra através da multiplexação no comprimento de onda. Pode-se trabalhar com diversas fibras contendo variados sensores, utilizando-se a multiplexação no comprimento de onda e no tempo. Portanto, esse tipo de sistema apresenta capacidade intrínseca de medição de temperatura em diversos pontos com utilização de um número de cabos ópticos reduzido.

Por fim, os sistemas fundamentados no espalhamento de luz são sistemas distribuídos de medição de temperatura, uma vez que a própria fibra óptica em si atua como região sensora. Esses sistemas são conhecidos como sensores DTS (*Distributed Temperature Sensors*) ou DTSS (*Distributed Temperature and Strain Sensors*). Existem sensores baseados em três diferentes tipos de espalhamento: Rayleigh (DTSS), Raman (DTS) e Brillouin (DTSS). Cada uma dessas formas de dispersão de luz possui propriedades distintas em relação à medição térmica. Por exemplo, os sistemas baseados no efeito Rayleigh apresentam menor alcance e possuem melhores resoluções espaciais, podendo trabalhar com fibras na ordem de unidades de metros a quilômetros com resoluções

milimétricas da temperatura ao longo do guia de luz. Já os sistemas fundamentos no espalhamento Raman ou Brillouin apresentam maiores alcances – da ordem de dezenas a centenas de quilômetros – e resoluções espaciais da ordem de metros.

2.5 Considerações Finais

Este capítulo teve como principal objetivo apresentar o conceito de mapeamento térmico volumétrico, os benefícios da utilização dessa ferramenta em transformadores de potência, os requisitos necessários para se trabalhar com esse tipo de sistema e, por fim, a aplicabilidade de algumas das técnicas de medição de temperatura em transformadores e suas características.

Como o princípio de funcionamento das técnicas convencionais de medição de temperatura é largamente conhecido, decidiu-se abordar, para descrição do funcionamento e a aplicação para medição de temperatura, apenas as técnicas de medição térmica baseadas em fibras ópticas, conforme encontrado no Capítulo 3 deste trabalho.

Capítulo 3

Técnicas de Monitoramento de Temperatura Via Fibras Ópticas

3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta uma descrição de técnicas de monitoramento de temperatura baseadas em sensores inseridos em fibras ópticas ou utilizando-se o próprio cabo óptico como elemento sensor. Ambas são embasadas em fenômenos ópticos dependentes da temperatura e, desse modo, pode-se usufruir desse condicionamento para mensurar as variações de temperatura frente ao monitoramento das variações das grandezas ópticas.

3.2 Técnicas de Sensoriamento Baseadas em Fibra Óptica

As técnicas de sensoriamento baseadas em fibra óptica (FO) fazem o uso do monitoramento de determinadas grandezas ópticas sensíveis a certos estímulos externos. A variação desses estímulos provoca a alteração no espectro óptico em propagação no guia de onda. Há diversas técnicas de medição baseadas em fibras ópticas como, por exemplo, interferometria Fabry-Perot, sensores em fibras ópticas polarizados entre outras (YU e YIN, 2002). Do mesmo modo, há também diversas classificações dessas técnicas, onde as categorias mais utilizadas tomam como base a diferenciação dos sensores quanto ao *tipo da região sensora* e quanto ao *tipo de modulação da luz*. Comumente a região sensora é dividida em duas classes: *intrínseca* ou *extrínseca*¹. Com relação à modulação da luz, usualmente trabalha-se com quatro classes: *intensidade*, *fase*, *comprimento de onda* e *polarização*. A Figura 3.1 apresenta a divisão dos sensores em FO pontuais ou distribuídos com relação à região sensora. Referente à modulação da luz, os sensores pontuais ou distribuídos são classificados conforme exibido na Figura 3.2.

Com relação ao sistema geral para monitoramento de uma determinada grandeza por meio de sensores ópticos, de acordo com RIGHINI et al (2009), esse sistema deve ser constituído por fonte de luz, fibra óptica, interface óptica para o acoplamento entre a fonte luminosa e a fibra óptica, detector de luz e componentes eletrônicos para amplificação e processamento do sinal digitalizado. Geralmente, utilizam-se como fonte de luz os diodos emissores de luz – LED's. Segundo SOLOMAN (2010), esses dispositivos apresentam diversas vantagens em comparação com as lâmpadas incandescentes e outras fontes

¹ Há alguns autores que classificam os sensores em FO como intrínsecos, extrínsecos e híbridos, conforme encontrado em (RIGHINI et al, 2009).

luminosas. Algumas dessas vantagens podem ser citadas como acionamento e desligamento muito rápido, tamanho reduzido da fonte de luz, baixo consumo de energia e vida útil elevada.

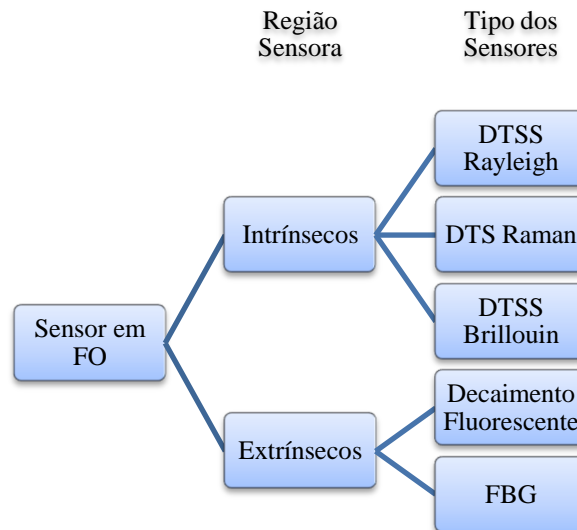


Figura 3.1 – Classificação dos sensores em FO quanto à região sensora.

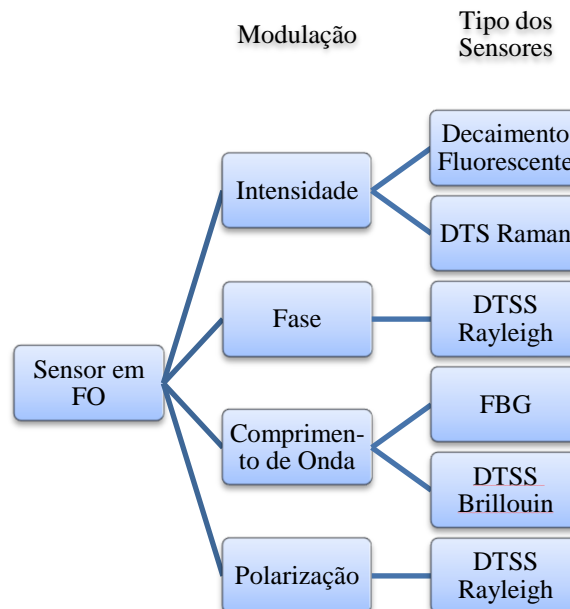


Figura 3.2 – Classificação dos sensores em FO quanto à modulação da luz.

3.2.1 Classificação dos Sensores em Fibras Ópticas Quanto à Região Sensora

3.2.1.1 Sensores em Fibras Ópticas Intrínsecos

Os sensores em fibras ópticas intrínsecos têm como região sensora o próprio guia óptico. Toda extensão da fibra óptica atua como elemento sensor frente a determinados estímulos externos como, por exemplo, temperatura e deformação mecânica. Enquanto o feixe luminoso propaga dentro do guia óptico, determinadas excitações ambientais podem atuar em qualquer parte da fibra óptica. Essa ação do meio externo pode provocar uma alteração espectral no feixe óptico que propaga na fibra. Dessa forma, podem-se mensurar grandezas que provoquem alterações espectrais na luz em propagação. As informações desses estímulos vêm impressas no espectro luminoso. Fazendo-se uma análise minuciosa do comportamento do feixe óptico, pode-se mapear o mensurando nos aspectos quantitativos bem como localizar seu ponto de ocorrência. A Figura 3.3 exemplifica a atuação do mensurando diretamente na fibra óptica.

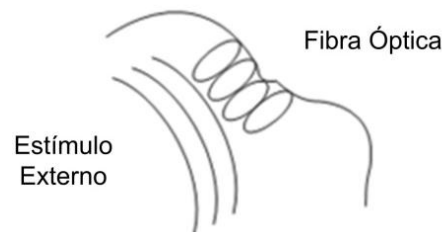


Figura 3.3 – Sensor em FO intrínseco: atuação do mensurando diretamente no guia óptico. Traduzida do trabalho de YIN et al. (2008).

Nos sensores intrínsecos, o feixe luminoso sempre fica confinado na fibra óptica, que atua como sensor, não sendo necessário o deslocamento do feixe óptico a uma região de modulação (YIN et al, 2008).

3.2.1.2 Sensores em Fibras Ópticas Extrínsecos

Os sensores em fibras ópticas extrínsecos utilizam como região sensora um elemento externo à fibra ou uma modificação na mesma de forma a sensibilizá-la frente a

determinados estímulos externos. A informação que se deseja mensurar é impressa no feixe luminoso por meio de transdutor óptico acoplado à fibra óptica (RIGHINI et al., 2009). O feixe óptico pode ou não sair da fibra óptica dependendo do meio modulador. Caso a região sensora não pertença ao guia óptico, a luz só pode atingir o elemento sensor desde que deixe a fibra óptica. Uma vez que a região sensora foi atingida, a luz volta a ser guiada pela fibra óptica, trazendo consigo informações do mensurando (YU e YIN, 2002). A Figura 3.4 exemplifica a modulação da luz por meio de um transdutor externo ao guia óptico.



Figura 3.4 – Sensor em FO extrínseco: transdutor óptico acoplado ao guia óptico. Traduzida do trabalho de YIN et al. (2008).

Nos sensores em FO extrínsecos, o feixe luminoso pode ser confinado no guia óptico desde que o elemento modulador dos parâmetros ópticos seja inscrito ou inserido na própria fibra. A Figura 3.5 apresenta um exemplo de sensor extrínseco, onde o feixe óptico se mantém limitado dentro do guia óptico.

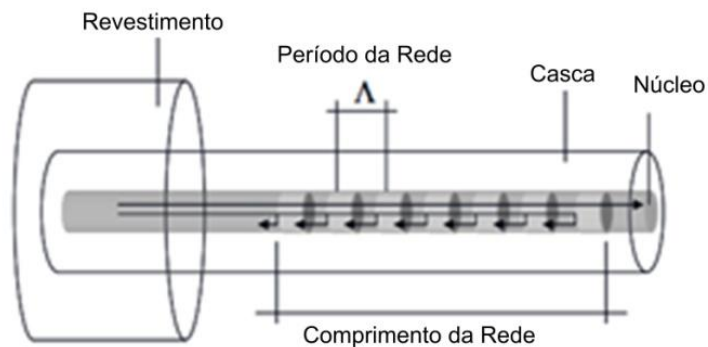


Figura 3.5 – Exemplo de sensor extrínseco com confinamento da luz. Modulação do feixe óptico realizada por redes inscritas no núcleo de uma fibra óptica. Adaptada do trabalho de ZIMMERMANN et al. (2007).

Outro exemplo de sensores extrínsecos é mostrado na Figura 3.6, onde parte da casca da fibra óptica foi alterada com um determinado tipo de material sensível a grandeza de interesse de medição. Nesse caso, a luz também permanece dentro do guia óptico mesmo com a modificação de sua casca.

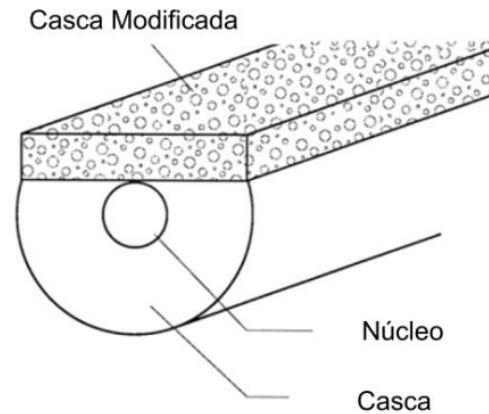


Figura 3.6 – Modificação da casca da fibra óptica. Traduzida do trabalho de RIGHINI et al. (2009).

3.2.2 Classificação dos Sensores em Fibras Ópticas Quanto à Modulação

3.2.2.1 Sensores Baseados na Modulação da Intensidade da Luz

Os sensores de intensidade, como o próprio nome sugere, operam segundo a modulação baseada na intensidade da radiação que propaga na fibra óptica. Esses sensores possuem algumas vantagens como, por exemplo, baixo custo dos dispositivos optoeletrônicos podendo tornar sua implementação viável financeiramente. Isso se deve ao fato de ser relativamente fácil de alterar a intensidade da luz, fazendo com que os dispositivos utilizados nesse tipo de sensor sejam simples. No entanto, há uma desvantagem desse tipo de sensores, uma vez que são dependentes basicamente das variações da intensidade de luz da fonte luminosa e das perdas do sistema óptico como um todo, que ocasiona atenuação do sinal óptico (GOUVEIA, 2008).

3.2.2.2 Sensores Baseados na Modulação da Fase da Luz

Os sensores que operam segundo a modulação da fase da luz apresentam vantagens com relação aos sensores baseados na intensidade da radiação. Algumas dessas vantagens podem ser citadas como boa versatilidade do elemento sensor, grande alcance dinâmico do sistema, maior sensibilidade e multiplexagem eficiente (RIBEIRO, 1996).

Geralmente, a detecção da variação da fase da luz é fundamentada em técnicas interferométricas. Basicamente, a variação da grandeza mensurada pode causar a variação no comprimento do guia de onda e/ou no índice de refração do meio que causam uma variação da fase da luz, conforme mostra a Equação (3.1) (RIGHINI et al, 2009).

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{v\u00e1cuo}}} (n_w \Delta l + l \Delta n_w) \quad (3.1)$$

Sendo que $\Delta\phi$ representa a variação da fase da luz, λ o comprimento de onda da luz no vácuo, l o comprimento o guia de onda, Δl a variação do comprimento do guia de onda, n_w o índice de refração do meio e Δn_w a variação do índice de refração do meio.

No entanto, as variações no comprimento do guia de onda bem como seu índice de refração podem ser causadas devido a alterações não associadas às grandezas que se deseja mensurar. Desse modo, pode ocorrer a sensibilidade cruzada dos sensores baseados na modulação de fase. Esse fato pode ser minimizado pela presença de um revestimento externo do sensor, de forma a garantir boa sensibilidade frente à grandeza que se deseja mensurar.

3.2.2.3 Sensores Baseados na Modulação do Comprimento de Onda da Luz

As técnicas de interrogação baseadas nas variações do comprimento de onda da luz são utilizadas para sensores que fazem o uso de grades inscritas no interior da fibra óptica (YIN et al., 2008). Desde que a grandeza que se deseja mensurar afete o comprimento de onda da luz, essa técnica pode ser aplicada.

Normalmente, as medições das variações do comprimento de onda não são simples de serem realizadas. Muitos dos interferômetros utilizados para esse tipo de medição são relativamente grandes e pesados, possuem um custo elevado e apresentam um alto consumo de energia (RIGHINI et al., 2009). Por exemplo, um analisador de espectro óptico contém diversas funcionalidades que não são necessárias para a grande maioria dos sensores em fibras ópticas.

Outras técnicas de detecção das variações dos comprimentos de onda podem ser baseadas em filtros. Porém, os filtros em geral são difíceis de serem projetados e caros de serem fabricados para atender um determinado espectro. Assim, nos últimos anos, tem-se aumentado o desenvolvimento e o aprimoramento de técnicas e dispositivos capazes de determinar as variações do comprimento de onda atendendo o quesito de diminuição de preço e melhoria de qualidade técnica. No entanto, uma maneira relativamente simples de contornar os problemas supracitados é trabalhar com dispositivos que convertam as variações do comprimento de onda em variações da intensidade da luz ou variações de fase da mesma. Como ambas apresentam maior facilidade para medição, o sistema como um todo se torna mais simples e, conseqüentemente, mais barato.

3.2.2.4 Sensores Baseados na Modulação da Polarização da Luz

Mesmo nas fibras ópticas monomodos de núcleo com secção reta circular, podem-se existir pequenas assimetrias devido a imperfeições do núcleo da fibra, admitindo assim um formato levemente achatado. Embora sendo o valor de assimetria do núcleo da fibra bastante reduzido, a fibra óptica monomodo é, na realidade, um guia óptico de modo duplo. Assim, o modo fundamental é dividido em dois estados polarizado ortogonalmente. Cada modo propaga através de caminhos com pequenas diferenças nas constantes de propagação. Desse modo, mensurando-se a polarização da luz, pode-se estimar a grandeza externa atuante no guia óptico.

A birrefringência na fibra óptica pode ser atingida também pela modificação do formato do seu núcleo, como por exemplo, ao se trabalhar com um formato de núcleo elíptico (RIGHINI et al., 2009). Nesse caso, a fibra óptica apresenta diferentes índices de refração em relação aos eixos horizontal e vertical. A Figura 3.7 apresenta a secção transversal de uma fibra óptica de núcleo elíptico que apresenta alto valor de birrefringência.

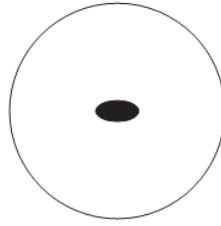


Figura 3.7 – Fibra óptica de alto valor de birrefringência.

Os sensores baseados na polarização da luz podem ser empregados nas medições de corrente e campo magnético. Há também sensores de temperatura que utilizam a medição da polarização da luz para estimar a temperatura ao longo da fibra óptica.

3.3 Sensores de Temperatura Pontuais em Fibras Ópticas

Existem diversas técnicas de medição de temperatura baseadas em FO que trabalham com o monitoramento térmico pontual. Geralmente, os sistemas de monitoramento baseados nessas técnicas são empregados quando se deseja monitorar o comportamento térmico de locais críticos. Esses pontos críticos devem ser previamente conhecidos para que se possam alocar os sensores de modo eficiente. Os itens subsequentes abordam dois tipos de sensores pontuais embasados nas seguintes tecnologias: decaimento fluorescente e redes de Bragg.

3.3.1 Decaimento Fluorescente

3.3.1.1 Conceituação da Fluorescência

A fluorescência é um dos fenômenos ópticos que pertence a uma das categorias da luminescência, sendo a outra a fosforescência. De um modo simples, pode-se definir a luminescência como sendo a emissão de radiação de uma substância quando um determinado elétron passa do estado excitado para o estado fundamental. A diferença básica entre a fluorescência e a fosforescência consiste fundamentalmente no tempo de transição de um estado para o outro. Na fluorescência, o tempo de transição é muito rápido, sendo que o tempo de vida é da ordem de nanossegundos a milissegundos. Já a fosforescência apresenta

uma transição de estados mais lenta, sendo que o tempo de vida é da ordem de milisegundos a segundos (BORTONI et al, 2007), (CALDAS, 2003), (MARQUES FILHO, 2006).

Segundo CALDAS (2003), dois fatores importantes na luminescência são a eficiência quântica e o tempo de vida do estado excitado. A eficiência quântica está correlacionada com a intensidade da emissão. Quanto maior a eficiência quântica, maior é a amplitude do sinal emitido. Já o tempo de vida de um estado excitado é tomado como o tempo médio para que um determinado elétron passe de um estado excitado para o estado fundamental.

Ambos os fatores intensidade e tempo de vida do decaimento são dependentes da temperatura do meio. Desse modo, pode-se mensurá-la monitorando a amplitude do sinal fluorescente ou o tempo de decaimento do mesmo. A Figura 3.8 mostra as formas do pulso de luz emitido e do sinal fluorescente de um sistema de medição de temperatura.

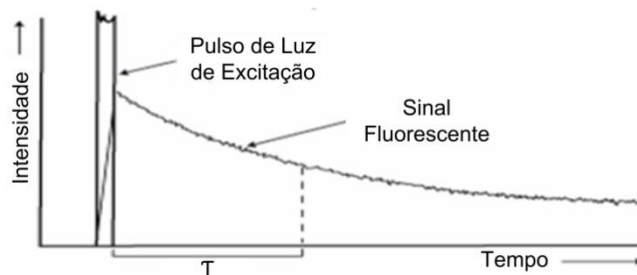


Figura 3.8 – Pulso de luz e sinal fluorescente emitido. Traduzida do trabalho de LUNDQUIST e KNUTH (2008).

Os sistemas de monitoramento baseados na medição da intensidade do decaimento fluorescente apresentam as mesmas desvantagens citadas no item 3.2.2.1. Desse modo, diversos sistemas de monitoramento de temperatura fazem a medição do tempo de decaimento fluorescente, pois assim, a leitura de temperatura é independente das variações de intensidade da fonte óptica, perdas no sistema, calibrações entre outros fatores.

3.3.1.2 Tipos de Sensores baseados no Decaimento Fluorescente

Os sensores baseados no decaimento fluorescente utilizam de materiais emissores de luz que, quando excitados por um pulso de luz provindo de uma fonte óptica, emitem uma radiação luminosa que apresenta um decaimento dependente da temperatura. Assim, é

possível mensurar a temperatura de acordo com a variação do decaimento do sinal fluorescente (CHESTER, 1987).

A informação provinda dos sensores fundamentados na fluorescência pode ser obtida por meio da variação da intensidade de luz, pela variação do tempo de vida do estado excitado ou pela polarização da emissão óptica. No entanto, os sensores mais utilizados fazem o uso da medição da intensidade da luz ou do tempo de vida do decaimento.

Os sensores embasados na fluorescência podem conter diferentes tipos de materiais emissores de luz que se situam na cabeça sensora, também chamada de região de detecção ativa. Há diversas configurações do elemento sensor na fibra óptica, sendo que as duas configurações típicas são:

- **Configuração Topo:** Nessa configuração, o sensor se encontra posicionado na extremidade da fibra, como ilustra a Figura 3.9. A fibra atua apenas como elemento condutor dos feixes de luz. Pode-se notar que é utilizado um revestimento da cabeça sensora para protegê-la mecanicamente quanto a possíveis danos durante a instalação e operação do mesmo.

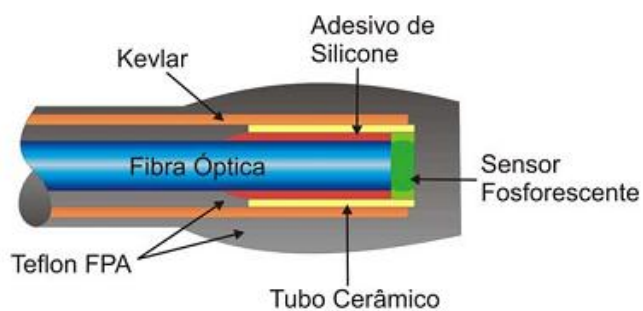


Figura 3.9 – Sensor óptico baseado no decaimento fluorescente utilizando configuração topo (BORTONI et al., 2007).

- **Configuração Campo Evanescente:** Nesse tipo de configuração, a fibra atua tanto como guia de onda quanto como elemento de transdução, pois parte de seu revestimento é retirado de forma a tornar esse meio um elemento sensor, conforme pode ser visualizado pela Figura 3.10. Esse tipo de sensor pode ser inserido ao longo da fibra óptica. Particularmente, esse tipo de configuração pode ser utilizado como elemento de detecção distribuído.



Figura 3.10 – Sensor óptico baseado no decaimento fluorescente utilizando configuração evanescente (CALDAS, 2003).

3.3.1.3 Utilização dos Sensores de Fluorescência para Medição de Temperatura

Diversos trabalhos relatam sobre a aplicação da fluorescência para a medição de temperatura. WICKERSHEIM E ALVES (1981) relataram sobre o princípio de funcionamento do primeiro sensor comercial de temperatura fundamentado no decaimento da fluorescência. Esse trabalho também apresentou uma comparação qualitativa do sensor embasado no decaimento fluorescente com as técnicas ópticas vigentes na época para a medição de temperatura, a saber: termometria no infravermelho, sensor de cristal líquido inserido em fibra óptica entre outros. Segundo os autores, as principais desvantagens dessas duas técnicas supracitadas são: variação da emissividade da superfície sob medição que provoca erros na leitura da temperatura e instabilidade química dos materiais que compõem o cristal líquido, respectivamente.

Assim, os autores desenvolveram um sensor de temperatura baseado no decaimento fluorescente utilizando-se uma estrutura cristalina estável para a composição do sensor. De acordo com os autores, o sistema de monitoramento desenvolvido foi pautado na intensidade de decaimento fluorescente. Medições de temperatura na faixa de -50°C a 250°C foram realizadas com precisão de $0,1^{\circ}\text{C}$ por meio de um sensor de $0,4\text{ mm}$ de diâmetro.

GRATTAN e PALMER (1985) desenvolveram um sistema de medição de temperatura, baseado no tempo de decaimento da fluorescência, utilizando uma pequena porção de neodímio inserido no núcleo de uma fibra óptica de vidro. Utilizando-se uma fonte de luz de alta potência, operando na região do infravermelho, pode-se excitar o sistema de medição. Esse trabalho expôs a possibilidade da utilização de um transdutor óptico com preço relativamente barato e robusto quanto às perdas no sistema, pois o mesmo era embasado no tempo e não na intensidade do decaimento.

Em 1987, AUGOUSTI et al. (1987) produziram um sensor de temperatura utilizando um cristal conhecido como *alexandrite*, cujo efeito fluorescente pode ser atingido trabalhando-se com uma fonte luminosa de comprimento de onda de 633 nm . O esquemático utilizado na medição de temperatura com esse sensor pode ser observado por meio da Figura 3.11.

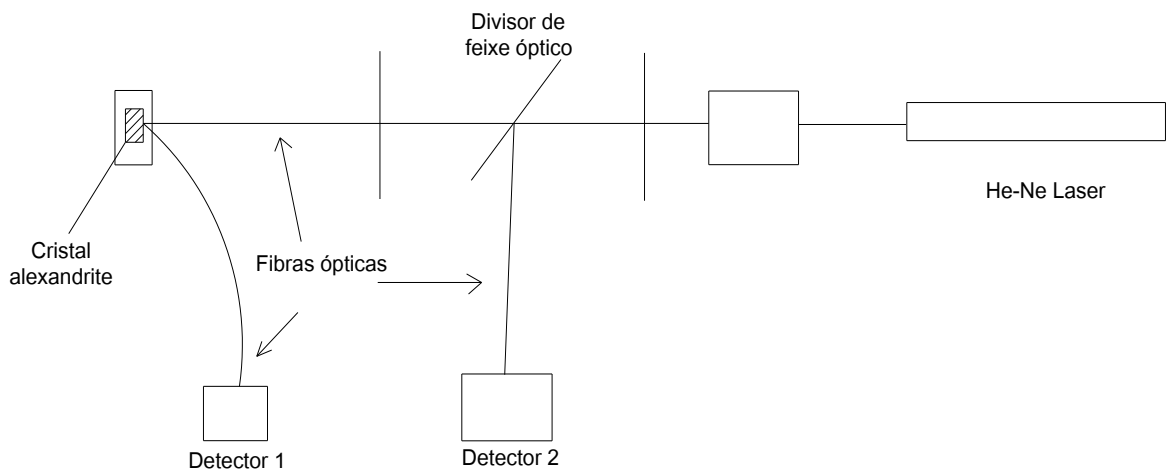


Figura 3.11 – Esquemático utilizado para o monitoramento de temperatura: sensor *alexandrite*. Traduzida do trabalho de AUGOUSTI et al. (1987).

Com esse sistema, foram realizados 256 registros de temperatura variando entre os valores de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, com exatidão na leitura de aproximadamente $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. No entanto, os autores do trabalho confirmaram que se pôde trabalhar com exatidão de temperatura menor que $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e tempo de leitura em torno de 3 s .

A medição térmica foi realizada através do monitoramento do tempo de decaimento da fluorescência. Assim, pôde-se operar com um sistema imune às variações ópticas da fonte utilizada. A Figura 3.12 apresenta a correlação da variação do tempo de decaimento da fluorescência em relação à temperatura na região sensora.

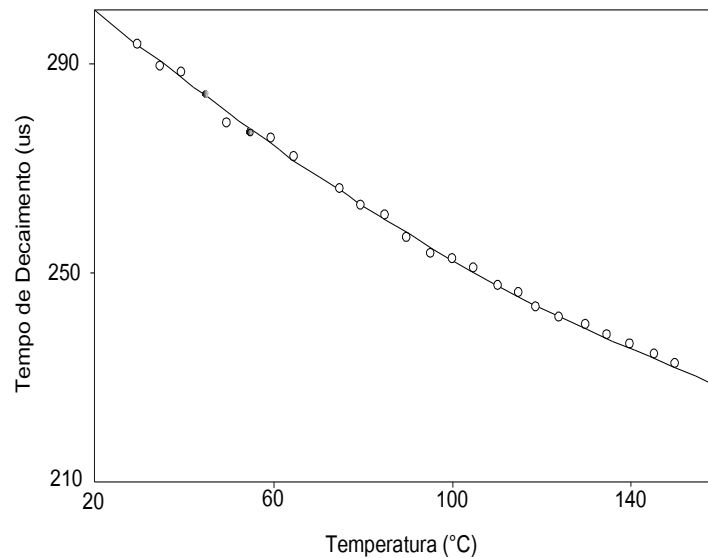


Figura 3.12 – Correlação da variação do tempo de decaimento fluorescente com a temperatura do meio. Traduzida do trabalho de AUGOUSTI et al. (1987).

Nota-se, por meio da Figura 3.12, que o sensor projetado apresenta uma resposta com comportamento relativamente linear para a faixa de medição de temperatura monitorada.

Há diversos tipos de dopagem utilizados para a fabricação dos sensores baseados no decaimento fluorescente. Com o intuito de realizar medições de temperatura acima de 700°C, AIZAWA et al. (2006) desenvolveram um sensor fluorescente de *Cr* dopado com *YAG* ($Cr^{3+}:YAG$). A Figura 3.13 mostra o sistema de monitoramento utilizado para a medição de temperatura por meio do sensor desenvolvido.

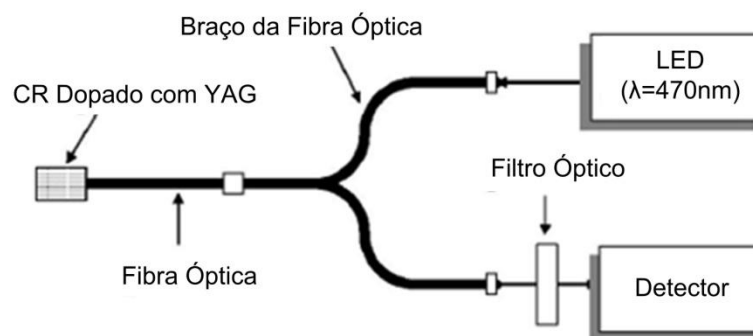


Figura 3.13 – Esquemático do sistema de monitoramento de temperatura: sensor fluorescente $Cr^{3+}:YAG$; fonte de luz de 470 nm; fotodetector utilizado para medição do decaimento fluorescente. Traduzida do trabalho de AIZAWA et al. (2006).

Os resultados da variação do tempo de decaimento bem como da intensidade do sinal fluorescente, obtidos por esse sistema, são apresentados na Figura 3.14, que exhibe várias respostas provindas de diversos sensores portando diferentes dopagens. Nota-se que o sensor $Cr^{3+}:YAG$ pôde trabalhar em uma faixa de medição de temperatura entre 270 K a 900 K . Já os sensores $Cr^{3+}:YAlO_3$ bem como o $Cr^{3+}:MgAl_2O_4$ não atingem a faixa de temperatura de 900 K .

Observando-se a Figura 3.14, nota-se que a intensidade do sinal fluorescente diminui com o aumento da temperatura. Segundo os autores, o valor mínimo da potência óptica para a identificação do sinal ocorre quando a temperatura do sistema atinge 900 K .

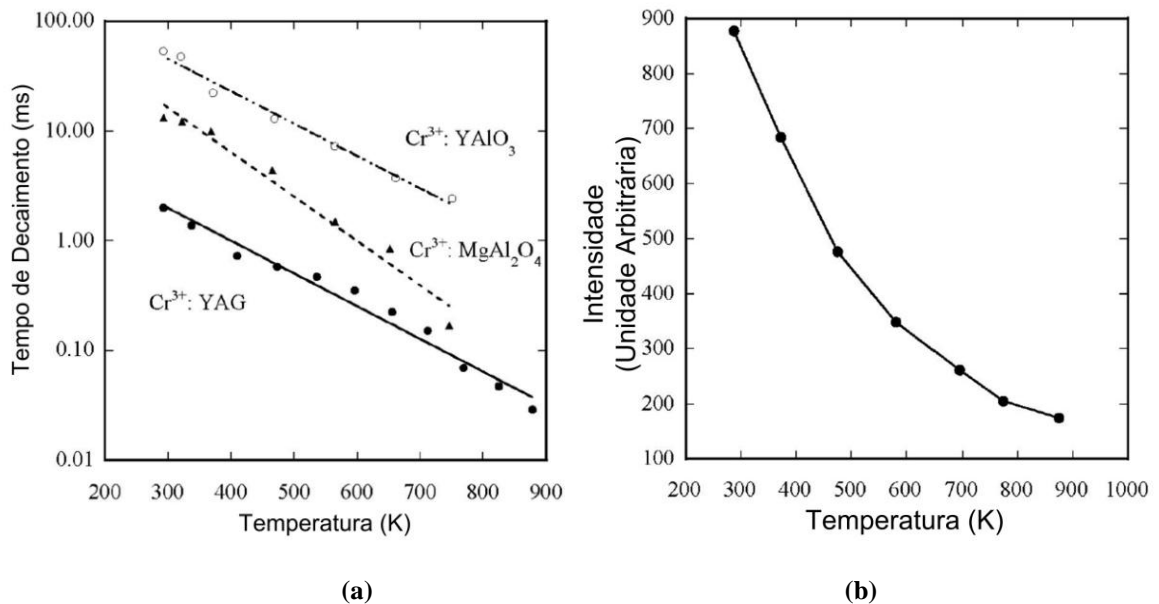


Figura 3.14 – (a) Comportamento do tempo de decaimento fluorescente para diferentes tipos de dopagens; (b) Comportamento da intensidade do sinal para o sensor $Cr^{3+}:YAG$. Ambos os comportamentos em função da temperatura. Traduzida do trabalho de AIZAWA et al. (2006).

LUNDQUIST e KNUTH (2008) apresentaram a medição de temperatura por meio de um sensor, baseado no decaimento da fluorescência, utilizando-se a configuração topo com um sensor constituído de um material fosforescente. A medição de temperatura foi realizada por meio do monitoramento do tempo de decaimento fluorescente. A Figura 3.15 apresenta a relação entre o tempo de decaimento com a temperatura do meio.

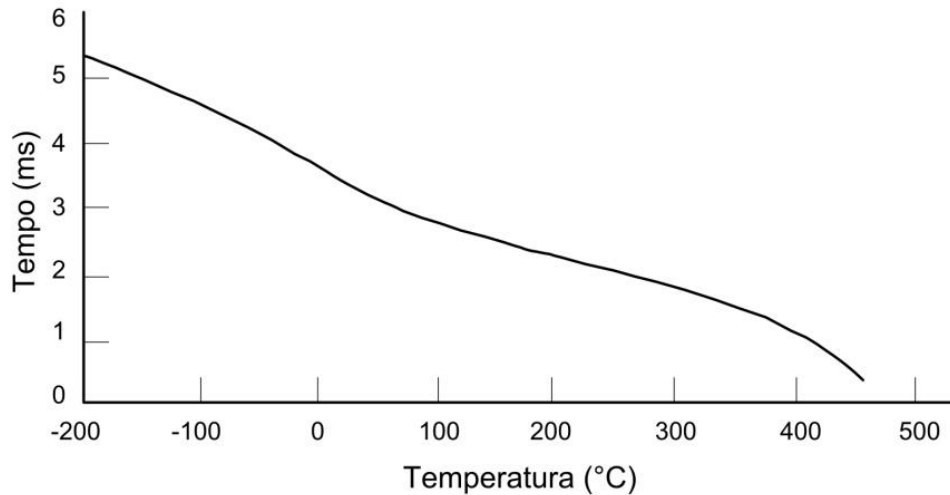


Figura 3.15 – Tempo de decaimento em relação a temperatura do meio. Traduzida do trabalho de LUNDQUIST e KNUTH (2008).

Esse trabalho também apresentou vários exemplos de aplicação dos sensores baseados no decaimento fluorescente para a medição de temperatura. Os autores relataram que tais sensores podem operar na faixa de temperatura entre -30°C a 200°C com boa linearidade. Também foi descrito sobre diversos equipamentos de medição do tempo de decaimento, os quais podem apresentar desde 4 a 16 canais de monitoramento de temperatura, abrangendo aplicações que necessitem de até 16 pontos de medição.

3.3.2 Redes de Bragg

3.3.2.1 Conceituação das Redes de Bragg

O princípio de funcionamento dos sensores baseados em rede de Bragg pode ser comparado a um filtro passa faixa, refletindo a luz no comprimento de onda de Bragg e transmitindo os feixes de luz nos comprimentos diferentes do ressonante. A rede de Bragg é compreendida em uma curta secção do núcleo de uma fibra óptica do tipo monomodo na qual o índice de refração do núcleo da mesma é modulado periodicamente. A Figura 3.16 apresenta o esquemático de uma rede de Bragg inscrita no núcleo de uma fibra óptica (GUPTA, 2006), (YU e YIN, 2002), (RIGHINI et al, 2009).

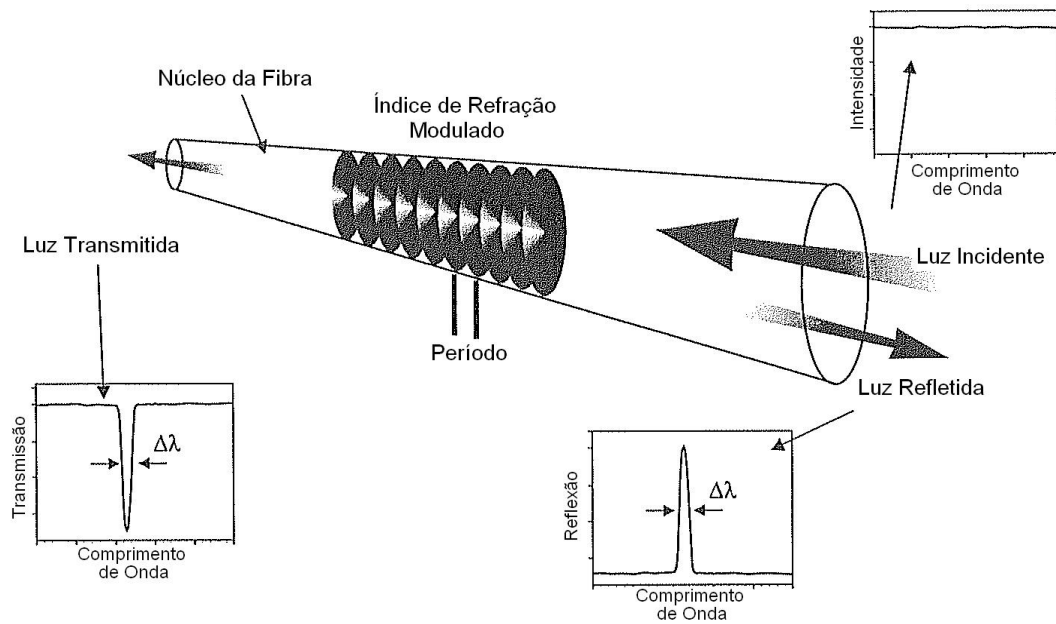


Figura 3.16 – Diagrama esquemático da estrutura da rede de Bragg e aspectos da luz incidente, transmitida e refletida pela rede.

A luz refletida pela grade de Bragg tem seu comprimento de onda dependente do índice de refração do meio e do período da rede, conforme mostra a Equação (3.2) (GUPTA, 2006).

$$\lambda_B = 2\eta_{eff}\Lambda \quad (3.2)$$

Sendo λ_B o comprimento de onda da luz refletida ou comprimento de onda de Bragg, η_{eff} o índice de refração efetivo do núcleo e Λ o período da rede de Bragg.

Assim, para uma variação tanto no índice de refração efetivo do núcleo quanto no próprio período da rede, há também uma variação do comprimento de onda de Bragg. Desse modo, quando um dado estímulo externo atua e altera η_{eff} e/ou Λ , o comprimento de onda refletido pela grade varia. Portanto, a rede de Bragg pode atuar como sensor para estímulos externos que sensibilizem o índice de refração efetivo do núcleo e/ou o período da rede de Bragg.

Segundo YIN et al. (2008), um sensor FBG típico tem um comprimento da ordem de poucos milímetros, podendo trabalhar virtualmente com 100% de refletividade, com as variações do comprimento de onda central situados na faixa de 0,05 nm a 0,3 nm. De

acordo com o catálogo de sensores de temperatura FBG do fabricante *FiberSensing*, a refletividade mínima do sensor de temperatura FBG é 75 % e com o catálogo de sensores de temperatura FBG do fabricante *MicronOptics*, a refletividade do sensor de temperatura FBG é maior do que 70 % .

Podem-se citar como exemplo, duas grandezas físicas que induzem a variação do comprimento de onda de Bragg: a temperatura e a deformação mecânica. Segundo MARQUES FILHO (2006), devido à importância na medição desses parâmetros, a maioria das redes de Bragg que atuam como sensores é utilizada para a medição dessas duas grandezas. Assim, para determinar as variações do comprimento de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, em função da deformação e da temperatura, basta derivar a Equação (3.2) em relação a essas grandezas, conforme mostrado na Equação (3.3).

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\frac{\partial\Lambda}{\partial l} \eta_{eff} + \frac{\partial\eta_{eff}}{\partial l} \Lambda \right) \Delta l + 2 \left(\frac{\partial\Lambda}{\partial T} \eta_{eff} + \frac{\partial\eta_{eff}}{\partial T} \Lambda \right) \Delta T \quad (3.3)$$

Sendo $\Delta\lambda_B$ a variação do comprimento de onda de Bragg, ΔT a variação da temperatura da rede e Δl a variação do comprimento da grade. O primeiro termo da Equação (3.3) representa a variação do comprimento de onda de Bragg frente às modificações do comprimento físico da rede. E o segundo termo concerne à variação do comprimento de onda de Bragg com relação às alterações de temperatura.

Se o sensor FBG for submetido a esforços de tração, as variações do período da grade são positivas e o valor do comprimento de onda de Bragg aumenta. Caso contrário, ou seja, se o sensor for submetido a esforços de compressão, as variações do período da grade são negativas e o valor do comprimento de onda de Bragg diminui. De maneira análoga, quando ocorre um aumento de temperatura na região onde está localizada a grade, há também um aumento do valor do comprimento de onda de Bragg, pois a grade se expande por efeito térmico e o índice de refração aumenta com a temperatura. Caso a temperatura da rede de Bragg diminua, há uma contração do período da rede e uma diminuição do índice de refração, fazendo com que o valor do comprimento de onda de Bragg diminua.

3.3.2.2 Utilização dos Sensores Baseados em Redes de Bragg para Medição de Temperatura

Os sensores FBG são empregados para o monitoramento de temperatura em diversos equipamentos – transformadores, geradores, aeronaves entre outros – e processos – tubulações de petróleo, construção civil etc – que necessitem de tal aplicação, principalmente nos campos onde os sensores convencionais não podem adentrar e/ou quando se deseja monitorar a temperatura em diversos pontos utilizando-se pequena quantidade de cabos ópticos.

MOREY et al. (1989) inscreveram no núcleo de uma fibra óptica monomodo redes de Bragg de 6 mm a 8 mm de comprimento com índice de refletividade de 76 % centradas no comprimento de onda de 580 nm. O método de inscrição das grades de Bragg foi projetado pelos autores do trabalho e pode ser visualizado por meio da Figura 3.17. Basicamente utilizou-se uma fonte de luz UV, interferômetro e refletores, conforme pode ser observado.

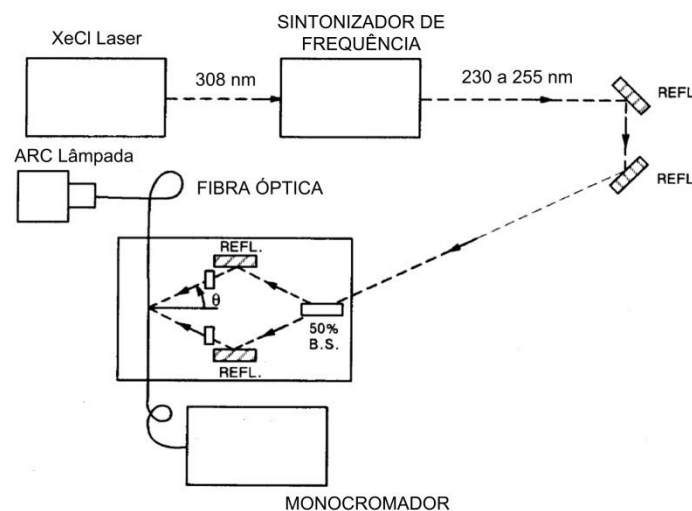


Figura 3.17 – Sistema de inscrição de rede de Bragg. Traduzida do trabalho de MOREY et al. (1989).

Uma vez que a rede de Bragg foi inscrita no núcleo da fibra óptica, realizaram-se medições de temperatura com base nas variações do comprimento de onda de Bragg. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com os valores calculados teoricamente para a variação do comprimento de onda frente às variações de temperatura no sensor FBG. Esses resultados são exibidos na Figura 3.18.

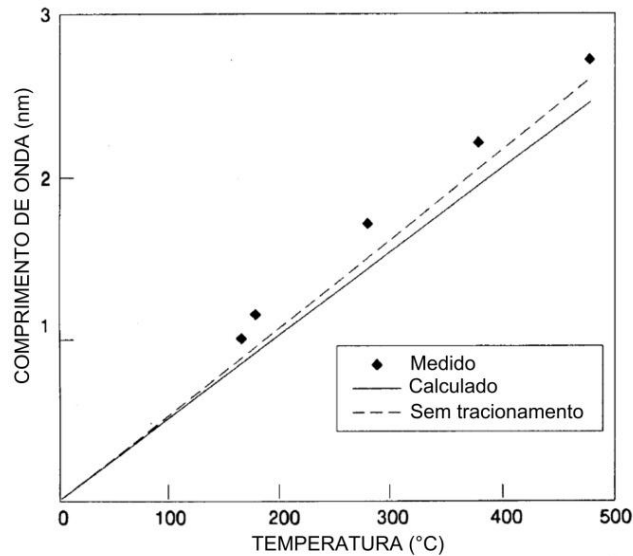


Figura 3.18 – Variações do comprimento de onda de Bragg com a temperatura para a rede inscrita. Traduzida do trabalho de MOREY et al. (1989).

De acordo com os autores do trabalho, o sensor FBG, inscrito por meio da técnica desenvolvida, foi capaz de operar a temperatura de 500°C por 18 h , sem apresentar degradação na rede de Bragg durante o período de medição.

Um sistema *quasi*-distribuído de medição de temperatura foi desenvolvido por RAO et al. (1997) para aplicações médicas, conforme pode ser observado por meio da Figura 3.19.

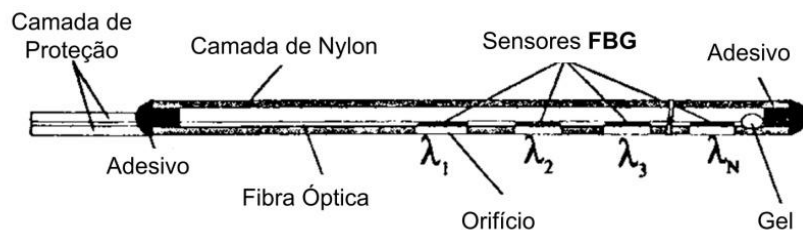


Figura 3.19 – Esquemático dos sensores FBG distribuídos em uma fibra óptica. Traduzida do trabalho de RAO et al. (1997).

Cada sensor FBG foi inscrito em um determinado comprimento de onda. Todo o conjunto de sensores foi coberto por fios de Nylon, com o intuito de oferecer proteção mecânica para o sistema. Para a verificação da medição de temperatura, os autores realizaram uma comparação entre os sensores FBG com termopares. O resultado dessa comparação pode ser visualizado por meio da Figura 3.20. Nota-se que os resultados obtidos pelos sensores FBG são semelhantes aos obtidos pelos termopares.

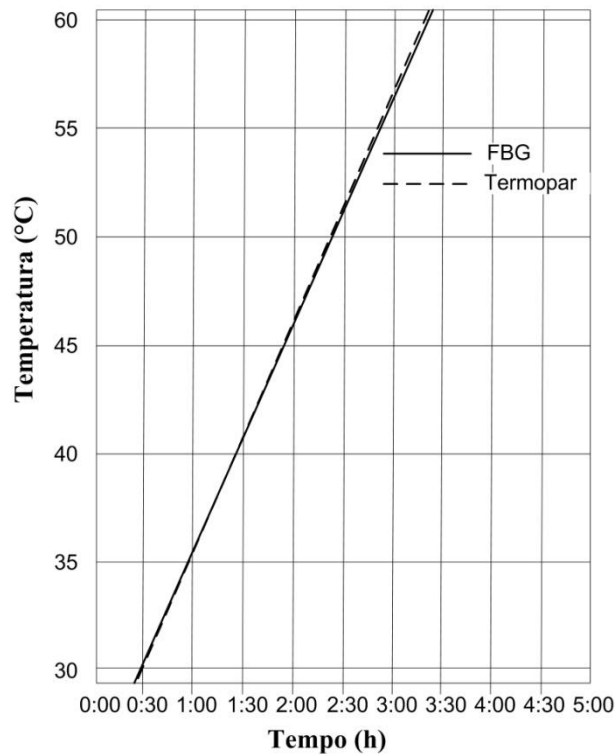


Figura 3.20 – Comparação da medição de temperatura por meio dos sensores FBG com termopares. Traduzida do trabalho de RAO et al. (1997).

De acordo com RAO et al. (1997), o sistema de sensoriamento suportou estresses mecânicos transversais e longitudinais devido à inserção da camada de Nylon ao longo da fibra óptica. O sistema apresentou resolução e exatidão na leitura de temperatura compatível com as necessidades no ramo médico, $0,1^{\circ}\text{C}$ e $0,2^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A faixa de temperatura de trabalho para aplicações na área médica é de 30°C a 60°C , sendo que o sistema projetado foi capaz de operar sob essas condições oferecendo uma boa alternativa para a medição de temperatura nesse ramo.

LIN e WANG (2009) projetaram um sistema de medição de deformação mecânica com compensação de variação de temperatura. Dessa forma, pôde-se eliminar a influência da modificação térmica nas medições de extensão e compressão. Para atingir esse objetivo, os autores projetaram um sensor FBG insensível às deformações mecânicas, apto a medir somente os efeitos térmicos. Esse sensor operou no sistema atuando como sensor referência, destinado somente à medição de temperatura. Posteriormente, com o valor de temperatura adquirido, corrigiu-se a influência térmica nos sensores de deformação mecânica. Essa tática foi utilizada usufruindo da facilidade de isolamento mecânico frente ao isolamento térmico. A Figura 3.21 apresenta o esquemático do sistema de sensoriamento com compensação térmica.

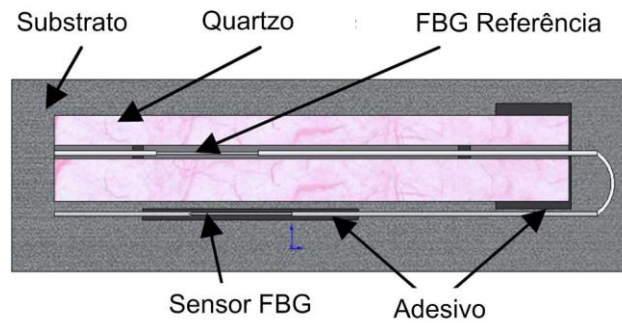


Figura 3.21 – Esquemático da montagem utilizada para compensação da variação de temperatura na leitura da deformação mecânica. Traduzida do trabalho de LIN e WANG (2009).

Os resultados experimentais para o sistema desenvolvido podem ser visualizados através da Figura 3.22, onde o sensor FBG centrado no comprimento de onda de 1540 nm é o sensor de referência e o de 1550 nm é o sensor de deformação mecânica. Nota-se que o sensor de temperatura não sofreu influências da variação das deformações mecânicas do ponto de instalação devido ao encapsulamento utilizado.

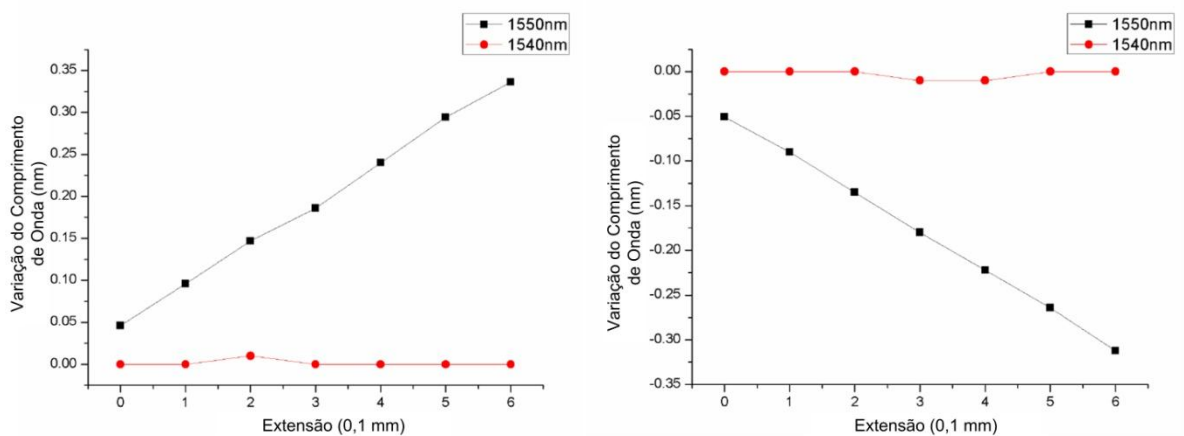


Figura 3.22 – Variação do comprimento de onda com a deformação mecânica. Traduzida do trabalho de LIN e WANG (2009).

Já a Figura 3.23 mostra a variação do comprimento de onda de Bragg com relação à temperatura. Nota-se que a sensibilidade do sensor referência é menor que a do sensor de deformação. Isto se deve ao tipo de material utilizado para isolamento mecânico no sensor de referência.

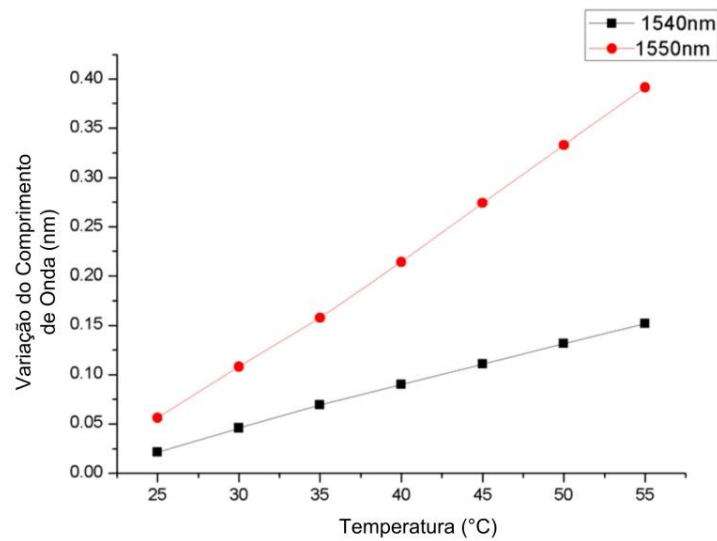


Figura 3.23 – Variação do comprimento de onda com a temperatura. Traduzida do trabalho de LIN e WANG (2009).

Com esse sistema, os autores puderam implementar a medição de deformações com compensação térmica. Adicionalmente, esse trabalho mostrou como realizar a compensação mecânica para a leitura de temperatura, evitando-se a sensibilidade cruzada na medição térmica.

Os sensores FBG também podem operar em temperaturas elevadas, como mostra SILVA et al. (2003). Segundo os autores, podem-se obter grades de Bragg capazes de operar em temperaturas de 0 °C a 400 °C. A Figura 3.24 exibe os resultados obtidos para o sensor FBG operando em elevadas temperaturas.

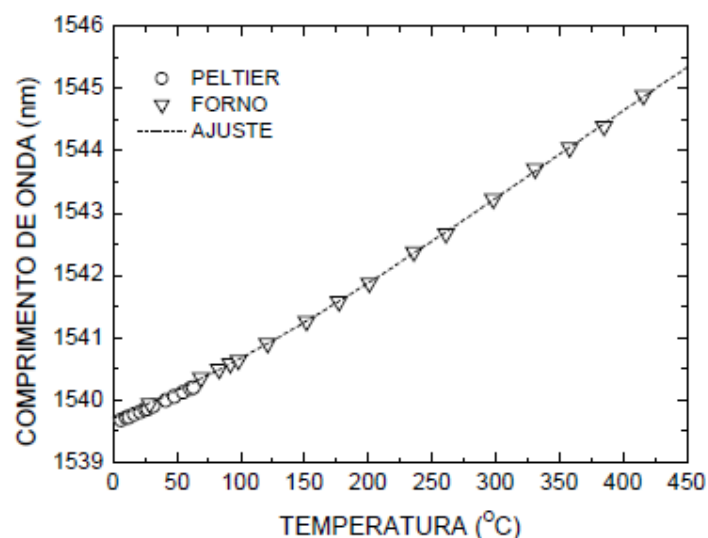


Figura 3.24 – Variação do comprimento de onda central versus temperatura (SILVA et al., 2003).

Embora a relação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura seja linear, os autores trabalharam com um ajuste polinomial de terceiro grau devido à melhor representação dos dados mensurados. Segundo os mesmos, o tempo de resposta dos sensores FBG é bastante reduzido devido à baixa capacidade térmica da sílica. Já a histerese desses sensores, para a faixa de temperatura entre 0°C a 400°C , pode ser desprezada de acordo com as leituras obtidas experimentalmente.

Os sensores FBG também podem realizar medições em equipamentos elétricos, conforme mostrado no trabalho de ALLIL (2010), onde um conjunto de seis sensores foi instalado em um gerador hidroelétrico de 15 kV . Os sensores foram inscritos sob diferentes comprimentos de onda de Bragg, variando desde 1528 nm a 1570 nm .

Primeiramente, realizaram-se ensaios nos seis sensores FBG utilizados para a medição de temperatura com o intuito de obter o deslocamento espectral dos comprimentos de onda em função da variação térmica. Desse modo, obteve-se o comportamento espectral conforme mostrado na Figura 3.25.

Com os dados desse ensaio, foi possível obter a sensibilidade dos sensores FBG em relação à temperatura. Para um dos sensores utilizados, traçou-se a curva que correlaciona o comprimento de onda de Bragg com a temperatura, conforme pode ser observado por meio da Figura 3.26. Nota-se que essa correlação é fortemente linear para variações térmicas na faixa de 40°C a 95°C .

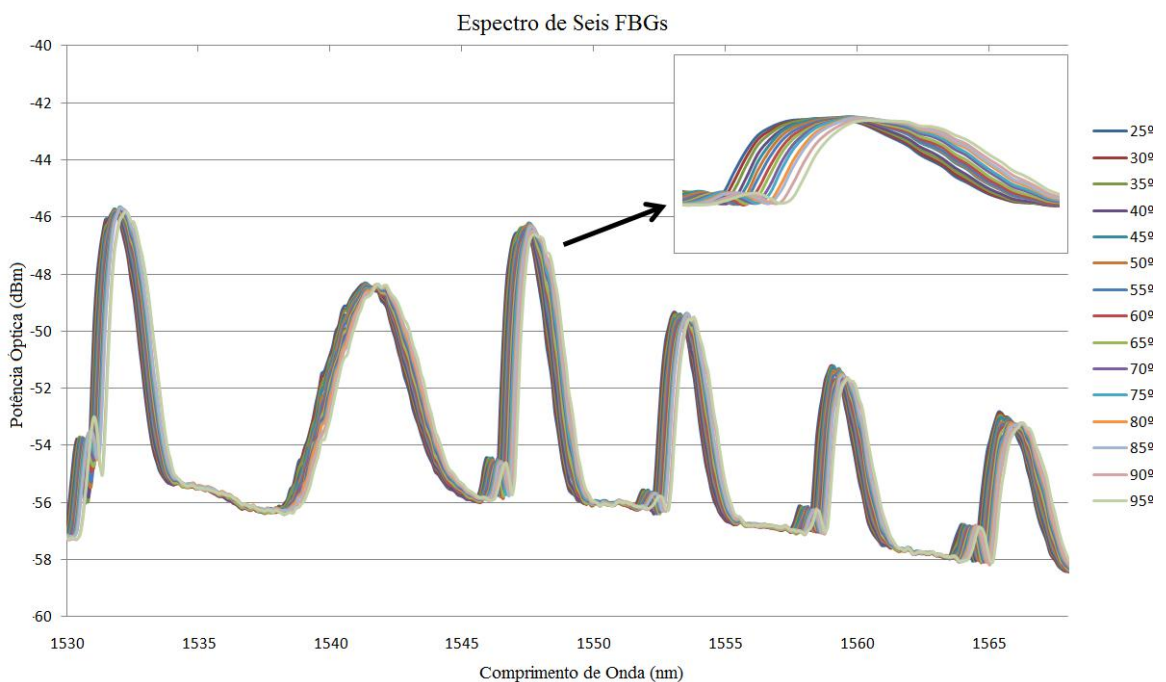


Figura 3.25 – Variação do comprimento de onda de seis sensores FBG em função da temperatura (ALLIL, 2010).

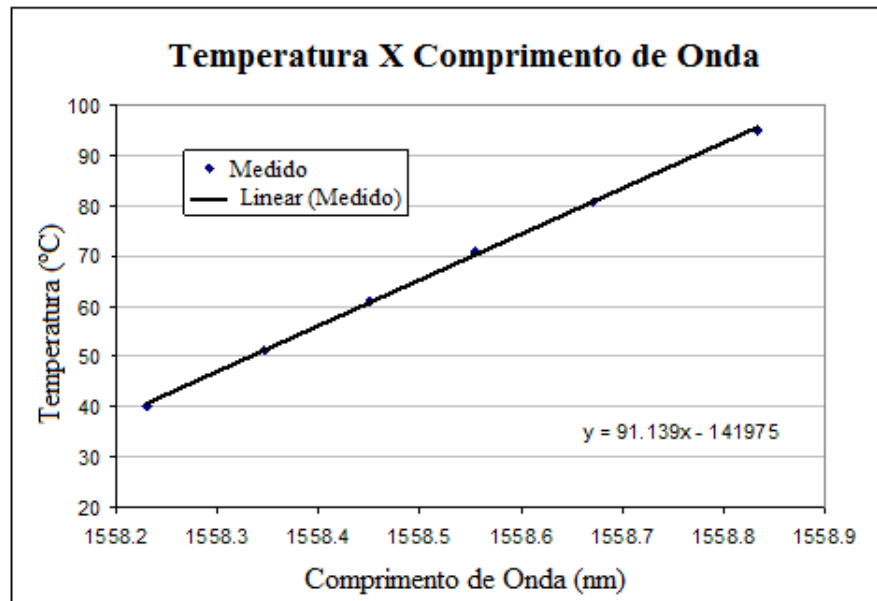


Figura 3.26 – Relação entre o comprimento de onda e a temperatura para uma das redes de Bragg utilizadas no trabalho de ALLIL (2010).

Registrada as características dos sensores, partiu-se para a instalação dos dispositivos em um gerador de 15 kV . A Figura 3.27 mostra o esquemático utilizado para a medição de temperatura em diversos pontos do equipamento.

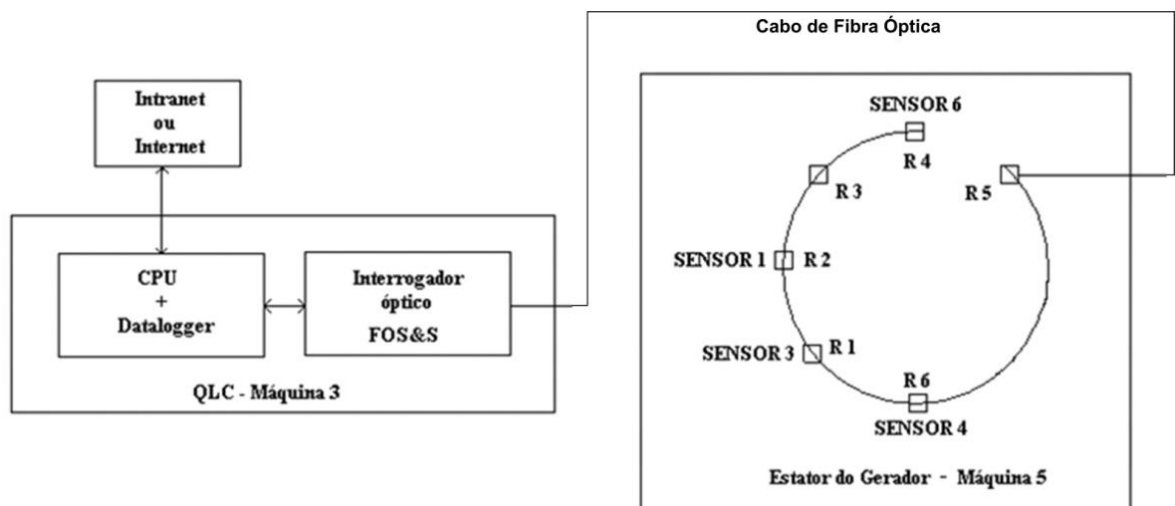


Figura 3.27 – Esquemático dos pontos de instalação dos sensores FBG para o monitoramento térmico do gerador (ALLIL, 2010).

Os resultados da medição de temperatura em alguns pontos da máquina são exibidos por meio da Figura 3.28.

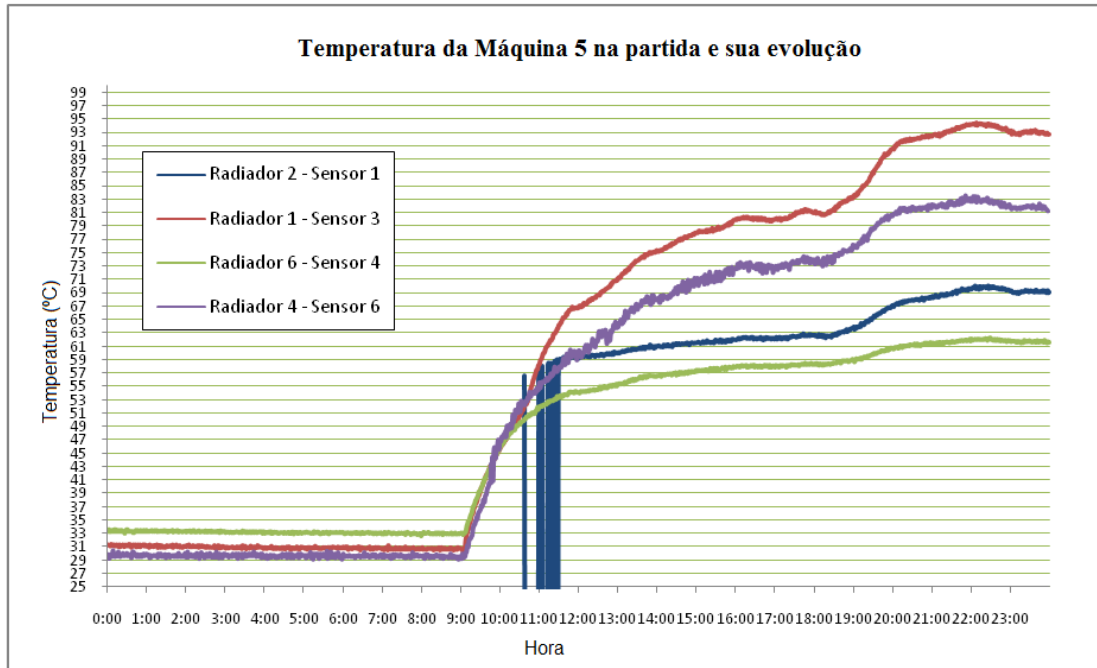


Figura 3.28 – Medição registrada da temperatura no gerador (ALLIL, 2010).

Segundo a autora, o sistema instalado mostrou ser capaz de realizar medições de temperatura de forma confiável e precisa nos diversos pontos instalados no interior do gerador.

FRAZÃO et al. (2006) apresentaram o princípio de funcionamento dos sensores FBG bem como realiza a inscrição de redes de Bragg no núcleo de uma fibra óptica utilizando uma técnica de inscrição conhecida como máscara de fases. A montagem experimental utilizada pelos autores pode ser visualizada por meio da Figura 3.29.

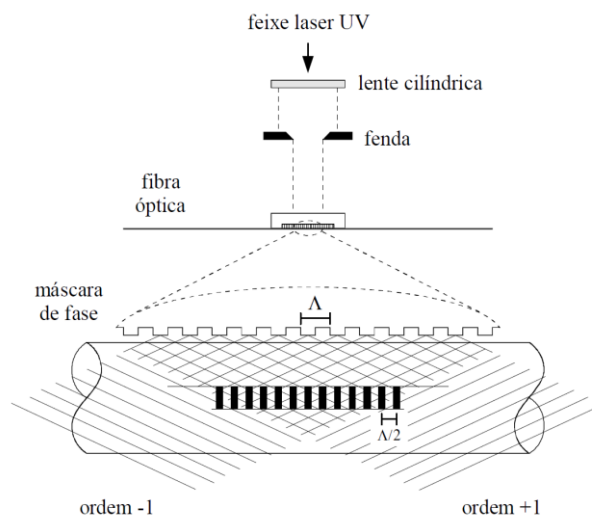


Figura 3.29 – Esquemático do sistema de inscrição de sensores FBG na fibra óptica (FRAZÃO et al., 2006).

Uma vez obtida às redes em fibras ópticas, partiu-se para o registro da variação do comprimento de onda de Bragg com relação à variação térmica. A Figura 3.30 apresenta graficamente os resultados obtidos para um sensor FBG com ressonância centrada em 1523,7 nm. Pode-se observar que esse sensor apresentou uma forte característica linear entre o comportamento do comprimento de onda com a temperatura.

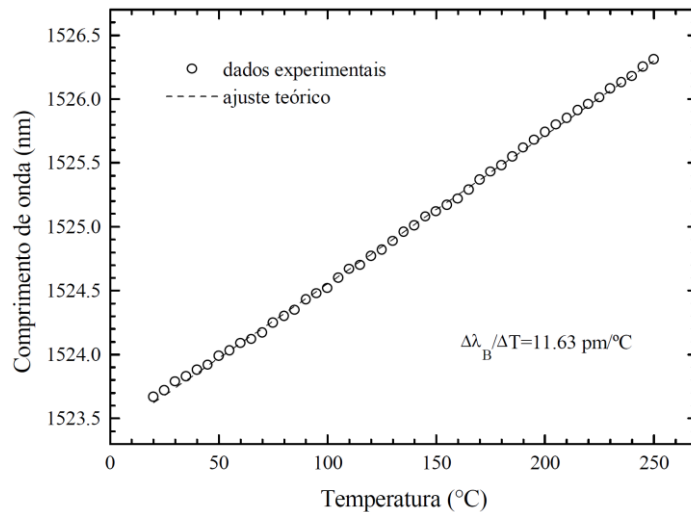


Figura 3.30 – Variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura (FRAZÃO et al., 2006).

Os autores do trabalho também relataram sobre a possibilidade de inserção de diversas redes de Bragg inscritas em uma mesma fibra óptica e centradas em comprimentos de onda distintos. Através de técnicas de multiplexagem, é possível obter um sistema *quasi*-distribuído de medição de temperatura, conforme pode ser observado por meio da Figura 3.31.

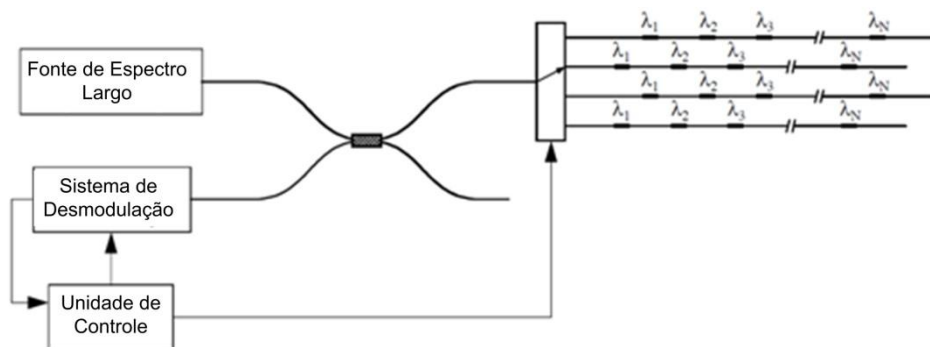


Figura 3.31 – Sistema composto por vários sensores FBG em quatro fibras ópticas (FRAZÃO et al., 2006).

Por fim, os autores realizaram a comparação das medições de diversos sensores FBG em cabos ópticos com a leitura de temperatura por meio de termopares. Os resultados obtidos pelos sensores FBG apresentaram uma resposta similar à do termopar convencional, conforme pode ser visualizado por meio da Figura 3.32.

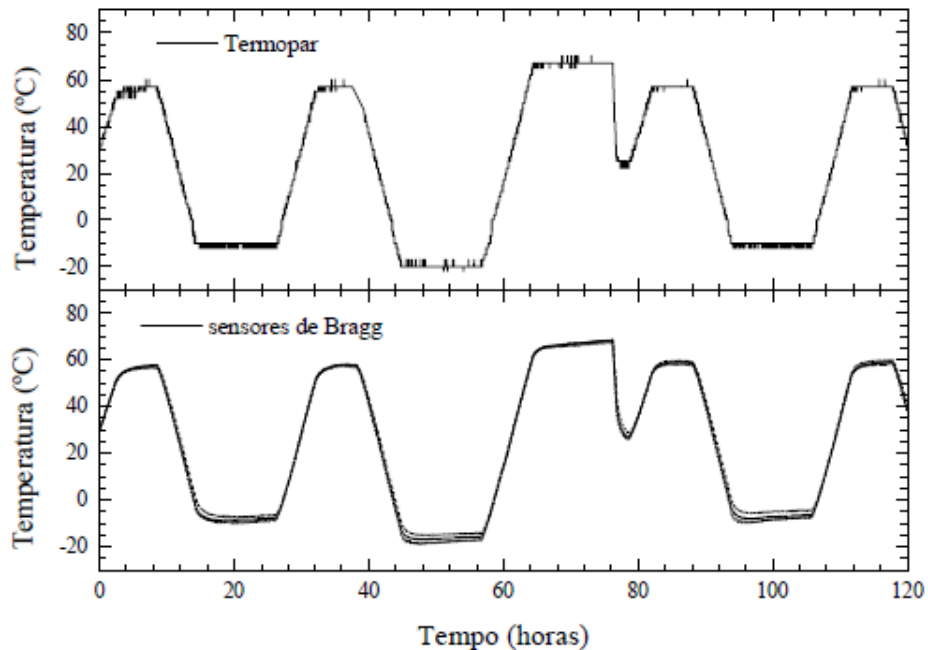


Figura 3.32 – Medição de temperatura por meio de termopar e sensores FBG (FRAZÃO et al., 2006).

3.4 Sensores de Temperatura Distribuídos em Fibras Ópticas

Os sistemas de sensoriamento baseados em fibras ópticas apresentam diversas vantagens quando comparados aos sistemas convencionais, como imunidade eletromagnética, dimensões e pesos reduzidos entre outras. Os sensores fundamentados no decaimento fluorescente são adequados para a medição pontual de temperatura. Já os sensores baseados em redes de Bragg, embora pontuais, podem constituir um sistema *quasi*-distribuído de medição de temperatura dependendo do posicionamento das grades ao longo do guia de feixe luminoso.

Porém, há uma limitação quanto à quantidade de elementos sensores que podem ser inscritos em um mesmo guia óptico. Desse modo, a medição de temperatura de forma *quasi*-distribuída utilizando-se de sensores FBG é uma função do comprimento da fibra, do espaçamento entre sensores e da quantidade de elementos inscritos. Esse fato pode ser

limitante para a aplicação dessa técnica no monitoramento distribuído da temperatura dependendo, obviamente, da aplicação desejada.

O monitoramento distribuído de temperatura (DTS/DTSS) é particularmente atrativo quando se deseja realizar o mapeamento térmico e/ou a medição de temperatura ao longo do comprimento da fibra óptica. Geralmente, a medição distribuída de temperatura é baseada em algum tipo de mecanismo de espalhamento de luz que ocorre internamente às fibras (RIGHINI et al., 2009). Esses espalhamentos luminosos podem ser classificados como lineares ou não-lineares dependendo da densidade de potência óptica dentro da fibra.

Dentre os espalhamentos lineares, citam-se a dispersão linear Rayleigh e a dispersão linear Mie, sendo que a dispersão linear Rayleigh tem maior importância nos sistemas de medição distribuída. Portanto, neste trabalho somente a dispersão Rayleigh será abordada. Já os espalhamentos de luz por efeitos não-lineares são conhecidos como espalhamento Raman e espalhamento Brillouin. Ambos são empregados nos sistemas de medição distribuída. Contudo, o espalhamento Raman é utilizado somente para a medição de temperatura ao passo que o espalhamento Brillouin pode ser empregado tanto na medição de temperatura, quanto na medição de deformações mecânicas. Os itens subsequentes abordam com mais detalhes a descrição sobre os tipos de espalhamentos que podem ocorrer nos guias ópticos.

3.4.1 Espalhamento Linear Rayleigh

3.4.1.1 Conceituação do Espalhamento Rayleigh

O espalhamento de luz no guia óptico, de uma forma geral, ocorre devido a pequenas imperfeições da fibra óptica e através do próprio material que a constitui. As irregularidades submicroscópicas na composição e densidade do núcleo da fibra agem como se fossem pontos diferentes no meio de propagação, resultando em uma flutuação do valor do índice de refração ao longo da fibra óptica (DECUSATIS, 2002).

De acordo com RIBEIRO (2005), um determinado espalhamento de luz é classificado como linear desde que a quantidade de energia transferida a outros modos de propagação seja proporcional a potência da luz guiada. E, sendo o espalhamento Rayleigh linear, o comprimento de onda da luz retroespalhada é idêntico ao comprimento de onda da luz incidente. O espalhamento Rayleigh ocasiona perdas nos sistemas de transmissão por

causa da irradiação da luz. Com o intuito de minimizar as perdas devido a esse tipo de espalhamento, os processos de fabricação da fibra óptica têm sido aprimorados com a finalidade de reduzir as imperfeições do núcleo da fibra. No entanto, as variações da densidade do material que compõe o guia óptico não podem ser controladas devido a características intrínsecas da sílica. Assim, o nível mínimo de perda sofrido por uma fibra óptica está limitado principalmente pelo processo de dispersão Rayleigh (AGRAWAL, 2001).

Devido às pequenas variações na estrutura atômica da fibra, a luz espalhada propaga-se em todas as direções. Uma parcela do feixe óptico propaga na mesma direção da luz incidente, outra irradia para a casca da fibra óptica – devido ao ângulo de incidência do feixe óptico – e o restante da luz espalhada propaga na direção oposta à luz incidente, conforme pode ser observado através da Figura 3.33 (ELLIOT, 2002).

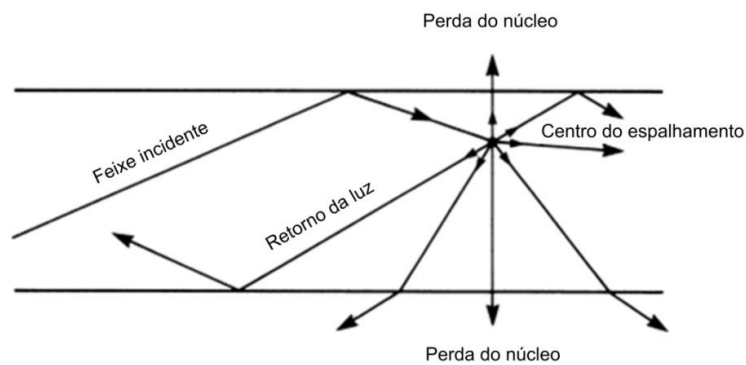


Figura 3.33 – Direções de espalhamento da luz pelo fenômeno da dispersão Rayleigh. Traduzida do trabalho de ELLIOT (2002).

A dispersão Rayleigh é dependente do comprimento de onda, sendo que a mesma diminui significativamente com o aumento do comprimento de onda da luz incidente. A Figura 3.34 mostra a relação supracitada para uma fibra óptica de vidro.

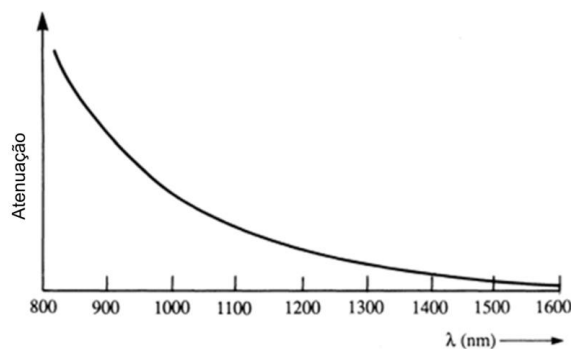


Figura 3.34 – Variação da dispersão Rayleigh com o comprimento de onda da luz incidente. Traduzida do trabalho de ELLIOT (2002).

Nota-se, por meio da Figura 3.35, que há uma forte relação da atenuação no guia óptico com o mecanismo de espalhamento de luz Rayleigh (BASS e STRYLAND, 2002).

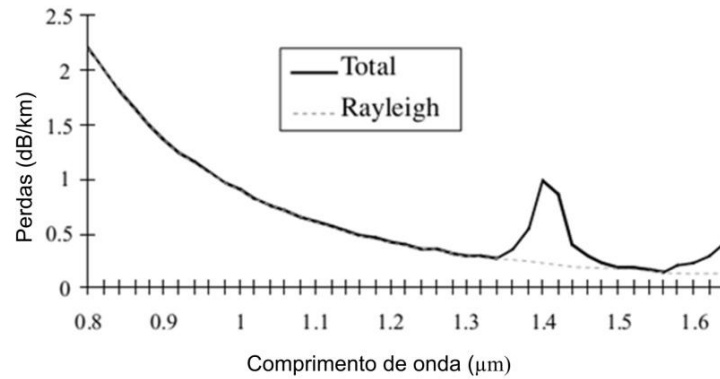


Figura 3.35 – Perdas totais e Rayleigh em uma fibra óptica de sílica. Traduzida do trabalho de BASS e STRYLAND (2002).

3.4.1.2 Utilização do Espalhamento Rayleigh como Sensor de Temperatura

O comportamento espectral da dispersão Rayleigh é dependente tanto da temperatura quanto da deformação mecânica da fibra óptica ao longo do seu comprimento. Como esse fenômeno é causado principalmente pela flutuação do valor do índice de refração do núcleo da fibra óptica, e ambos os fenômenos de variação da temperatura e deformação mecânica afetam o índice de refração da fibra, o espalhamento Rayleigh também é influenciado por esses estímulos externos (BOYD et al., 2011). Variações de temperatura e/ou de deformação mecânica ao longo da fibra óptica causam mudanças no espectro da luz retroespalhada Rayleigh. De acordo com KREGGER et al. (2005), o monitoramento desses estímulos externos é realizado através da medição das variações de fase e da intensidade da luz espalhada.

Segundo SANG et al. (2008), utilizando-se o sistema DTSS Rayleigh, foi possível obter alta resolução espacial na identificação dos pontos onde ocorreram as variações de temperatura. A alta resolução espacial obtida por esse sistema advém do fato de se utilizar um equipamento conhecido como OFDR (*Optical Frequency Domain Reflectometry*). O esquemático de medição de temperatura pode ser observado por meio da Figura 3.36.

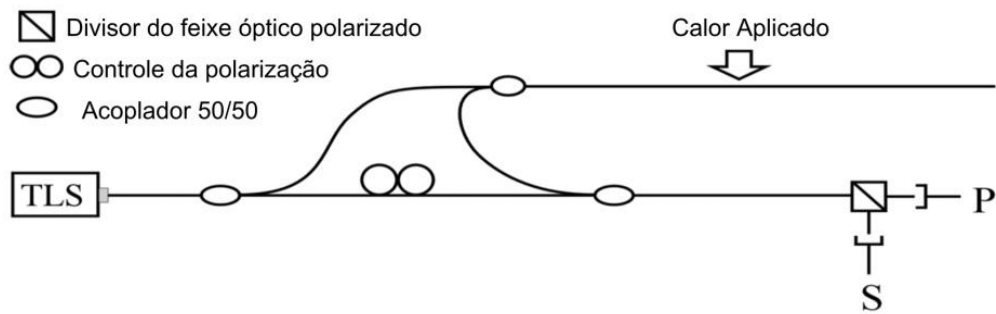


Figura 3.36 – Esquemático da medição de temperatura baseado no espalhamento Rayleigh. Traduzida do trabalho de SANG et al. (2008).

Com esse sistema, os autores do trabalho realizaram a medição de temperatura por meio do monitoramento da variação do espectro do espalhamento Rayleigh. Primeiramente, realizou-se a medição do espectro do espalhamento à temperatura ambiente. Os dados foram gravados e, posteriormente, realizou-se a medição do espectro Rayleigh no mesmo trecho de fibra, porém com uma temperatura maior que a anterior. Os resultados alcançados podem ser visualizados por meio da Figura 3.37, que foi obtida depois de uma complexa análise dos sinais utilizando-se a transformada discreta de Fourier. Nota-se que a variação espectral do sinal é diretamente proporcional à variação da temperatura do meio.

Nesse mesmo trabalho e após ser realizada a calibração do sistema, partiu-se para a instalação do guia de feixe óptico em um reator nuclear, conforme exibido esquematicamente pela Figura 3.38.

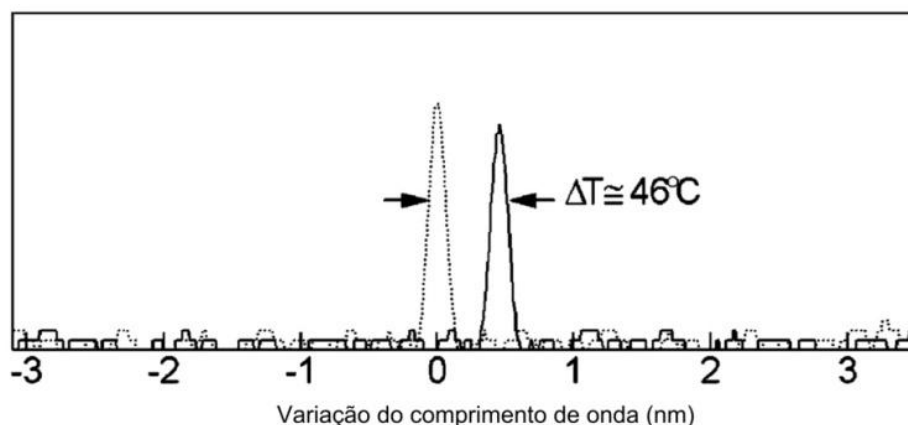


Figura 3.37 – Correlação entre o espectro do espalhamento para a fibra aquecida e para a temperatura ambiente. Traduzida do trabalho de SANG et al. (2008).

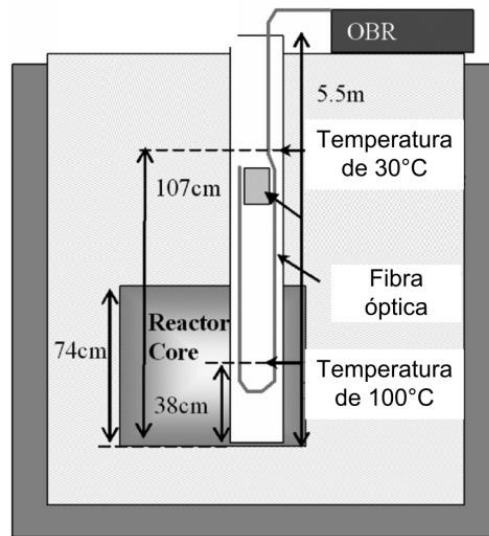


Figura 3.38 – Esquemático do reator onde as fibras ópticas foram inseridas. Parcialmente traduzida do trabalho de SANG et al. (2008).

Quatro tipos diferentes de fibras ópticas foram utilizados para a medição de temperatura no reator, objetivando-se obter o melhor tipo de cabo óptico a ser utilizado nesse ramo de aplicação. Os resultados da medição de temperatura podem ser visualizados por meio da Figura 3.39.

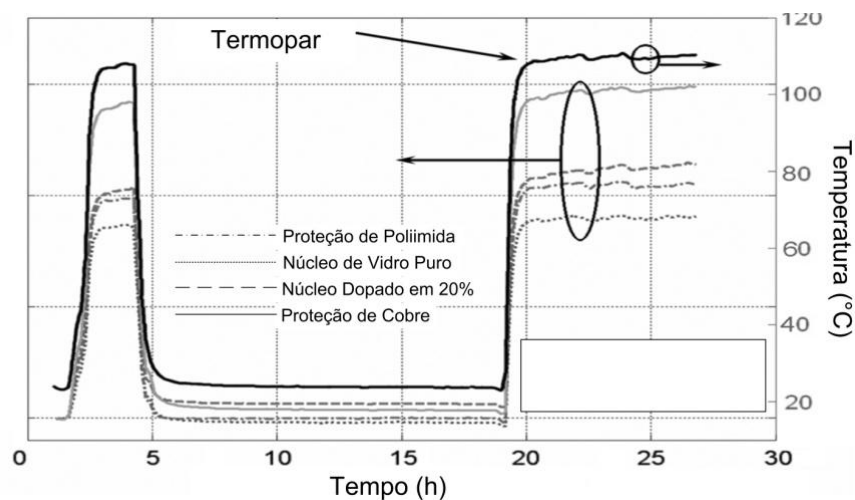


Figura 3.39 – Medição de temperatura: comparação entre quatro tipos de fibra o termopar. Traduzida do trabalho de SANG et al. (2008).

Observa-se que o comportamento da variação de temperatura dos quatro tipos diferentes de cabos ópticos utilizados foi semelhante ao do termopar. No entanto, a diferença de temperatura entre os diferentes cabos e entre os cabos e o termopar foi

considerável. A fibra óptica que mais se aproximou da leitura de temperatura do termopar foi a fibra de sílica coberta por uma camada de cobre.

O sistema utilizado por esse trabalho apresentou alta resolução espacial – em torno de centímetros – em uma fibra óptica de 2 m de comprimento. Os autores ressaltam que tal sistema pode ser aplicado para fibras ópticas com comprimento em torno de 70 m .

Também embasado no sistema DTSS Rayleigh e, de acordo com SOLLER et al. (2006), excelente resolução espacial das medições puderam ser alcançadas. O trabalho desenvolvido por esses autores apresenta a medição da temperatura ao longo de uma fibra óptica de 20 m de comprimento. O resultado experimental para a detecção da temperatura pode ser visualizado através da Figura 3.40.

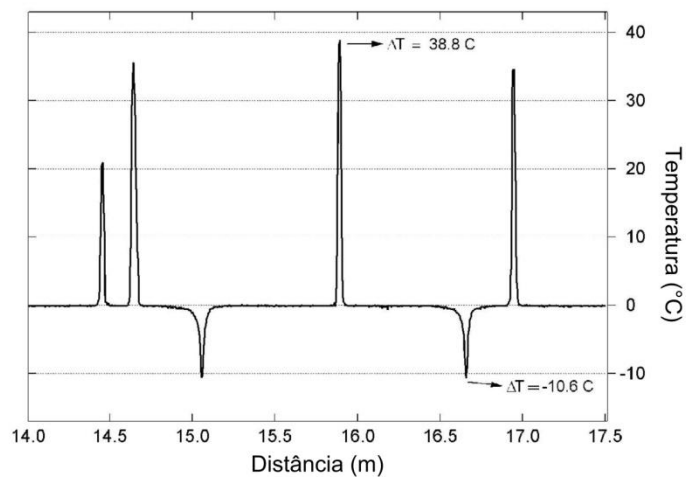


Figura 3.40 – Detecção da temperatura ao longo de uma fibra óptica utilizando-se o espalhamento Rayleigh. Traduzida do trabalho de SOLLER et al. (2006).

Com esse sistema, demonstrou que se pode trabalhar com 10 mm e $0,1\text{ °C}$ de resolução espacial e de temperatura, respectivamente. Também, com o mesmo sistema, foi possível trabalhar com uma resolução de temperatura de $0,3\text{ °C}$ com resolução espacial de 5 mm e 2 °C com resolução espacial de 2 mm .

Utilizando-se uma relação entre a intensidade do espalhamento Rayleigh com a intensidade do espalhamento Brillouin, pôde-se implementar um sistema distribuído de medição de temperatura com resolução espacial de 35 cm (KEE et al., 2000). O esquemático utilizado pelos autores para atingir o resultado supracitado pode ser visualizado através da Figura 3.41.

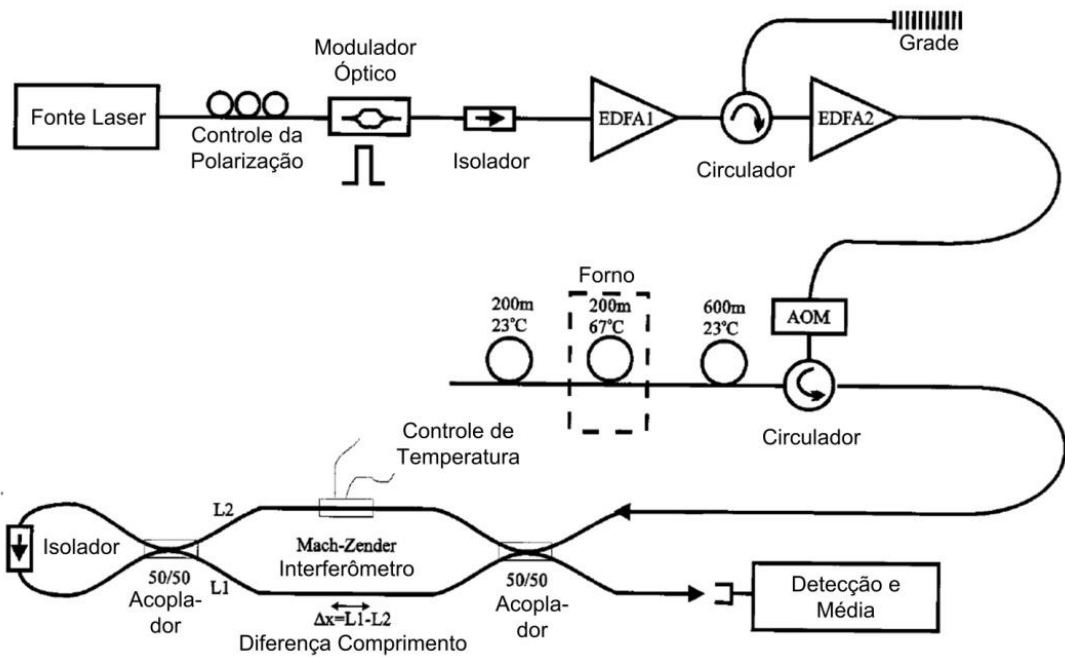


Figura 3.41 – Sistema utilizado para a medição de temperatura com alta resolução espacial. Traduzida do trabalho de KEE et al. (2000).

Observa-se, através da Figura 3.41, que existem três regiões da fibra, onde duas foram submetidas a 23 °C e a terceira foi aquecida a 67 °C .

Através da medição da potência do espalhamento Brillouin corrigida pela intensidade do espalhamento Rayleigh, foi possível realizar a medição de temperatura em uma fibra óptica de 1 km de comprimento. O resultado da medição pode ser observado na Figura 3.42.

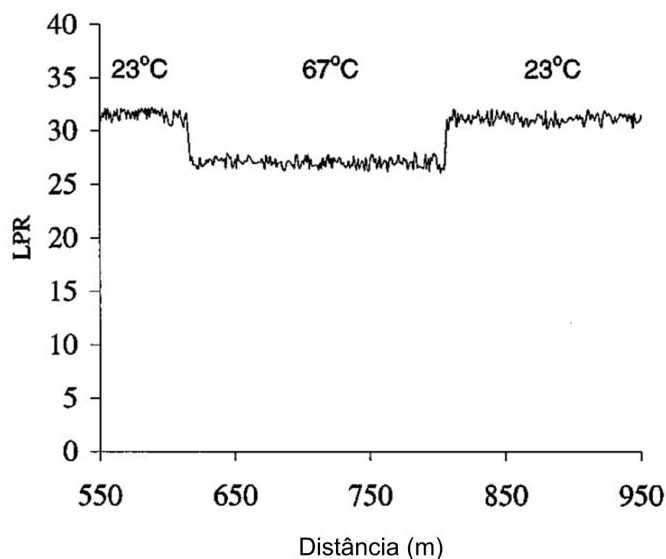


Figura 3.42 – Medição de temperatura ao longo da fibra óptica. Traduzida do trabalho de KEE et al. (2000).

Com esse sistema, conseguiu-se atingir boa resolução espacial (35 cm) e uma resolução de temperatura de 4,3°C em uma fibra óptica de 1 km de comprimento. Utilizando-se os espalhamentos Rayleigh e Brillouin, pôde-se trabalhar com fibras ópticas de maior comprimento comparado com as fibras utilizadas nos sistemas Rayleigh, mantendo-se boa resolução espacial das medidas.

3.4.2 Espalhamento não-Linear Raman

3.4.2.1 Conceituação do Espalhamento Raman

O espalhamento não-linear, de uma forma geral, ocorre quando a densidade de potência no núcleo da fibra óptica atinge valores bastante elevados. Assim, o campo elétrico no interior da fibra se torna muito intenso a ponto de ultrapassar um determinado valor crítico de campo. Desse modo, o meio passa a ter um comportamento não-linear frente à excitação aplicada.

A descoberta do espalhamento Raman foi alcançada através de experimentos realizados por C. V. Raman no ano de 1928 (FRAZÃO et al, 2009). De acordo com ISLAM (2004), as primeiras observações de tal espalhamento de luz foram feitas quando da propagação do feixe óptico em meios líquidos. Constatou-se que uma parcela do feixe se espalhava com valor de frequência diferenciado comparado ao da luz incidente.

Entretanto, a constatação do espalhamento Raman em fibras ópticas aconteceu somente no ano de 1971, quando STOLEN et al. (1972) observaram esse tipo de espalhamento em fibras de vidro e, um ano mais tarde, o mesmo grupo efetuou medições do ganho Raman em uma fibra do mesmo tipo (STOLEN et al., 1973).

A partir da observação e da quantificação da intensidade do fenômeno em fibras ópticas de sílica, estudos e investigações do efeito foram realizados nos mais diversos centros de pesquisa nas áreas dos fenômenos ópticos. De acordo com GRATAN e MEGGITT (2000), em meados de 1980, grande parte dos sensores distribuídos de temperatura se embasavam no espalhamento Raman. Nessa mesma década, diversas companhias passaram a comercializar o sistema de medição de temperatura distribuído utilizando-se do efeito Raman. Muitas dessas empresas continuam, nos dias atuais, a comercializar sensores distribuídos de temperatura baseado nesse mesmo efeito.

Uma vez descrita a descoberta do espalhamento Raman bem como a quantificação da intensidade da luz espalhada, faz-se necessária uma discussão sobre a explicação física do fenômeno. De acordo com CHESTER (1987), a luz que propaga em um determinado guia óptico pode sofrer modulação devido ao movimento rotacional e às vibrações moleculares do meio. Segundo ROSSETTO (2004), o espalhamento de luz ocorre devido à interação entre o feixe óptico incidente e as moléculas do meio de propagação. Conforme destaca o trabalho de AGRAWAL et al. (2001), o fenômeno do espalhamento Raman converte uma pequena parte da energia da luz incidente em um ou mais campos ópticos, cujas frequências são diferentes em relação a do feixe incidente. Conforme ROSSETTO (2004), as frequências das raias de luz espalhada dependem dos modos vibracionais e das rotações das moléculas que constituem o guia óptico.

A quantificação do efeito Raman é realizada por meio da teoria da física quântica. De forma qualitativa, o espalhamento de luz devido ao efeito Raman ocorre quando um fóton atinge uma molécula do meio, fazendo-a passar para um estado de energia de vibração maior do que o anterior à colisão. O fóton transfere parte de sua energia para a molécula de forma que o fóton resultante possua menor energia e maior comprimento de onda, obedecendo à lei de Planck, formando a chamada componente Stokes (RIBEIRO, 2005; AGRAWAL et al., 2001; ROSSETTO, 2004). O fóton também pode receber parte da energia de vibração de uma determinada molécula. Desse modo, o processo observado é justamente o oposto ao supracitado, gerando então a componente anti-Stokes, onde o fóton resultante possuirá menor comprimento de onda e maior energia, em conformidade com a lei de Planck.

As duas formas de irradiação de energia compostas pelo espalhamento Raman são exibidas pelo espectro de frequência através da Figura 3.43, onde também pode ser visualizado o espalhamento Rayleigh e Brillouin (THÉVENAZ, 2011).

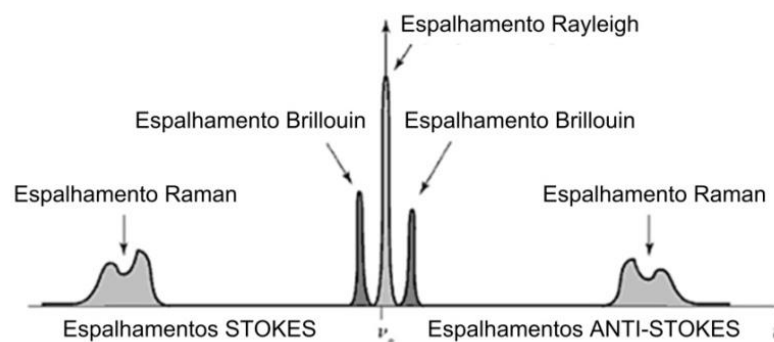


Figura 3.43 – Espectro de frequência dos espalhamentos de luz que ocorrem em fibras ópticas. Traduzida do trabalho de THEVENAZ (2011).

Como a relação entre as componentes anti-Stokes e Stokes depende da temperatura, a medição do espalhamento de luz Raman pode ser empregada para estimá-la ao longo da fibra óptica (RIGHINI et al., 2009).

Uma vez que o espalhamento Raman foi qualificado, parte-se agora para a análise da aplicabilidade do efeito no monitoramento distribuído de temperatura. Assim, o item subsequente aborda sobre o emprego de tal fenômeno na medição distribuída de temperatura.

3.4.2.2 Utilização do Espalhamento Raman como Sensor de Temperatura

Embora as primeiras utilizações do espalhamento Raman tenham se concentrado nas aplicações relacionadas à amplificação do sinal óptico, o campo do uso do efeito Raman não ficou limitado apenas a tais aplicações. Com a descoberta da variação da intensidade do campo espalhado com a temperatura, os primeiros sensores de temperatura distribuídos começaram a surgir no mercado, onde o primeiro resultado experimental da utilização do espalhamento Raman para medição térmica foi publicado em 1988 (DAKIN et al, 1988).

De acordo com NIKLES (2007), o espalhamento Raman é influenciado pelas vibrações moleculares do meio, e, deste modo, o mesmo é dependente da temperatura. Consequentemente, a luz retroespalhada traz consigo informações térmicas do ponto de ocorrência do fenômeno Raman. Conforme observado por meio da Figura 3.43, há duas regiões do espalhamento chamadas de Stokes e anti-Stokes. Porém, a amplitude da componente anti-Stokes é dependente da temperatura do meio ao passo que a amplitude da componente Stokes praticamente não varia com a temperatura (NIKLES, 2007; INAUDI e GLISIC, 2006). A Figura 3.44 mostra o comportamento dos diversos tipos de espalhamento de luz com a temperatura. Nota-se que a intensidade da componente de maior energia apresenta uma relação com a temperatura do meio.

Segundo THEVENAZ (2011), a informação de temperatura pode ser obtida tomando-se a relação entre a intensidade das potências anti-Stokes e Stokes. A Equação (3.4) mostra a dependência da razão entre a intensidade da componente anti-Stokes com a Stokes com relação à temperatura do ponto de ocorrência do espalhamento.

$$\frac{P_{anti-Stokes}}{P_{Stokes}} \sim \exp(-h\Delta\nu / kT). \quad (3.4)$$

Sendo que h representa a constante de Planck, $\Delta\nu$ representa a diferença entre a frequência do raio incidente e a luz espalhada, k representa a constante de Boltzmann e T a temperatura do meio

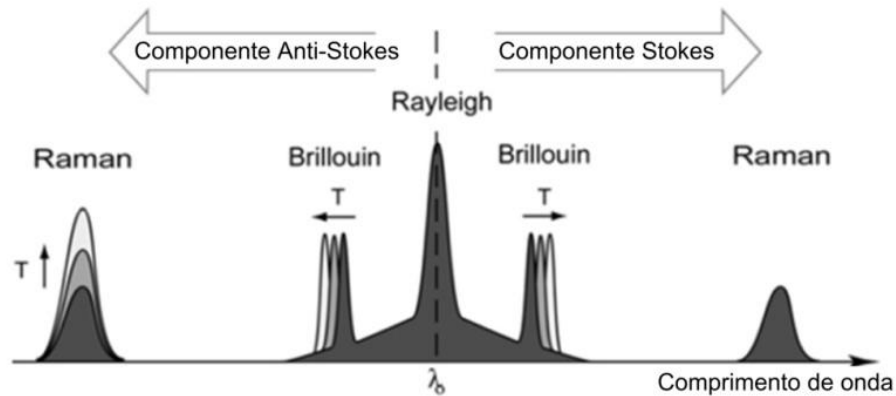


Figura 3.44 – Espectros do comprimento de onda do espalhamento de luz Rayleigh, Raman e Brillouin. Traduzida do trabalho de INAUDI e GLISIC (2006).

Segundo RIBEIRO (2005), o espalhamento de luz por efeitos não-lineares surge principalmente em fibras do tipo monomodo por causa do menor diâmetro do núcleo. Entretanto, de acordo com GRATTAN e MEGGITT (2000), apenas uma fração do espalhamento Raman é detectada em um dos terminais da fibra óptica. Sendo assim, a intensidade do sinal luminoso captado pelos detectores ópticos pode ser comprometida devido à atenuação sofrida ao longo do caminho de propagação.

Portanto, para se desvencilhar de tal problema, os sistemas de medição de temperatura baseados no espalhamento Raman utilizam fibras ópticas multimodo. O emprego desse tipo de guia óptico é adotado para que o estado de não-linearidade seja atingido por meio de um valor de potência óptica mais elevada em relação à fibra do tipo monomodo. Desse modo, como a fonte óptica apresenta maior potência, a intensidade do sinal luminoso Raman retroespalhado é maior, facilitando assim a detecção bem como resguardando a integridade do sinal frente às perdas do meio de transmissão.

O esquemático do sistema DTS Raman de medição de temperatura pode ser visualizado por meio da Figura 3.45.

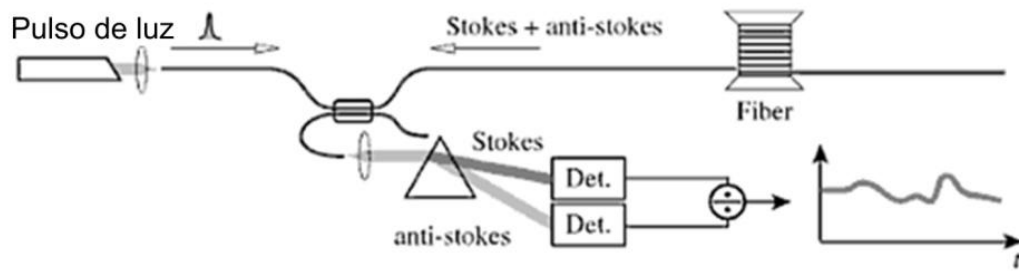


Figura 3.45 – Esquemático do sistema de medição de temperatura baseado no fenômeno Raman. Traduzida do trabalho de THEVENAZ (2011).

Nota-se, através da Figura 3.45, que uma fonte de luz pulsante é utilizada para excitar o sistema. Assim, as componentes anti-Stokes e Stokes são geradas e detectadas com o passar do tempo. A temperatura ao longo do comprimento da fibra óptica é obtida através do monitoramento da variação da intensidade das componentes do efeito Raman. Já a determinação do local onde as variações de temperatura ocorrem é realizada através do monitoramento do intervalo de tempo, contabilizado desde o instante que o pulso é lançado dentro da fibra até o momento que o retroespalhamento é detectado. Assim, conhecida a velocidade de propagação do feixe luminoso dentro da fibra, faz-se a estimativa da localização do ponto de ocorrência do efeito.

Os medidores baseados no sistema DTS Raman conseguem realizar medições em fibras ópticas multimodo de comprimento em torno de 10 km, com resolução de temperatura e espacial da ordem de 1 °C e 1 m, respectivamente (GRATTAN e MEGGITT, 2000). Esses valores são bastante típicos para os medidores baseados no espalhamento Raman. Segundo THEVENAZ (2011), o tempo total de medição deste sistema é da ordem de 5 min devido ao número de amostras colhidas para a realização do cálculo da média de temperatura em um determinado trecho da fibra óptica.

Há equipamentos que trabalham com menor resolução de temperatura, conforme citado no trabalho de INAUDI e GLISIC (2006), os quais operaram com uma resolução de 0,1 °C para a leitura de temperatura em uma fibra multimodo de 8 km. De acordo com esse trabalho, um sistema de monitoramento de temperatura foi implementado para medição distribuída em um sistema de cabeamento elétrico. A Figura 3.46 apresenta o sistema de medição de temperatura inserido junto ao cabeamento isolado.



Figura 3.46 – Implementação de um sistema de monitoramento de temperatura para cabos isolados (INAUDI e GLISIC, 2006).

Com o sistema montado, os autores do trabalho partiram para a medição de temperatura ao longo do cabo considerando-se diferentes situações de carregamentos. Os resultados obtidos por esse ensaio podem ser visualizados através da Figura 3.47.

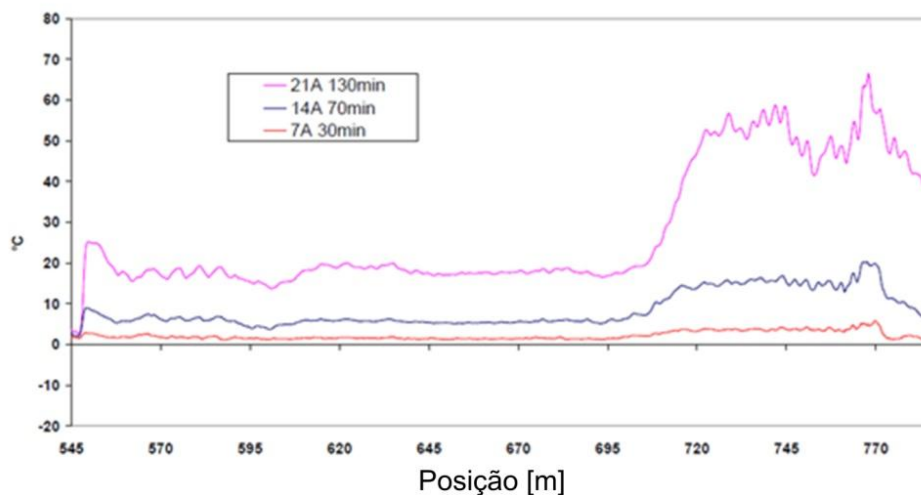


Figura 3.47 – Medição de temperatura ao longo de um cabo isolado para diferentes valores de carregamento. Traduzida do trabalho de INAUDI e GLISIC (2006).

STODDART et al. (2005) realizaram o monitoramento térmico utilizando-se o sistema DTS Raman em uma fibra multimodo. O arranjo completo utilizado para a medição de temperatura pode ser visualizado por meio da Figura 3.48.

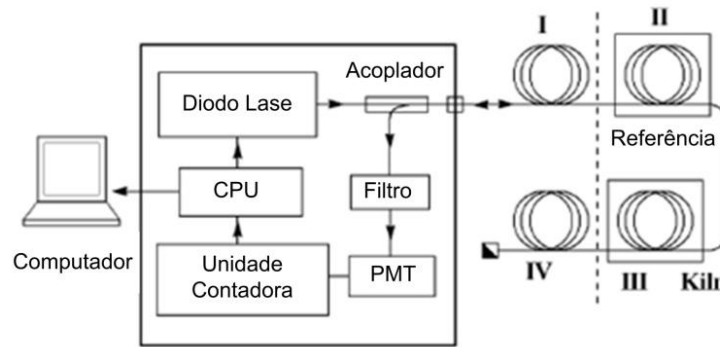


Figura 3.48 – Esquemático do sistema de medição utilizando-se o efeito Raman. Traduzida do trabalho de (STODDART et al., 2005).

Nota-se que o sistema era composto por quatro trechos de fibra óptica, onde os trechos I e IV eram formados por fibras ópticas multimodo convencionais, utilizadas para interligar os trechos II (referência) e III (submetido à alta temperatura) ao sistema de medição. Esses últimos dois trechos eram compostos por fibras multimodo com revestimento em poliimida, capazes de operar em alta temperatura.

Com o sistema de medição montado, realizou-se o registro da temperatura ao longo do cabeamento óptico. O resultado do monitoramento térmico pode ser observado por meio da Figura 3.49.

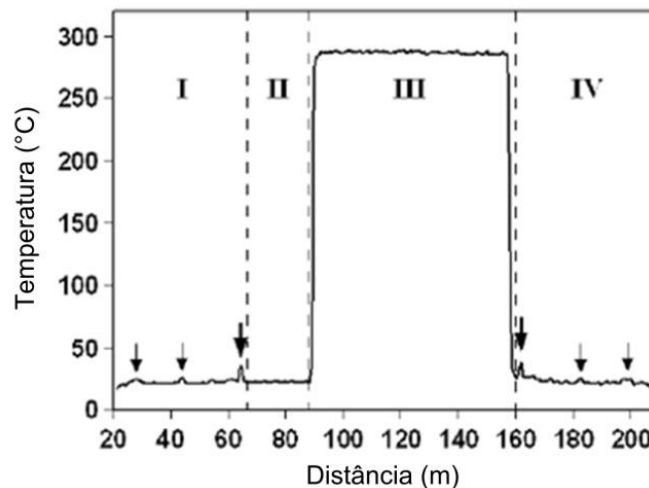


Figura 3.49 – Variação da temperatura em função do comprimento da fibra óptica. Traduzida do trabalho de STODDART et al. (2005).

Segundo os autores do trabalho, o sistema obteve uma precisão nas medições de temperatura de 2°C , podendo operar sob distâncias de 2 km a 3 km , com resolução espacial de 1 m e tempo de medição em torno de 600 s .

O melhoramento da resolução espacial bem como do tempo de atualização das medições pode ser atingido utilizando-se uma técnica conhecida como *Digital Time-Correlated Single-Photon Counting Technique*, onde uma resolução espacial típica de 0,1 m foi obtida, com resolução de temperatura de 2 °C, com tempo total de medição em torno de 1 min (GRATTAN e MEGGITT, 2000).

3.4.3 Espalhamento não-Linear Brillouin

3.4.3.1 Conceituação do Espalhamento Brillouin

De acordo com ROSSETTO (2004), o espalhamento Brillouin foi previsto teoricamente no ano de 1922 e observado pela primeira vez em 1964 em cristais de quartzo. No entanto, somente na década de 70 os primeiros estudos sobre o fenômeno Brillouin começaram a ser realizados impulsionados pelo fato de quantificar o impacto do espalhamento nos sistemas ópticos de comunicação.

O espalhamento Brillouin ocorre devido às vibrações mecânicas em nível molecular do guia óptico. A luz que propaga no meio sofre uma modulação por meio da interação com a onda acústica gerada pelas vibrações moleculares (MINARDO, 2003). A interação entre o campo óptico em propagação na fibra com as ondas acústicas do meio geram o espalhamento de luz conhecido como espalhamento Brillouin. A onda acústica que gera tal efeito pode ser criada espontaneamente devido à excitação térmica das moléculas que compõem o guia óptico. Nesse caso, o efeito é chamado de espalhamento Brillouin espontâneo (ROSSETTO, 2004). Já o espalhamento Brillouin estimulado em fibras ópticas ocorre devido à elevada densidade de potência óptica no núcleo da fibra que coagirá o aparecimento de vibrações moleculares e, conseqüentemente, ondas acústicas em propagação no guia óptico (RIBEIRO, 2005).

Semelhantemente ao espalhamento Raman, o espalhamento Brillouin possui duas componentes espectrais também chamadas de anti-Stokes, que propaga na direção do pulso de luz e Stokes, que propaga na direção oposta ao mesmo. As frequências de Brillouin Stokes e anti-Stokes pode ser obtida através da Equação (3.5) (THEVENAZ, 2011).

$$\nu_B = \pm \frac{2n_w V_a}{\lambda_i} \quad (3.5)$$

Sendo ν_B , a frequência de Brillouin, n_w , o índice de refração do meio, V_a , a velocidade da onda acústica no meio e λ_i , o comprimento de onda da luz incidente. Observa-se que a mesma é dependente tanto da velocidade da onda acústica quanto da variação do índice de refração do meio. Quaisquer variações ambientais que provoquem mudanças nessas duas grandezas são passíveis de medição. Portanto, vários experimentos mostram que tanto as mudanças de temperatura quanto as variações de tensão mecânica da fibra óptica causam desvios da frequência de Brillouin, sendo que a relação entre ambos é linear.

3.4.3.2 Utilização do Espalhamento Brillouin como Sensor de Temperatura

Embora a descrição teórica do espalhamento Brillouin tenha sido realizada no início do século XX, somente por volta do final da década de 80 as primeiras publicações sobre sensores distribuídos utilizando-se o efeito Brillouin foram realizadas.

HORIGUCHI et al. (1989) demonstraram que a frequência de Brillouin é dependente da deformação mecânica longitudinal da fibra óptica, ampliando a utilização do fenômeno como sensor distribuído de tensão mecânica. O arranjo experimental utilizado pode ser visualizado por meio da Figura 3.50. Nota-se que uma bobina formada por um cabo de fibra óptica sofreu esforços de tração. As variações de frequência foram captadas pelo sistema de leitura.

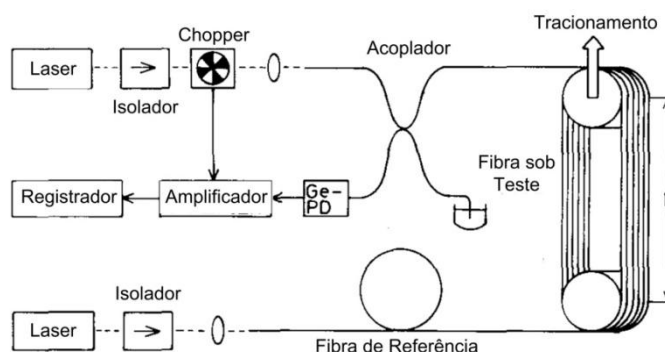


Figura 3.50 – Arranjo experimental utilizado para detecção da variação da frequência de Brillouin frente as variações de deformação mecânica. Traduzida do trabalho de HORIGUCHI et al. (1989).

Com medições realizadas por esse sistema, obteve-se a relação entre a variação da frequência de Brillouin com o tensionamento mecânico. Esse resultado pode ser observado por meio da Figura 3.51.

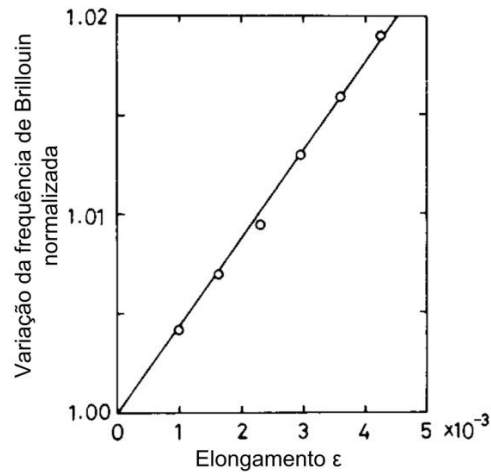


Figura 3.51 – Variação da frequência de Brillouin versus deformação. Traduzida do trabalho de Horiguchi et al. (1989).

Já CULVERHOUSE et al. (1989) mostraram que a frequência da luz retroespalhada no fenômeno Brillouin depende também da temperatura do meio onde o espalhamento de luz ocorre. Essa constatação foi comprovada por meio da realização de experimentos envolvendo medições da frequência de Brillouin em função das variações térmicas impostas em uma fibra óptica. O arranjo experimental utilizado pelos autores do trabalho pode ser observado por meio da Figura 3.52. A leitura do sinal retroespalhado foi realizada por meio do filtro *Fabry-Perot*.

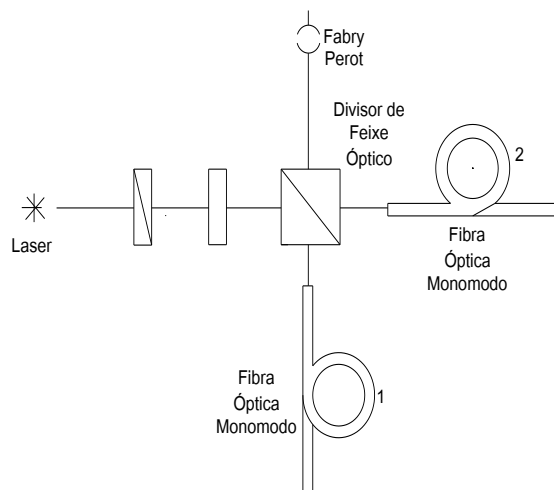


Figura 3.52 – Esquemático utilizado para a comprovação da variação da frequência de Brillouin frente a modificações da temperatura do meio. Traduzida do trabalho de CULVERHOUSE et al. (1989).

Submeteu-se uma das fibras ópticas do sistema a temperatura de $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a segunda fibra operou com temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Assim, foi possível observar a diferença do comprimento de onda central de Brillouin para os dois casos. A Figura 3.53 exibe as medições do espectro da luz espalhada com a variação da temperatura para as duas fibras ensaiadas.

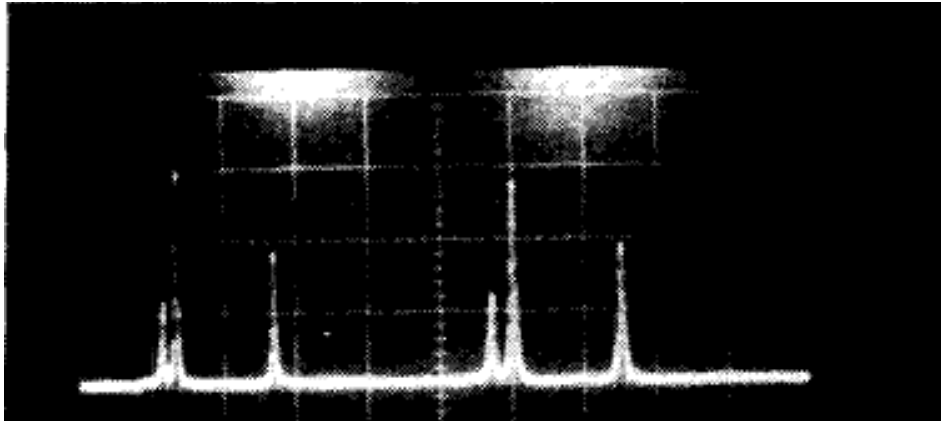


Figura 3.53 – A temperatura da fibra 1 foi acrescida de $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ e observou-se o deslocamento de 29 MHz na frequência de Brillouin. A fibra 2 foi resfriada a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e observou-se o deslocamento de 153 MHz à direita (CULVERHOUSE et al., 1989).

Observou-se o desvio de 29 MHz para a fibra aquecida a uma temperatura de $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 153 MHz para a segunda fibra que operou a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ambos os deslocamentos tomaram como base o comprimento de onda central a temperatura ambiente.

PARKER et al. (1997, 1998) apresentaram um esquemático para o monitoramento tanto de temperatura quanto de deformação mecânica em fibras ópticas considerando-se a utilização sistema DTSS Brillouin.

Primeiramente, esse trabalho verificou a dependência do comprimento de onda e da intensidade do sinal Brillouin com a temperatura. Para isso, realizou-se um experimento com uma fibra óptica, de $4,3\text{ km}$ de comprimento, imersa em um recipiente contendo água, passível de variação de temperatura. Para averiguar a dependência do sinal de Brillouin frente às deformações mecânicas, ensaiou-se uma fibra de 50 m de comprimento. Os resultados obtidos por meio desses testes podem ser observados através das Figura 3.54 e Figura 3.55, as quais exibem as variações do sinal de Brillouin com a temperatura e deformação mecânica, respectivamente.

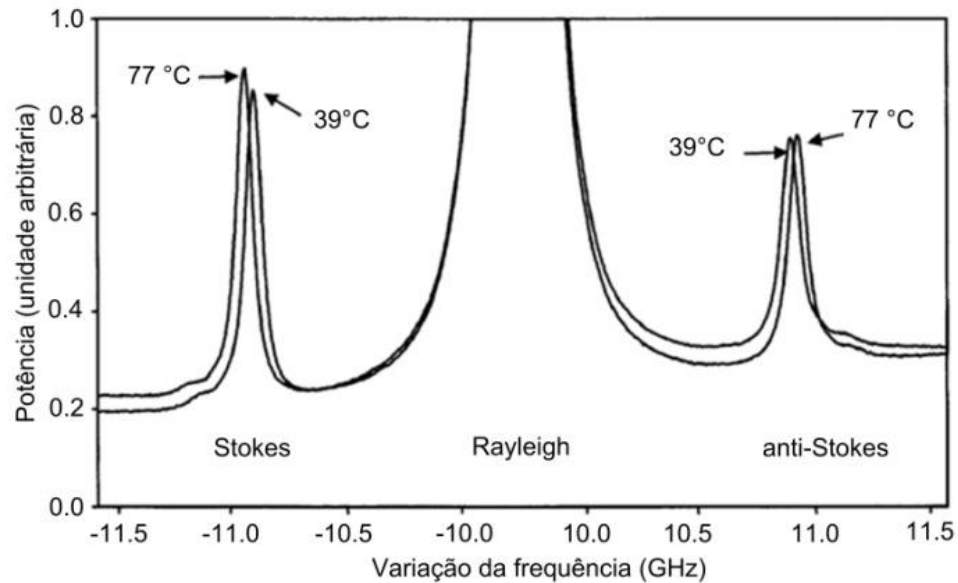


Figura 3.54 – Averiguação da dependência do sinal de Brillouin com a temperatura. Traduzida do trabalho de PARKER et al. (1998).

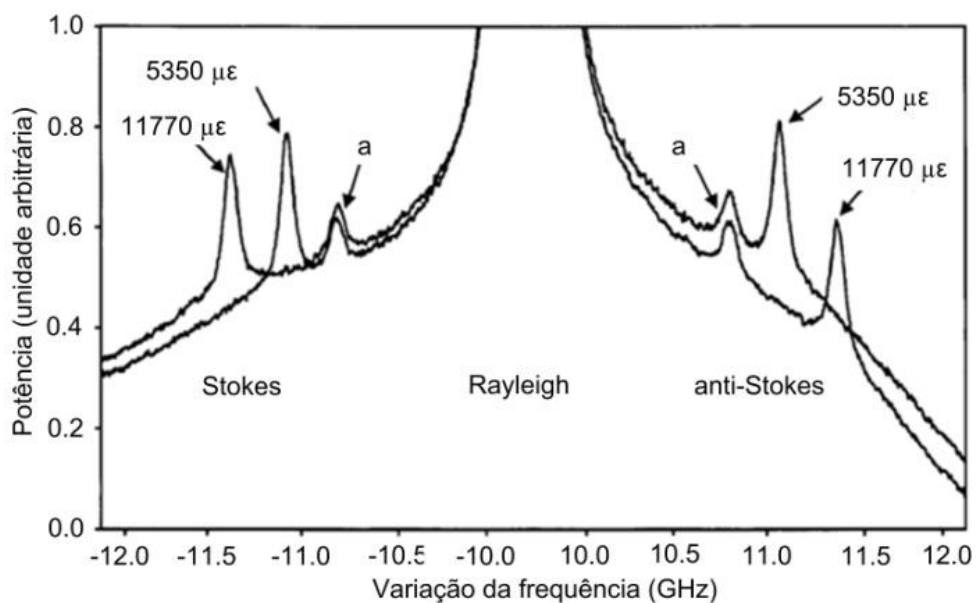


Figura 3.55 - Constatação das variações do sinal de Brillouin com deformações mecânicas. Traduzida do trabalho de PARKER et al. (1998).

Constatada a dependência do sinal de Brillouin com a temperatura e deformação mecânica, iniciou-se o processo experimental para quantificar ambos os efeitos simultaneamente. Assim, utilizando-se o arranjo experimental mostrado na Figura 3.56, foi possível obter os resultados exibidos na Figura 3.57. Esses resultados foram obtidos por meio da coleta de 2000 dados a cada trecho de 10 m de fibra, com tempo de medição de 1 h.

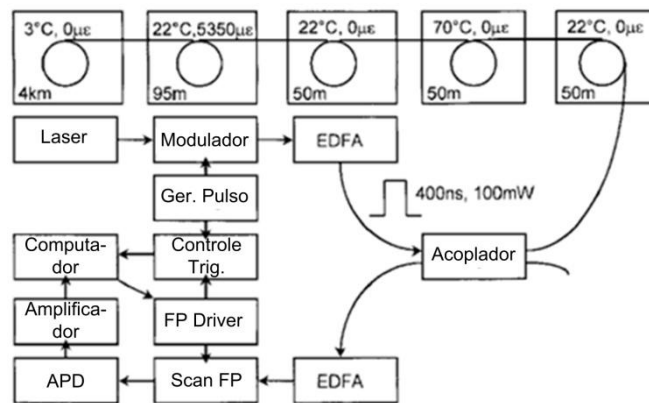


Figura 3.56 – Esquemático do sistema utilizado para a detecção simultânea da temperatura e deformação mecânica em uma fibra óptica monomodo. Traduzida do trabalho de PARKER et al. (1998).

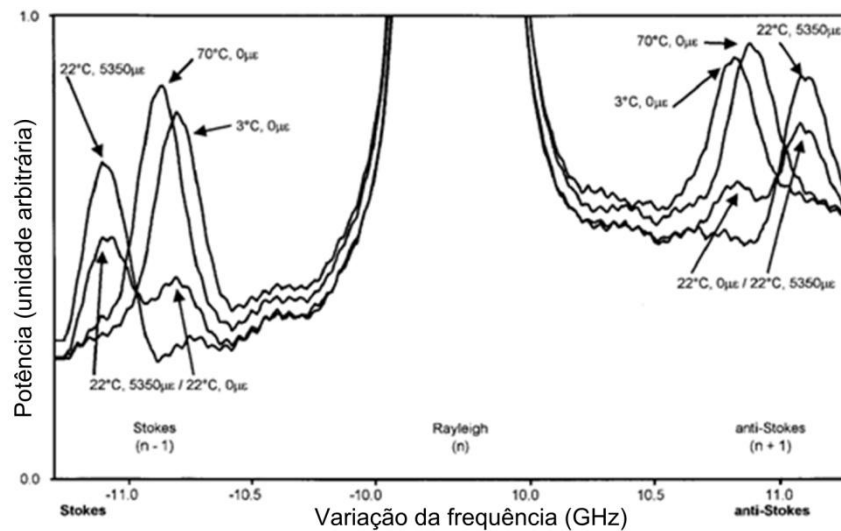


Figura 3.57 – Registros do espectro de Brillouin para vários locais da fibra óptica frente a variações de temperatura e deformação mecânica. Traduzida do trabalho de PARKER et al. (1998).

Através da análise dos resultados, concluiu-se que o sistema apresentou uma resolução de temperatura de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $100\text{ }\mu\epsilon$ de resolução de deformação mecânica.

Segundo WEBB et al. (2000), a temperatura modifica dois parâmetros do espalhamento Brillouin: a frequência – que também é influenciada pela deformação mecânica – e a intensidade do sinal retroespalhado. As primeiras utilizações do efeito Brillouin para o sensoriamento distribuído se concentraram nas medições da variação da frequência do sinal espalhado. No entanto, devido à forte relação entre a intensidade do sinal com a temperatura, os sistemas de monitoramento partiram para a medição tanto da frequência quanto da amplitude do sinal, pois combinando a medição da variação da

frequência de Brillouin com a intensidade do sinal retroespalhado, pode-se trabalhar com a medição tanto de temperatura quanto de deformação mecânica.

Percebendo a tendência dos sistemas de monitoramento trabalhar com a medição da intensidade do sinal Brillouin, os autores desse trabalho se concentraram na medição desse valor para realizar a varredura da temperatura ao longo do guia óptico. Utilizando-se uma fibra óptica de 20 km de comprimento, onde, no quilômetro 9, dois trechos de 10 m de fibra foram inseridas em um forno para a variação da temperatura. Esses dois trechos foram separados por 10 m de guia luminoso a temperatura ambiente. Os resultados da medição da intensidade de Brillouin e do monitoramento térmico podem ser visualizados por meio das Figura 3.58 e Figura 3.59.

Nota-se, por meio da Figura 3.59, que foi possível identificar a localização dos trechos aquecidos próximos ao quilômetro 9 da fibra óptica. A temperatura desses trechos foi mantida em 83 °C e tal valor foi mensurado pelo sistema óptico.

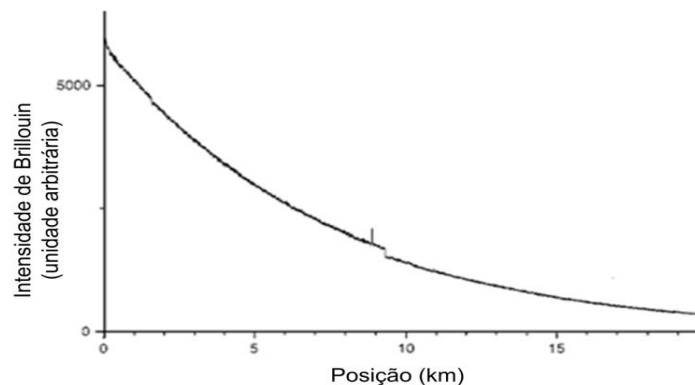


Figura 3.58 – Variação da intensidade do sinal Brillouin ao longo do cabo óptico. Traduzida do trabalho de WEBB et al. (2000).

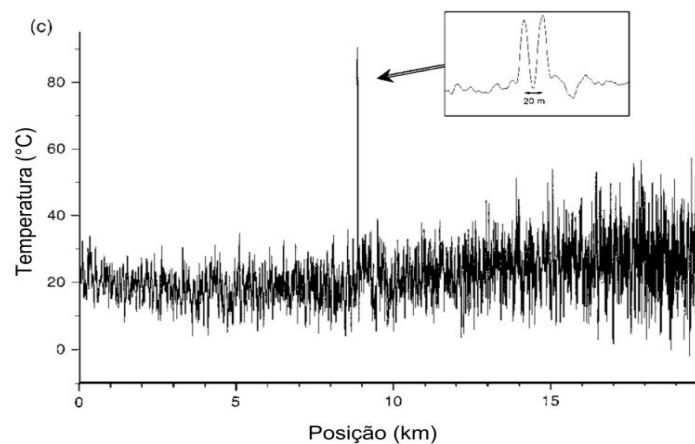


Figura 3.59 – Variação da temperatura ao longo da fibra óptica. Traduzida do trabalho de WEBB et al. (2000).

Percebe-se que existe certo nível de ruído no sinal obtido para o sistema. Assim, os autores do trabalho propõem uma melhoria da leitura de temperatura com base na realização de maior número de médias na amostragem do sinal. Nesse trabalho, foram realizadas cerca de 100 mil médias para os sinais próximos ao medidor e obteve-se um erro na leitura de temperatura de $1,5^{\circ}\text{C}$. Já para a extremidade final da fibra óptica, realizou-se 300 mil médias e o erro de temperatura obtido foi de 6°C . A resolução espacial obtida por tal sistema foi de 7 m .

De acordo com WAIT e HARTOG (2001), foi possível realizar a medição de temperatura ao longo de uma fibra óptica monomodo de aproximadamente 26 km de extensão utilizando-se o sistema DTSS Brillouin. Os primeiros 300 m do guia óptico foram enrolados em forma de uma bobina cilíndrica cuja temperatura foi mantida sob controle ($46,5^{\circ}\text{C}$). Esse trecho de fibra foi utilizado para a calibração do sistema. Da mesma forma, os 300 últimos metros da fibra óptica foram submetidos a diferentes temperaturas, a saber: $87,8^{\circ}\text{C}$, $-0,8^{\circ}\text{C}$ e $40,6^{\circ}\text{C}$. Essas temperaturas foram controladas por três unidades de calibração localizadas a cada 100 m do guia de onda. O resultado do monitoramento térmico ao longo do guia óptico pode ser visualizado por meio da Figura 3.60.

Próximo ao início da fibra (Figura 3.60) nota-se uma variação brusca na curva de temperatura. Isso ocorreu devido à inserção de um acoplador entre a bobina e a fibra sensível. O acoplador foi colocado propositalmente para analisar o efeito de sua inserção do sistema.

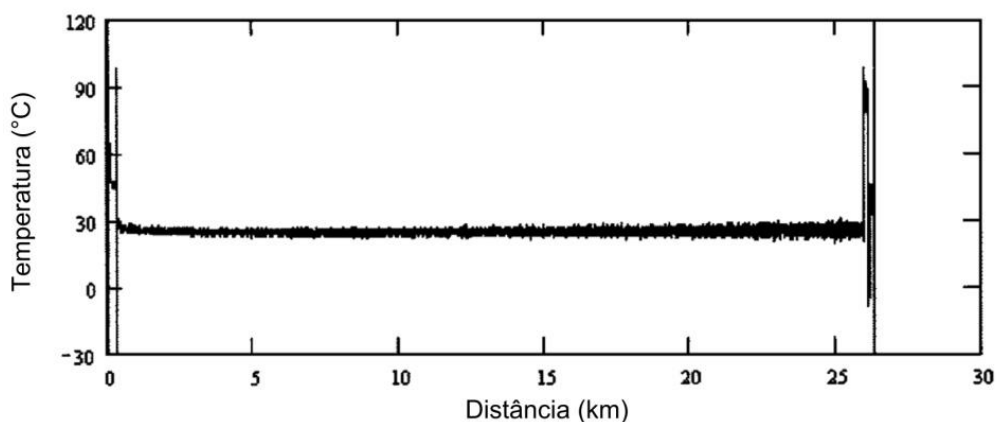


Figura 3.60 – Distribuição da temperatura ao longo da fibra óptica. Traduzida do trabalho de WAIT e HARTOG (2001).

Para melhor visualização, Figura 3.61 apresenta a distribuição de temperatura ao longo dos últimos 300 m de fibra submetida a diferentes temperaturas.

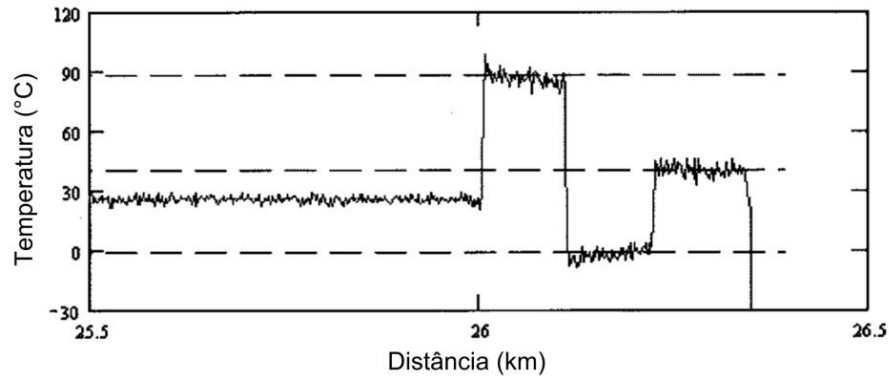


Figura 3.61 – Temperatura da fibra óptica na extremidade da mesma. Traduzida do trabalho de WAIT e HARTOG (2001).

De acordo com os autores, a medição de temperatura distribuída na fibra óptica de 26 km foi realizada com resolução espacial de 2 m e de temperatura de 1 °C . No entanto, observou que a resolução da temperatura diminuiu quando as medições foram coletadas da extremidade final da fibra óptica. O valor obtido de resolução foi de 7 °C para tal caso. O melhoramento da resolução de temperatura foi implementado e obteve-se o valor menor que 1 °C para aproximadamente 20 km de fibra. Todavia, o tempo de medição aumentou consideravelmente, atingindo a casa de 180 min .

3.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os princípios de funcionamento dos sensores fluorescentes, FBG, DTS e DTSS para a medição de temperatura bem como as aplicações desses sistemas para o monitoramento térmico. Pôde-se perceber as características e peculiaridades de cada sistema como, por exemplo, quanto ao número de sensores por fibra, onde o sistema fluorescente opera com um sensor por guia de luz ao passo que os sensores FBG podem ser inseridos dezenas em um mesmo cabo óptico. Em relação aos sistemas distribuídos de temperatura, observou-se que o DTSS Rayleigh apresenta melhor resolução espacial, entretanto menor alcance comparado aos DTS Raman e DTSS Brillouin.

Por fim, foi possível observar as vantagens e desvantagens de cada sistema de medição de temperatura fundamentado no sensoriamento via fibra óptica. Notou-se que os sensores fluorescentes apresentam capacidade de operar sob altas temperaturas e com tempo de atualização das leituras da ordem unidades de segundo. No entanto, para se operar com uma elevada quantidade de sensores, deve-se, do mesmo modo, operar com a mesma quantidade de cabos ópticos. Em relação aos sensores FBG, notou-se que esses podem operar em série/paralelo, bastando para isso utilizar a multiplexação no comprimento de onda ou no tempo, atingindo assim maior quantidade de sensores. Entretanto, o sistema FBG para medição de temperatura pode ser influenciado por deformações mecânicas nas grades, sendo necessário realizar a blindagem frente a esforços mecânicos nas regiões sensoras.

Finalmente, as tecnologias de sensoriamento distribuído apresentam a vantagem de realizar a medição térmica ao longo de todo o comprimento do guia óptico. O sistema DTSS Rayleigh possui melhor resolução espacial, porém menor alcance e sensibilidade cruzada frente a deformações mecânicas. As tecnologias DTS Raman podem operar com dezenas de quilômetros de fibra. No entanto, apresentam medições com base na intensidade do sinal óptico, susceptível a calibração. As técnicas DTSS Brillouin também apresentam capacidade de operação a dezenas de quilômetros de fibra, operando no domínio da frequência. Todavia, esse sistema, quando aplicado a medição de temperatura, pode sofrer influência de deformações das fibras.

Capítulo 4

Aplicação das Técnicas de Monitoramento de Temperatura em Transformadores

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo apresentar algumas referências e seus detalhamentos que relatam sobre a medição de temperatura em transformadores. Para tanto, nos itens subsequentes são abordados desde as técnicas convencionais de medição de temperatura até as técnicas baseadas em fibras ópticas.

4.2 Sistemas Baseados em Técnicas Convencionais de Medição de Temperatura

4.2.1 Considerações Preliminares

As técnicas convencionais mais empregadas para a medição de temperatura em transformadores são baseadas na utilização de termopares e/ou termorresistores. De forma simplificada, o termopar é formado pela junção de dois tipos diferentes de condutores que produzem uma diferença de potencial elétrico proporcional à diferença de temperatura entre os condutores. A medição de temperatura através desses dispositivos é baseada na medição da tensão elétrica nos terminais do mesmo. Com relação ao termorresistor, pode-se qualificá-lo como um tipo de resistor cuja resistência varia significativamente com a temperatura. O monitoramento térmico realizado por esse dispositivo é obtido através da medição da resistência elétrica entre seus terminais.

Ambos os sensores de temperatura supracitados são utilizados para a medição de temperatura em transformadores. No entanto, como esses elementos não são constituídos por materiais dielétricos, não é recomendada a instalação desses dispositivos em contato direto com os enrolamentos do transformador, pois os mesmos podem causar problemas de isolamento elétrica. Outro problema que pode ser associado aos termopares e termorresistores são relativos às interferências eletromagnéticas, uma vez que esses elementos não são eletricamente passivos.

Embora haja limitações que restrinjam o campo de atuação desses termômetros, há também situações em que os mesmos podem ser largamente empregados. Em transformadores, esses dispositivos geralmente atuam na medição da temperatura do topo e do fundo do óleo, nos dutos dos radiadores, nos canais de entrada e saída do óleo para o

tanque entre outros. Existem também aplicações para o monitoramento térmico em que os termopares, por exemplo, encontram-se alocados em contato direto com a isolação dos condutores da bobina do transformador. Geralmente, utiliza-se essa configuração quando da tensão do equipamento não é elevada o bastante para causar problemas de isolação elétrica ou quando se trabalha com um protótipo, onde o transformador propriamente dito não opera sob tensões nominais.

Objetivando descrever algumas aplicações desses sensores térmicos, o item a seguir aborda o emprego dessas técnicas para o monitoramento térmico de transformadores.

4.2.2 Aplicações em Transformadores

Com o objetivo de realizar uma investigação do comportamento térmico do transformador frente à sobrecarga, PIERCE (1992a) desenvolveu um protótipo formado por uma bobina de 118 espiras de fio de alumínio em uma única camada. A configuração do protótipo foi escolhida dessa forma, pois representa, tipicamente, a camada interna dos enrolamentos de menor tensão de transformadores de médio porte.

Durante o processo de construção da bobina foram instalados diversos termopares ao longo das espiras do enrolamento. Depois de construída a bobina com os termopares instalados, inseriu-se todo o conjunto em um tanque com radiador e preencheu-se com óleo isolante. Diversos outros termopares foram instalados em volta do enrolamento, no fundo do óleo, no tanque e nos dutos do radiador.

Para se realizar a avaliação térmica do equipamento, primeiramente obteve-se a condição estável da temperatura da bobina. Esse estado foi atingido aproximadamente após 24 h de aquecimento. Depois de aquecida, dois testes foram realizados simulando uma sobrecarga de 150 % baseada na elevação de temperatura. Adotou-se o sistema de refrigeração com circulação natural e forçada do óleo isolante, onde o número de radiadores e ventiladores foi alterado ao longo da realização dos testes.

A Figura 4.1 apresenta o registro da leitura de temperatura durante o instante de sobrecarga do equipamento para a condição de circulação de óleo forçada. Nota-se que há uma diferença considerável de temperatura entre os canais interno e externo de circulação de óleo. Vale ressaltar que os termopares os quais realizaram as medições dos canais de óleo foram inseridos nas saídas desses canais, próximo à parte superior do enrolamento.

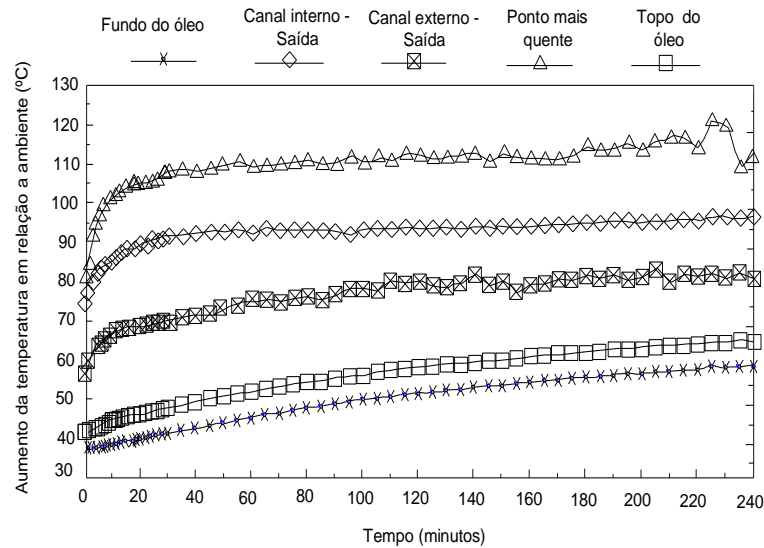


Figura 4.1 – Variação de temperatura para diferentes pontos de medição através de termopares durante a sobrecarga com circulação forçada de óleo. Traduzida do trabalho de PIERCE (1992a).

Também foi registrado o comportamento térmico axial da bobina ao longo do tempo de sobrecarga, conforme apresentado na Figura 4.2.

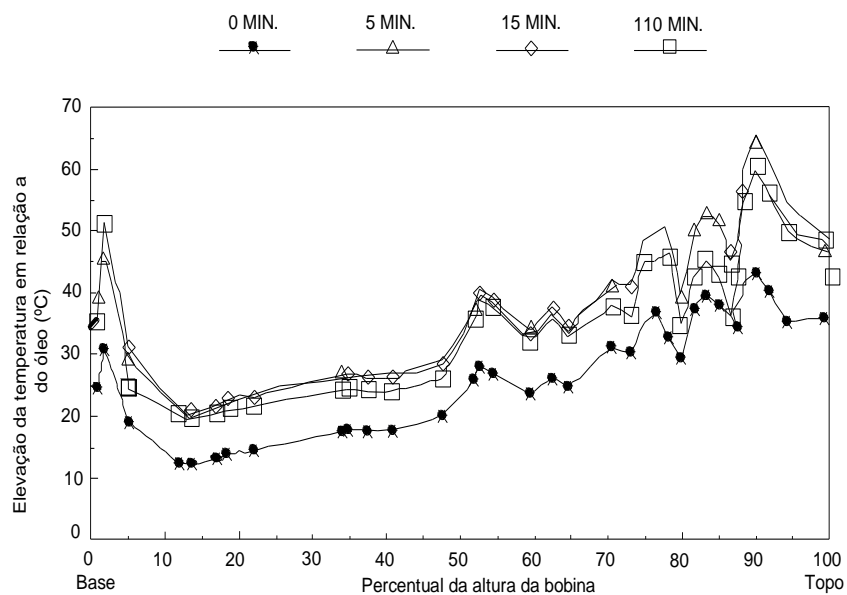


Figura 4.2 – Valores da variação da temperatura ao longo da bobina para a condição de circulação forçada do óleo isolante durante sobrecarga. Traduzida do trabalho de PIERCE (1992a).

Pode-se notar, por meio da Figura 4.2, que o ponto mais quente se localiza próximo a 90% da altura do enrolamento a partir da base. Por fim, a Figura 4.3 traz o comportamento térmico dos termopares que apresentaram os maiores valores de leitura de temperatura.

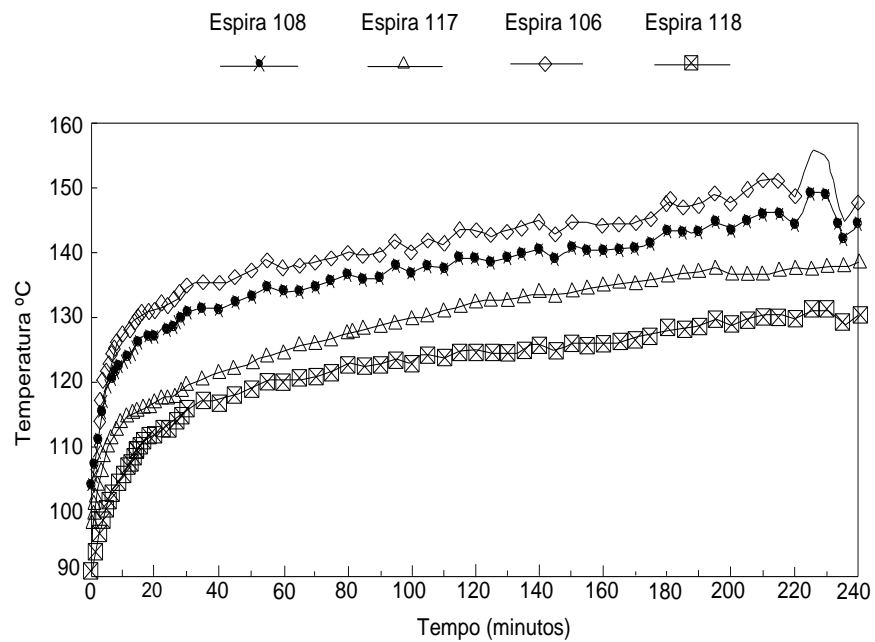


Figura 4.3 – Comparação da medição de temperatura durante a sobrecarga em diferentes pontos da bobina com condição de circulação forçada do óleo. Traduzida do trabalho de PIERCE (1992a).

Outros testes de elevação de temperatura também foram realizados considerando-se a sobrecarga do equipamento em condição natural de circulação do óleo isolante. Observou-se que para a bobina sob as condições supracitadas, houve instabilidade da temperatura ao longo do tempo, considerando-se a distribuição térmica na direção axial do enrolamento.

Portanto, através da medição de temperatura por meio de termopares alocados em diversos pontos do protótipo, (PIERCE, 1992a) avaliou a distribuição térmica axial sob diferentes condições de circulação do óleo isolante. Em decorrência dos resultados mensurados por esses termômetros, concluiu-se que a distribuição axial de temperatura da bobina é não-uniforme e o comportamento térmico ao longo da bobina pode variar com possíveis sobrecargas do equipamento.

ELMOUDI (2008) apresentou um modelo matemático para a previsão da temperatura do ponto mais quente do transformador. Basicamente, a simulação realizada para a previsão do maior valor de temperatura tinha como dados de entrada o valor da temperatura ambiente, ao longo do tempo de análise, bem como o valor da corrente, em pu, do equipamento. Com essas informações, foi possível obter a temperatura do topo do óleo e, posteriormente, a temperatura do ponto mais quente do equipamento. A Figura 4.4 apresenta esquematicamente o modelo utilizado para o cálculo da temperatura do ponto mais quente.

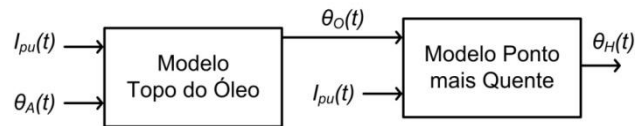


Figura 4.4 – Esquemático do modelo térmico para o cálculo da temperatura do ponto mais quente do transformador. Traduzida do trabalho de ELMOUDI (2008).

Para confrontar os valores obtidos teoricamente com os valores térmicos reais, foram realizados ensaios em um transformador de distribuição de 2500 kVA, 20,5/0,71 kV ONAN, Dy11. Os enrolamentos de menor valor de tensão eram formados por 18 camadas de folhas de alumínio com um canal de óleo e os enrolamentos de maior valor de tensão consistiam em 15 camadas com dois canais de óleo. Foram inseridos 28 termopares no transformador para a medição de temperatura em diversos pontos do equipamento – topo, fundo e dutos de óleo bem como em contato com a isolamento dos enrolamentos – conforme pode ser observado por meio da Figura 4.5.

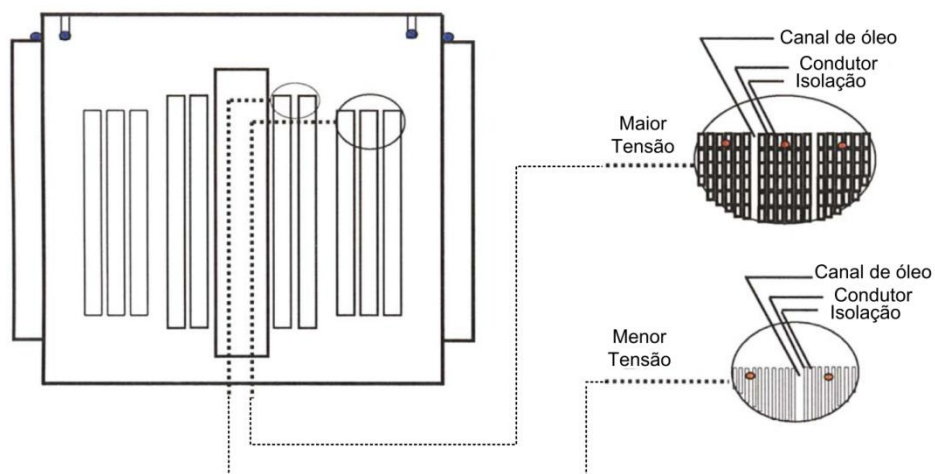


Figura 4.5 – Transformador sob teste. Os pontos na figura representam a localização dos termopares instalados no equipamento. Traduzida e adaptada do trabalho de ELMOUDI (2008).

A medição da temperatura do topo do óleo foi realizada em diferentes locais. Os pontos de instalação das sondas, inseridas em contato com a isolamento dos condutores de maior e menor tensão, foram definidos por meio do auxílio dado pelo fabricante do transformador.

Uma vez instalado os termopares, partiu-se para a realização de ensaios com o equipamento. Primeiramente, o transformador foi aquecido durante 300 min submetido à corrente nominal. Em seguida, utilizou-se 2 pu de corrente durante 90 min e registrou-se o valor da temperatura para ambos os casos. A Figura 4.6 apresenta o resultado da medição da

temperatura no topo do óleo para pontos diferentes de instalação do termopar, durante a situação de carregamento nominal.

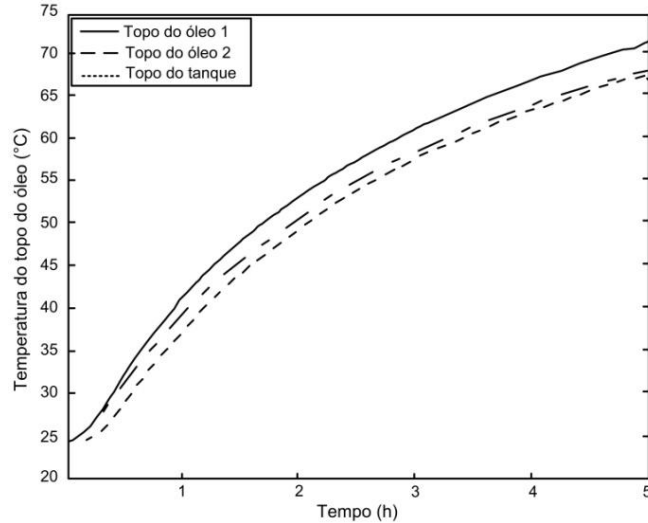


Figura 4.6 – Temperatura do topo do óleo para diferentes posições do termopar. Traduzida do trabalho de ELMOUDI (2008).

Observa-se, através da Figura 4.6, que houve diferenças entre os valores mensurados pelos sensores. Finalmente, a Figura 4.7 (a) e (b) mostram a predição e a medição da temperatura do topo do óleo e do ponto mais quente do equipamento, respectivamente, durante a condição nominal e, posteriormente, sob a condição de sobrecarga do transformador.

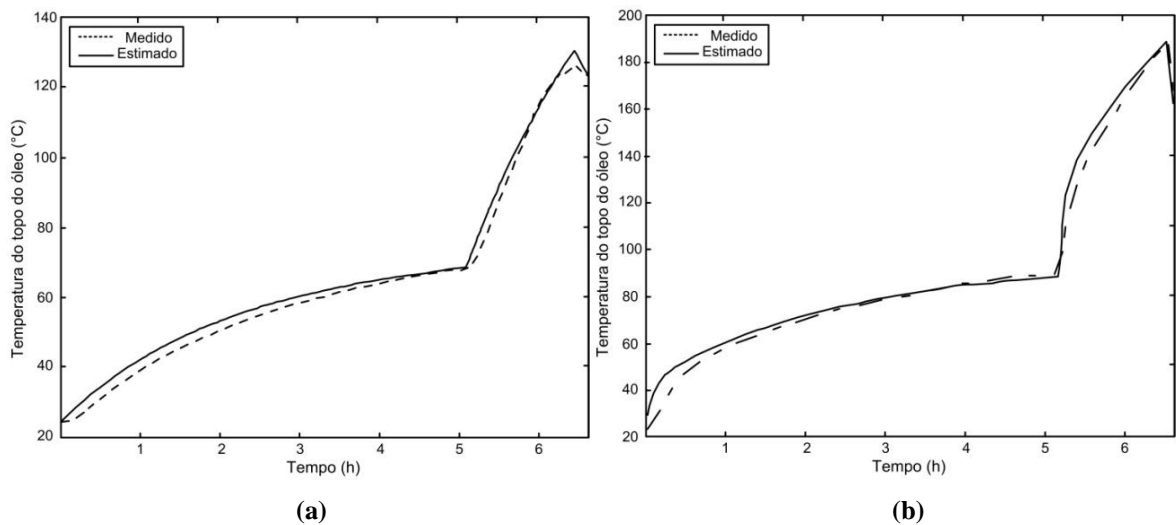


Figura 4.7 – Valores medidos e calculados para a temperatura do topo do óleo (a) e do ponto mais quente do transformador (b). Traduzida do trabalho de ELMOUDI (2008).

O autor do trabalho validou os resultados alcançados através da modelagem matemática comparando-se com os valores obtidos por meio da medição de temperatura em diversos pontos do transformador, utilizando-se um conjunto de 28 termopares.

No ramo da modelagem térmica de transformadores, MAMIZADEH e ISKENDER (2009) propuseram dois modelos para o cálculo da temperatura do topo do óleo em transformadores que operam abrigados ou no tempo. A Figura 4.8 apresenta o modelo simplificado desenvolvido pelos autores para a determinação da temperatura do topo do óleo.

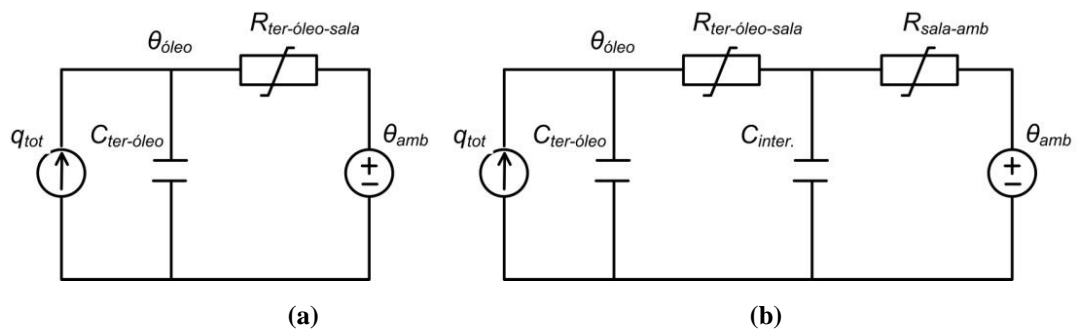


Figura 4.8 – Modelo utilizado para a predição da temperatura do topo do óleo. (a) Modelo para transformador no tempo; (b) Modelo para transformador abrigado. Traduzida do trabalho de MAMIZADEH e ISKENDER (2009).

Para confrontar os resultados obtidos teoricamente com os valores reais de aquecimento, foram realizados ensaios em dois transformadores de distribuição, cujos dados dos equipamentos podem ser visualizados através da Tabela 4.1. Utilizaram-se 2 termopares para a medição de temperatura do topo do óleo do transformador e mais 4 termopares para a medição da temperatura ambiente. Os termopares utilizados foram do tipo E, pois estes apresentam maior sensibilidade e não são afetados pela presença de campo magnético.

Tabela 4.1 – Valores nominais dos transformadores utilizados no experimento. Tabela adaptada de (MAMIZADEH e ISKENDER, 2009).

	Transformador 1 - Abrigado	Transformador 2 - Tempo
Potência Nominal [kVA]	1000	1600
Tensão Nominal [kV]	33000/400	30000/400
Conexão	Dyn11	Dyn11

A Figura 4.9 mostra o comportamento térmico dos transformadores 1 e 2 para os valores de temperatura mensurados pelos termopares e calculados por meio do modelo térmico desenvolvido pelos autores do trabalho.

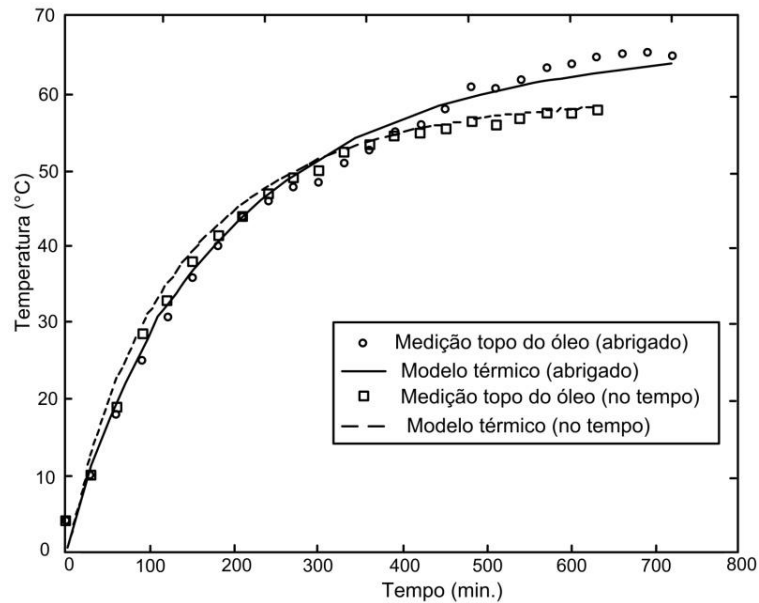


Figura 4.9 – Variação da temperatura para os transformadores 1 e 2 e valores de temperatura obtidos por meio da simulação. Traduzida do trabalho de MAMIZADEH e ISKENDER (2009).

Nota-se que o transformador 1 operou com maior temperatura em relação ao transformador 2. Tal resultado foi obtido tanto pela simulação térmica quanto pela leitura de temperatura. Observa-se também boa concordância entre os resultados de caráter prático com os adquiridos por meio da simulação.

Com o objetivo de investigar a distribuição de temperatura em transformadores a seco, PIERCE (1992b) realizou a medição de temperatura em diversos pontos de um transformador trifásico a seco de 2000 kVA, 4160/480 V, Dyn11, enrolamento de maior tensão constituído por 22 camadas com 8 espiras cada e enrolamento de menor tensão constituído por 11 lâminas de alumínio. Foram instalados ventiladores para avaliar o comportamento térmico do equipamento sob condições de ventilação forçada.

O transformador em questão foi construído com 300 termopares do tipo J alocados entre espiras do enrolamento de maior tensão e entre as camadas do enrolamento de menor tensão. Apenas a fase central do equipamento foi monitorada com os termopares, uma vez que era esperada que essa apresentasse maior solicitação térmica. Além da inserção dos sensores nos enrolamentos do transformador, utilizaram-se outros termopares para a medição de temperatura ambiente, na isolação e no núcleo do transformador.

Com o sistema montado, o autor do trabalho realizou diversos ensaios de elevação de temperatura para diferentes condições de carregamento, posição do *tap* e ventilação. Foram realizados os registros das medições de temperatura nos diversos pontos nos enrolamentos do equipamento. Alguns dos resultados obtidos podem ser observados pelas Figura 4.10 (a) e (b) e Figura 4.11.

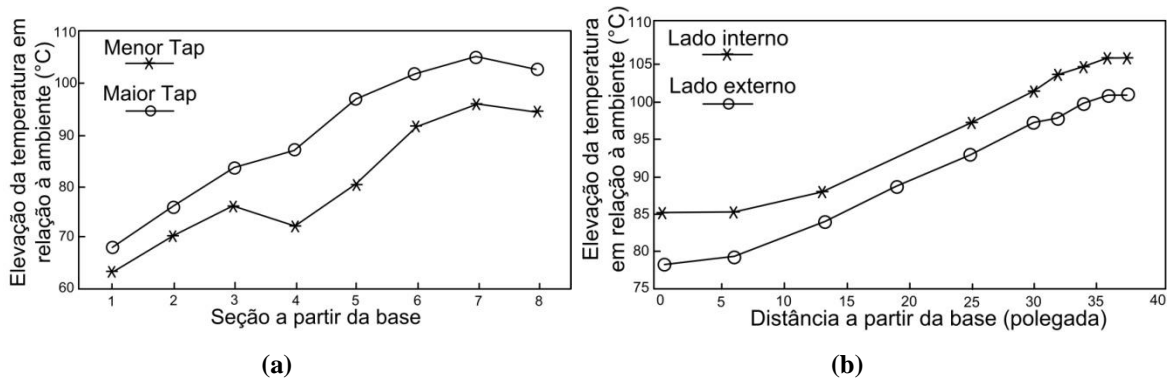


Figura 4.10 – (a) Comportamento térmico axial da bobina de maior tensão para diferentes condições de TAP utilizadas. (b) Comportamento axial da temperatura para bobina de menor tensão. Traduzida do trabalho de PIERCE (1992b).

A Figura 4.10 (a) apresenta a variação axial de temperatura da bobina de maior tensão para duas diferentes posições do *tap*. Nota-se um afundamento na curva de temperatura para o teste de menor *tap*. Isso ocorreu, pois não circulava corrente na espira 4 da bobina de maior tensão devido à posição do *tap*. A Figura 4.10 (b), exibe a distribuição axial de temperatura para a segunda camada do enrolamento de menor tensão.

Também foi possível levantar o perfil térmico radial da bobina de alta tensão sob duas condições: ventilação natural e forçada, conforme exibido pela Figura 4.11.

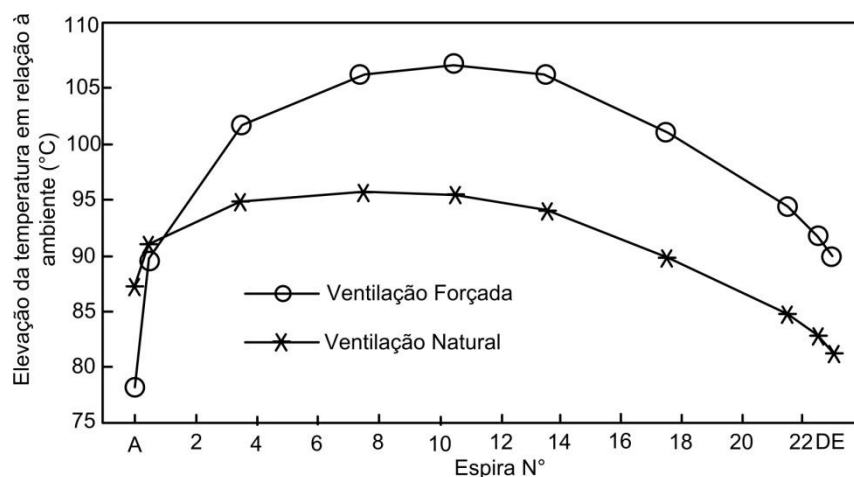


Figura 4.11 – Comportamento térmico radial da bobina de maior tensão para ventilação natural e forçada. Traduzida do trabalho de PIERCE (1992b).

Observa-se que o ponto de maior solicitação térmica para ventilação natural se encontrou entre as camadas 7 e 8. Já para a ventilação forçada, o ponto mais quente se encontrou entre as camadas 10 e 11. Vale ressaltar que as condições de carregamento para ambos os testes foram diferentes.

No ensaio de elevação de temperatura dos transformadores a seco, deve-se realizar a montagem em curto-circuito e posteriormente a vazio, pois as perdas no núcleo influenciam significativamente a temperatura da bobina de menor tensão. Segundo PIERCE (1992b), ocorreram 24 falhas na isolação da bobina de maior tensão quando a mesma foi submetida à tensão nominal. Esse fato sucedeu devido à presença dos termopares nos enrolamentos de maior tensão que causou problemas na isolação do equipamento. No entanto, os termopares não foram afetados.

Fundamentado nos registros dos valores de temperatura medida por meio de 300 termopares, o autor realizou considerações importantes sobre a distribuição de temperatura, localização do ponto mais quente, efeito da ventilação forçada em transformadores a seco. Os resultados das medições realizadas também foram confrontados com os modelos teóricos de cálculo de temperatura (IEEE e IEC) para esse tipo de configuração do equipamento.

Com o objetivo de avaliar o comportamento térmico de transformadores de distribuição, MALEEWAT et al. (2007) desenvolveram um protótipo (vide Figura 4.12 (a)) para calcular a temperatura do ponto mais quente de um transformador de 10 kVA, 380/220V, Dyn11. De forma simplificada, o protótipo utilizado estimava a temperatura do ponto mais quente do equipamento com base na leitura da temperatura do topo do óleo, mensurada por um termorresistor do tipo PT-100 (vide Figura 4.12 (b)). Para confrontar os resultados obtidos, realizou-se também a medição de temperatura por meio de termopares inseridos diretamente nos enrolamentos do transformador (vide Figura 4.12 (c)).

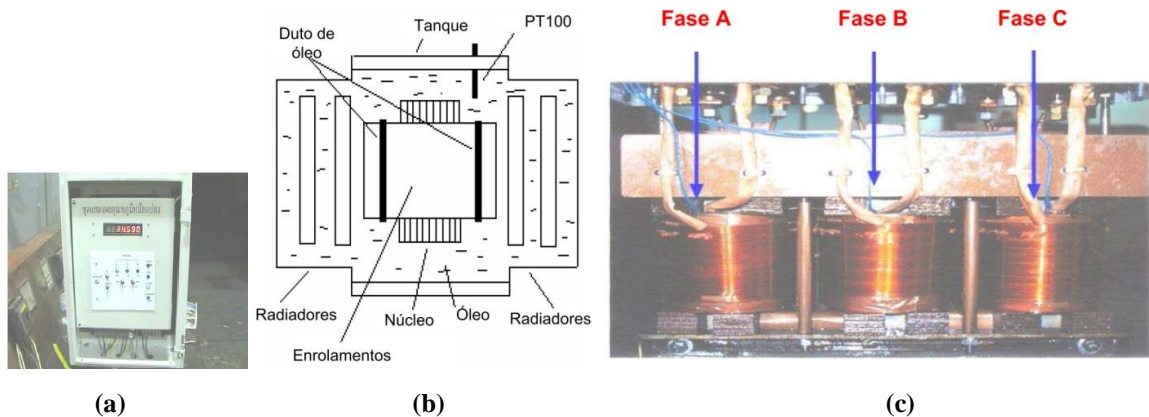


Figura 4.12 – (a) Protótipo desenvolvido; (b) Detalhe do termorresistor (PT-100); (c) Detalhe dos termopares. Traduzida do trabalho de MALEEWAT et al. (2007).

Um dos resultados obtidos por esse trabalho é apresentado na Figura 4.13, que exhibe a medição e o cálculo da temperatura do ponto mais quente do transformador para um carregamento de 1,7 pu durante três horas de medição. Nota-se que o protótipo apresentou resultados semelhantes aos mensurados pelos termopares.

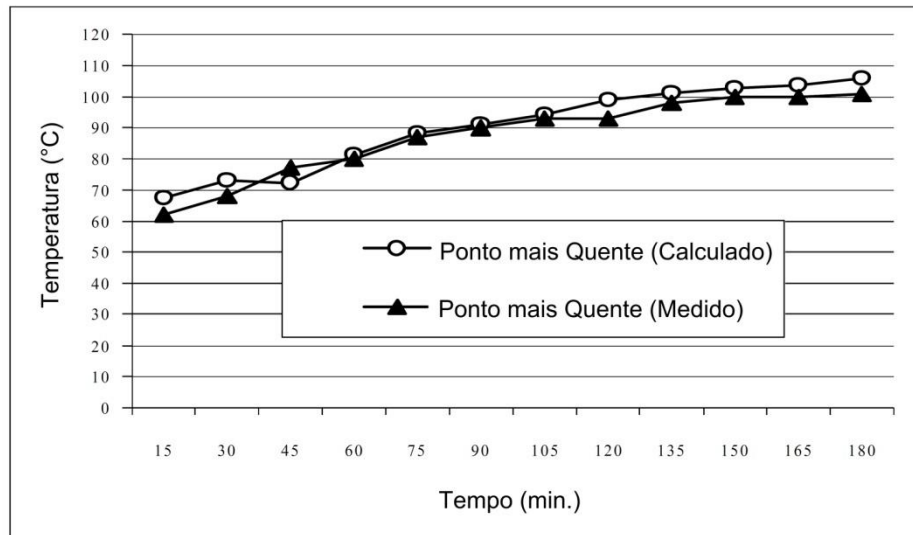


Figura 4.13 – Resultado da medição e da estimativa da temperatura do ponto mais quente do transformador com carregamento de 1,7 pu durante 3 horas. Traduzida do trabalho de MALLEWAT et al. (2007).

MALLEWAT et al. (2007) concluíram que o sistema desenvolvido, o qual possuía dados de entrada baseados na leitura do termorresistor, apresentou bons resultados, com discrepâncias de valores de temperatura aceitáveis em comparação com a medição direta nos enrolamentos do transformador pelos termopares.

LI et al. (2009) realizaram o cálculo e a medição do valor da temperatura do topo do óleo e do ponto mais quente de um transformador de distribuição. A estimativa da temperatura por meio de um modelo teórico foi embasada na norma chinesa GB/T15164-94. A parte experimental do trabalho foi realizada com base na medição de temperatura por meio da inserção de termopares nos enrolamentos de maior tensão de um transformador de 100 kVA, 5000/400 V.

Foram instalados quatro termopares, distribuídos axialmente na metade inferior do enrolamento de maior tensão, e vinte e seis termopares, situados ao longo de 1/3 da bobina, em sua parte superior. Também foram instalados quatro sensores de temperatura em fibras ópticas para o monitoramento térmico. Entretanto, os autores utilizaram apenas as medições dos termopares, uma vez que os resultados de ambos os sistemas de monitoramento

apresentaram boa concordância entre si. A Figura 4.14 mostra o enrolamento do transformador em questão com a instalação de termopares e sensores em fibras ópticas.

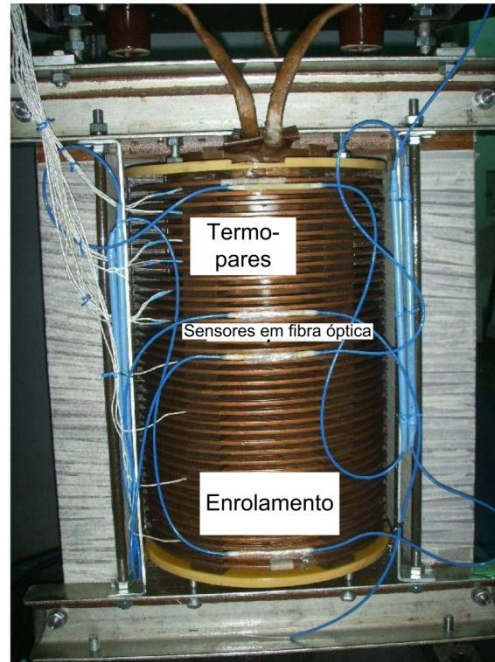


Figura 4.14 – Enrolamento do transformador com a instalação de termopares e sensores em fibra óptica. Traduzida do trabalho de LI et al. (2009).

Realizaram-se ensaios de elevação de temperatura no transformador em questão com diferentes carregamentos. Os resultados obtidos para o sistema podem ser observados por meio da Figura 4.15, onde são apresentados os resultados de medição e cálculo da temperatura do topo do óleo e do ponto mais quente do transformador.

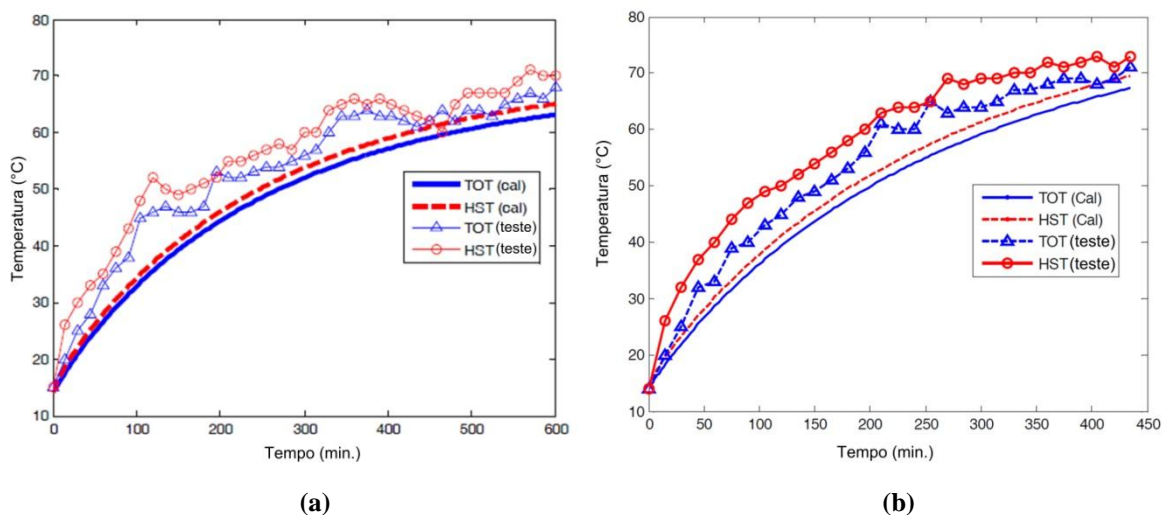


Figura 4.15 – Variação da temperatura do topo do óleo (TOT) e do ponto mais quente do equipamento (HST) para valores calculados (cal) e medidor experimentalmente (test). (a) Carregamento de 1 pu e (b) carregamento de 1,1 pu. Traduzida do trabalho de LI et al. (2009).

Com base nas medições de temperatura realizadas por 30 termopares, os autores do trabalho puderam comparar os dados reais de aquecimento do transformador com os obtidos pela norma GB/T15164-94. Encontrou-se uma diferença de $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre a temperatura medida por tais sensores e a estimada pelo modelo térmico, sendo que esse subestimou a temperatura do ponto mais quente do equipamento.

Com a finalidade de desenvolver um equipamento para realização de ensaios de carregamento de transformadores, o trabalho de SOUSA (2011) apresentou os aspectos construtivos de uma bancada regenerativa de testes que permite ensaios de carga com potência nominal em torno de 200 kVA .

A bancada foi equipada com medidores das seguintes grandezas elétricas: tensão e corrente. Além de tais grandezas, as temperaturas do transformador da bancada e do equipamento sob teste também foram mensuradas por meio da inserção de 9 termorresistores, do tipo PT-100, instalados nas bobinas do transformador e no topo do óleo. Dois termômetros foram alocados na metade e na superfície da bobina de menor tensão da fase central do transformador, outros seis foram instalados a $2/3$ dos enrolamentos do transformador e o último termorresistor foi inserido no topo do óleo. Segundo SOUSA (2011), a disposição dos termômetros foi escolhida de forma a estimar a temperatura do ponto mais quente do equipamento.

Alguns dos resultados obtidos para a elevação da temperatura do transformador podem ser visualizados por meio da Figura 4.16 (a) e (b) que apresentam a medição de elevação de temperatura, sob carregamento nominal, durante 6 h de ensaio e a extrapolação dos valores térmicos para a obtenção das constantes térmicas do transformador.

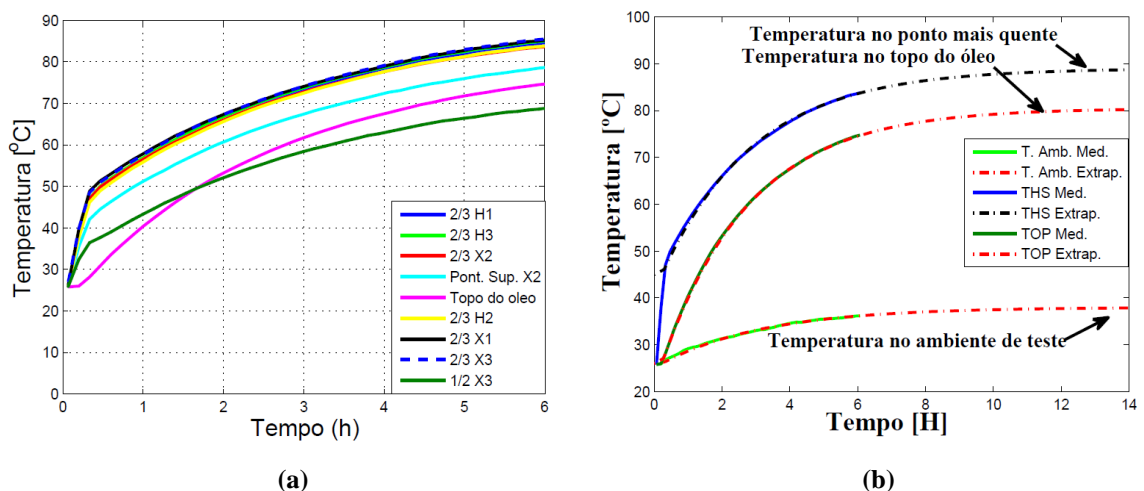
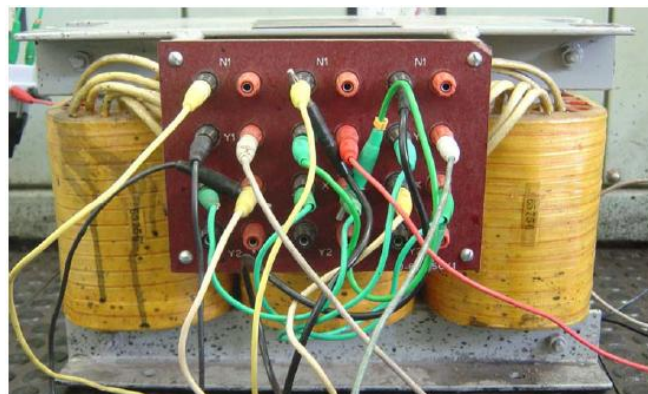


Figura 4.16 – Ensaio com carregamento nominal do transformador. (a) Medição da elevação de temperatura; (b) Extrapolação dos valores térmicos (SOUSA, 2011).

Outros resultados de medição de temperatura foram obtidos, por meio do sistema constituído por 9 termorresistores, para diferentes condições de carregamento do equipamento. Os valores alcançados mostraram o comportamento térmico de diferentes pontos do transformador para diferentes condições de carga bem como permitiram localizar o ponto de maior solicitação térmica de acordo com a configuração adotada no sistema.

Com o objetivo de avaliar o comportamento térmico de um transformador de distribuição frente ao suprimento de cargas não-lineares, PARENTONI (2010) realizou ensaios experimentais em um transformador a seco de 2 kVA, 180/220 V. Para a realização das medições de temperatura, foram adotadas duas condições de carregamento do sistema, a saber: carga linear e não-linear.

Para monitorar a temperatura do transformador, foi inserido, em um dos canais de ventilação, um termopar em contato com os enrolamentos de maior tensão do equipamento. A Figura 4.17 exibe o transformador sob ensaio bem como o local da instalação do termopar para a medição da temperatura.



(a)



(b)

Figura 4.17 – (a) Transformador sob teste; (b) Detalhe da inserção de um termopar no enrolamento de maior tensão do equipamento (PARENTONI, 2010).

Com o sistema montado, PARENTONI (2010) realizou o registro da temperatura ao longo de 55 min de ensaio para as duas condições de carregamento. Um dos resultados do monitoramento térmico pode ser observado por meio da Figura 4.18.

Através da análise dos resultados obtidos estritamente por meio da medição térmica utilizando-se o termopar, o autor pôde concluir sobre o aquecimento térmico do transformador frente à situação de linearidade e não-linearidade da carga.

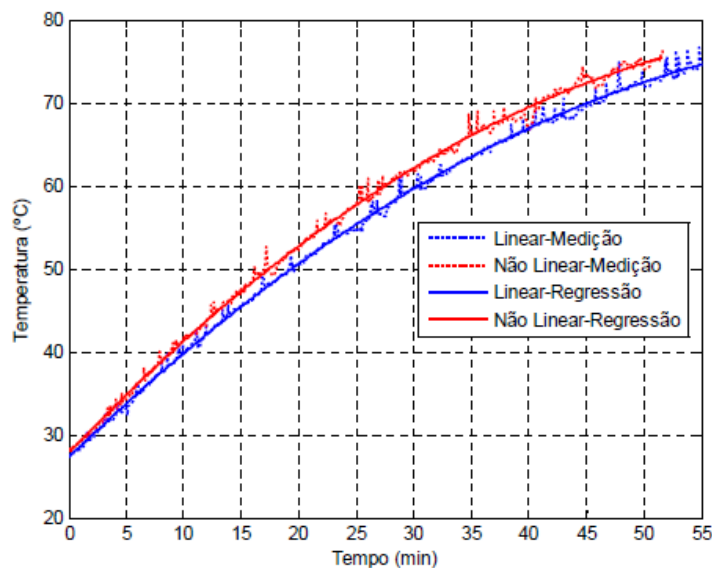


Figura 4.18 – Curvas de elevação de temperatura para carga linear e não-linear (PARENTONI, 2010).

4.3 Sistemas Baseados no Decaiemento Fluorescente para Medição de Temperatura

4.3.1 Considerações Preliminares

As técnicas de sensoriamento térmico baseadas no decaimento fluorescente são aplicadas em transformadores. Quase trinta anos se passaram desde a instalação dos primeiros sensores desse tipo em transformadores de potência. Durante esse período, observou-se uma evolução considerável nos sistemas de monitoramento térmico baseados no decaimento fluorescente. Os sistemas dedicados a medição de temperatura diretamente nos enrolamentos do transformador foram beneficiados com o progresso dessa tecnologia. Pode-se citar algumas implementações importantes que ocorreram ao longo desses anos como aumento do número de canais dos interrogadores, sistema de medição imune a

calibrações, melhoria dos cabos ópticos utilizados, melhorias dos conectores alocados no tanque do transformador, melhoramentos das técnicas de instalação dos sensores junto às bobinas do equipamento entre outras.

Os sistemas de monitoramento baseados no decaimento fluorescente apresentam particularidades que devem ser consideradas para a escolha da técnica que melhor atenda as condições de medição de temperatura no transformador. Alguns desses aspectos relativos à configuração do sistema de monitoramento por meio do decaimento fluorescente podem ser visualizados por meio da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Características gerais dos sistemas baseados no decaimento fluorescente.

	Decaimento Fluorescente
Tipo de Fibra	Monomodo
Sensores por Fibra	Apenas um sensor ²
Alcance	Centenas de metros ³
Multiplexação	Não ^{4,5}
Calibração	Imune
Sensibilidade Cruzada	Imune

4.3.2 Aplicações em Transformadores

A primeira aplicação dos sensores baseados no decaimento fluorescente para o monitoramento térmico de transformadores foi apresentada por MCNUTT et al. (1984). Nesse trabalho, os autores empregaram oito sensores pontuais instalados em diversos locais de um autotransformador trifásico de 246 MVA, 230/69 kV.

Os termômetros desenvolvidos apresentaram diâmetros de 0,4 mm e comprimento de 0,13 mm, adequando-se, quanto ao tamanho, à aplicação em transformadores. Foi utilizado um material fosforescente para compor o sensor, de modo que quando o mesmo era excitado por um pulso de luz na faixa ultravioleta (UV), um sinal fluorescente era

² Os modelos comerciais desse sistema operam com a utilização de apenas um sensor por fibra utilizando-se a configuração topo.

³ De acordo com (NORTON et al., 1987), medições de temperatura, por meio de sensores baseados no decaimento fluorescente, foram realizadas com cabos ópticos de até 300 metros de comprimento sem apresentar qualquer problema.

⁴ Pelo fato de se utilizar divisores de feixe óptico para medição em diversos canais, não há a necessidade de multiplexação do domínio do tempo, pois as medições são realizadas simultaneamente.

⁵ Embora citado que os sistemas baseados no decaimento fluorescente não trabalhem com multiplexadores, (YIN et al., 2008) ressalta que se utilizada a configuração campo evanescente com dopagem ao longo do comprimento da fibra óptica, pode-se trabalhar com a multiplexação temporal dos sensores. Nesse caso, o autor cita que o sistema pode efetuar medições *quasi*-distribuídas.

gerado. Embora a excitação ocorresse na faixa UV, o comprimento de onda do sinal fluorescente gerado se situava na faixa visível da luz, sendo sua intensidade dependente da temperatura do meio.

Para transmitir a irradiação UV da fonte até o sensor, dois tipos de fibras ópticas foram testados no ambiente do transformador, a saber: núcleo composto por sílica e a casca composta por plástico (*PCS – Plastic-Clad Silica*) e ambos, núcleo e casca, compostos por sílica.

Primeiramente, trabalhou-se com a fibra PCS imersa em óleo aquecido por aproximadamente 100 h de operação. O guia do feixe luminoso não apresentou perdas consideráveis na transmissão dos raios UV. No entanto, MCNUTT et al. (1984) advertiram que para um longo tempo de exposição da fibra PCS em óleo, ocorre à penetração lenta do fluido na casca da fibra, fazendo com que haja mudanças gradativas nas características de transmissão. Para as fibras ópticas compostas somente por sílica, uma pequena perda no sinal foi observada. No entanto, os valores mensurados foram negligenciados, pois não afetaram o sistema de medição.

Também foram realizados ensaios de tensão aplicada e de impulso para o conjunto de sensores, fibras e tubos de Nylon, que foram utilizados para melhor abrigar os sensores. Segundo os autores do trabalho, os resultados desses ensaios mostraram compatibilidade do conjunto frente às condições elétricas do ambiente de operação.

Dois modos de inserção dos sensores foram realizados. Primeiramente, instalaram-se os sensores diretamente nas bobinas do transformador. Outra forma de instalação utilizada pelos autores foi por meio da inserção de tubos de Nylon entre as espiras do equipamento, onde o sensor propriamente dito foi alocado dentro desse tubo. Ambas as formas de instalação suportaram mecanicamente o ambiente de operação do sistema.

Realizado os ensaios preliminares supracitados, os autores do trabalho partiram para a instalação dos sensores, propriamente ditos, no transformador. Três sensores baseados no decaimento fluorescente foram instalados nos enrolamentos das fases A, B e C do autotransformador. O quarto sensor foi instalado em um canal de óleo do equipamento. Esses quatro sensores foram inseridos em tubos de Nylon. O quinto sensor foi instalado diretamente em outro canal de óleo do transformador, ou seja, não se utilizou o tubo de Nylon para esse sensor. O restante dos sensores foi instalado no topo do óleo, em um dos tirantes do topo do núcleo e no conector de um dos enrolamentos comum do autotransformador. A Figura 4.19 exhibe o esquemático para o monitoramento térmico do

equipamento. Pode-se observar, por meio dessa, a posição dos sensores baseados no decaimento fluorescente nas partes constituintes do transformador.

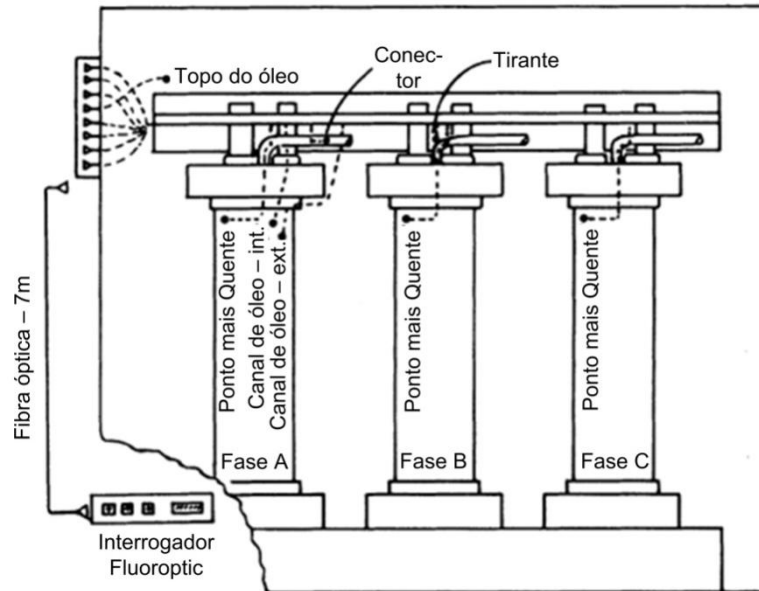


Figura 4.19 – Esquemático da medição de temperatura utilizado. Traduzida do trabalho de MCNUTT et al. (1984).

A Figura 4.20 exibe um resumo do comportamento térmico do autotransformador para diferentes condições de carregamento.

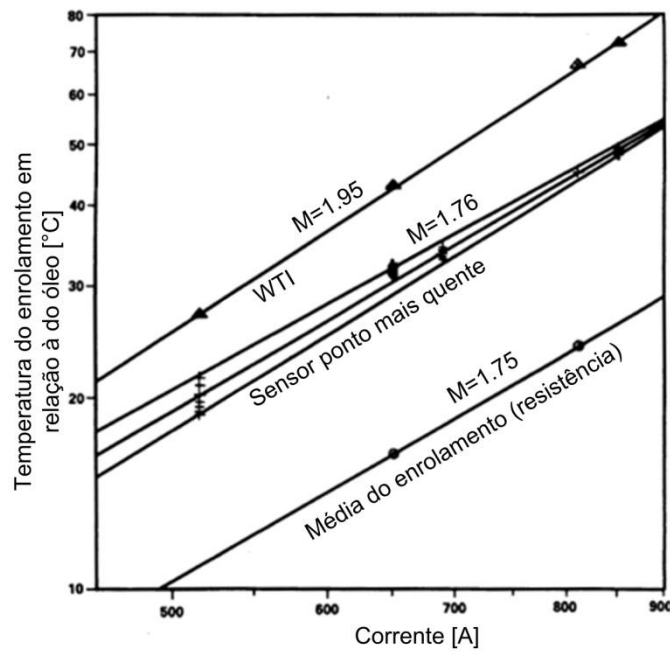


Figura 4.20 – Sumário do comportamento térmico para diferentes valores de corrente do enrolamento. Traduzida do trabalho de MCNUTT et al. (1984).

Para efeito de comparação dos resultados obtidos pelo sistema de medição desenvolvido, instalaram-se termopares para o registro da temperatura do fundo e do topo do óleo do transformador. Também, realizou-se a medição da resistência dos enrolamentos do transformador para determinar o valor médio da temperatura do equipamento. Por fim, utilizando-se um determinado software baseado em elementos finitos, calculou-se a temperatura do ponto mais quente do enrolamento com base nos parâmetros construtivos do transformador.

Nota-se, por meio da Figura 4.20, que a inclinação da curva baseada na medição direta da temperatura do enrolamento do transformador (*Sensor ponto mais quente*) é, praticamente, a mesma apresentada pela curva baseada na medição da resistência do enrolamento (*Média do enrolamento*). No entanto, comparando-se ambas as curvas com a obtida pela técnica de cálculo da temperatura do ponto mais quente com base em elementos finitos (*WTI*), uma diferença entre as inclinações das retas foi detectada. MCNUTT et al. (1984) atribuem essa diferença de inclinação entre as retas supracitadas devido ao modelo WTI trabalhar apenas em uma dimensão, considerando-se a troca de calor na direção radial do equipamento. De fato, a transferência de calor deve ser modelada como um problema tridimensional. Como a troca de calor no sentido axial não foi considerada no modelo matemático, a elevação de temperatura calculada pelo software apresentou maior inclinação.

Os autores desse trabalho concluíram que as leituras de temperatura dos sensores baseados no decaimento fluorescente apresentaram boa correlação com os valores medidos pelo termopar. Também relataram sobre a necessidade de melhoramento do sistema de aquisição de dados, principalmente com relação à estabilidade e ao aumento do número de canais do instrumento, pois o instrumento utilizado apresentava apenas 1 canal de leitura de temperatura, sendo que, para os testes realizados, fazia-se a conexão e desconexão dos sensores ao interrogador, fato que gerou erros aleatórios na medição de temperatura.

NORTON et al. (1987) exibiram algumas melhorias no sistema de medição de temperatura em transformadores baseados no decaimento fluorescente. Um dos principais avanços apresentados pelos autores foi com relação ao aumento do número de canais do sistema de interrogação utilizado para a leitura de temperatura. Assim, foi desenvolvido um medidor de quatro canais de forma a coletar os dados dos sensores instalados nos enrolamentos das três fases do transformador bem como no topo do óleo do equipamento. A Figura 4.21 exhibe o ponto de instalação dos quatro sensores no transformador.

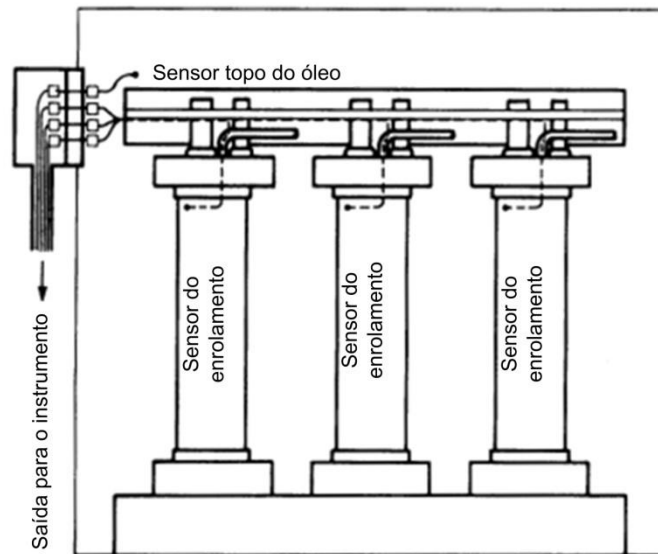


Figura 4.21 – Esquemático da instalação dos sensores no transformador. Traduzida do trabalho de NORTON et al. (1987).

Os autores do trabalho também relataram sobre o desenvolvimento dos chamados penetradores que realizam a transposição das fibras ópticas internas ao transformador para o meio externo. A Figura 4.22 exibe o esquemático desses dispositivos.

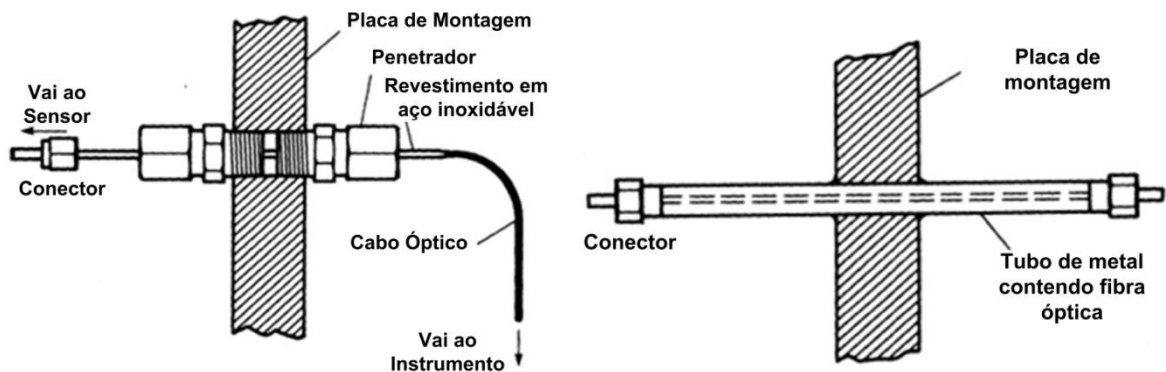


Figura 4.22 – Penetradores desenvolvidos para conectar internamente ao interrogador. Traduzida do trabalho de NORTON et al. (1987).

Esse trabalho também adotou uma nova metodologia para a medição da temperatura baseada na medição do tempo de decaimento fluorescente e não mais na intensidade do sinal. Esse também foi um fator importante, pois, desse modo, o sistema de medição se torna independente de variações da intensidade do sinal óptico, perdas no sistema de transmissão e calibrações.

Outros melhoramentos que podem ser citados foram com relação à instalação dos sensores e dos conectores ópticos. Observaram-se certos problemas com os sensores instalados em tubos de Nylon devido ao deslocamento do sensor dentro da cavidade, aumentando-se a resistência térmica de contato com o local de interesse de medição. Para esquivar desse problema, os autores do trabalho utilizaram camadas para a proteção do sensor e da fibra compostas de Teflon e Kevlar, provendo a manutenção da integridade da região sensora e do guia óptico.

NORTON et al. (1987) mostraram o resultado do melhoramento de alguns dos problemas encontrados na primeira instalação dos sensores baseados no decaimento fluorescente para a medição de temperatura. As soluções propostas por esse trabalho foram implementadas comercialmente e instaladas em transformadores para a realização do monitoramento térmico.

LUNDQUIST e KNUTH (2008) realizaram um levantamento de informações sobre vários transformadores em operação que utilizam os sensores baseados no decaimento fluorescente para a medição de temperatura. De maneira bastante simplificada, a Figura 4.23 apresenta o esquemático do sistema de monitoramento térmico baseado no decaimento fluorescente. Fundamentalmente, o sistema opera com a injeção de um pulso de luz no guia óptico que propaga até atingir o sensor. Uma vez estimulado, o sensor emite um sinal luminoso que retorna pela fibra óptica até chegar a um conversor óptico/eletrônico. Com base na análise do tempo de decaimento do feixe emitido pelo sensor, pode-se estimar a temperatura do ponto de instalação do termômetro.

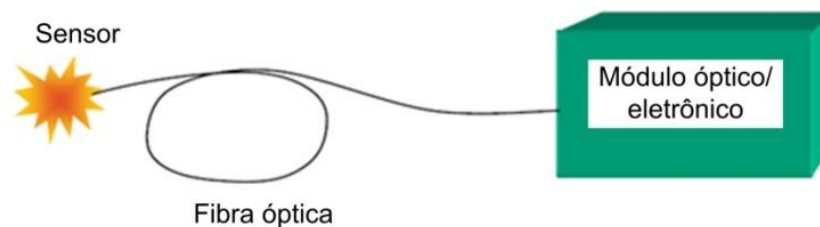


Figura 4.23 – Esquemático simplificado do sistema de medição baseado no decaimento fluorescente. Traduzida do trabalho de LUNDQUIST e KNUTH (2008).

A Figura 4.24 exibe o espectro luminoso do pulso de luz de excitação e a emissão do feixe luminoso pela região sensora.

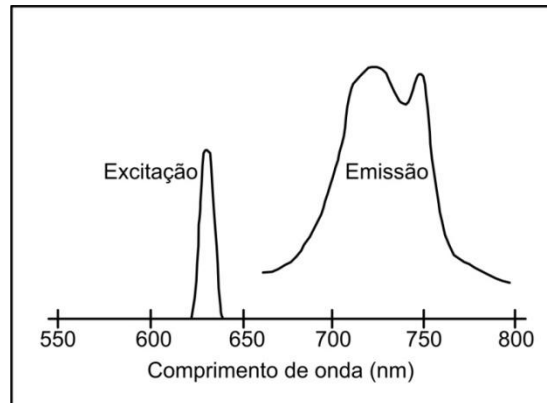


Figura 4.24 – Pulso de excitação e emissão de luz pelo sensor fluorescente. Traduzida do trabalho de LUNDQUIST e KNUTH (2008).

Com a utilização do sistema e dos sensores baseados no decaimento fluorescente, os autores do trabalho relataram sobre diversos casos de aplicação dessa técnica para a medição e registro da temperatura em transformadores. O monitoramento térmico de um autotransformador de 187 MVA, 230/69 kV foi realizado por meio da instalação de um sensor alocado em um dos enrolamentos do transformador, em contato direto com o condutor da bobina. Também foram instalados sensores baseados no decaimento fluorescente em dois autotransformadores trifásicos de 600 MVA, 525/230 kV, utilizando-se um novo sistema de conversão óptico/eletrônico capaz de interrogar quatro a dezesseis canais. Esse mesmo sistema de interrogação foi usado igualmente para transformadores de 69/12 kV para o monitoramento térmico em tempo real. Além desses exemplos relatados, os autores do trabalho também citam outros casos de aplicação dessa tecnologia para o monitoramento térmico de transformadores.

Através do aprendizado adquirido durante o comissionamento da instalação do sistema baseado no decaimento fluorescente, os autores do trabalho advertiram para alguns tópicos importantes e que devem ser levados em conta no projeto do monitoramento térmico de transformadores. Pode-se citar, por exemplo, instalação no mínimo 100% redundante dos sensores, utilização de conectores ópticos apropriados instalados no tanque do transformador de forma a garantir estanqueidade total do sistema e fibras ópticas contendo camadas protetoras para assegurar a rigidez mecânica do guia óptico.

Alguns gráficos que exibem o comportamento térmico de transformadores em operação foram relatados no trabalho. Dessa forma, a Figura 4.25 exhibe o registro de temperatura no instante de aumento de carga de um transformador em operação de 600 MVA. Nota-se a resposta térmica de alguns pontos de monitoramento do equipamento,

onde o ponto de maior solicitação térmica atingiu praticamente 100 °C durante a elevação do carregamento.

Por fim, os autores do trabalho concluíram que o monitoramento térmico do transformador através do decaimento fluorescente permite otimizações da operação do transformador bem como prove informações de extrema importância para a proteção, controle e monitoramento do equipamento.

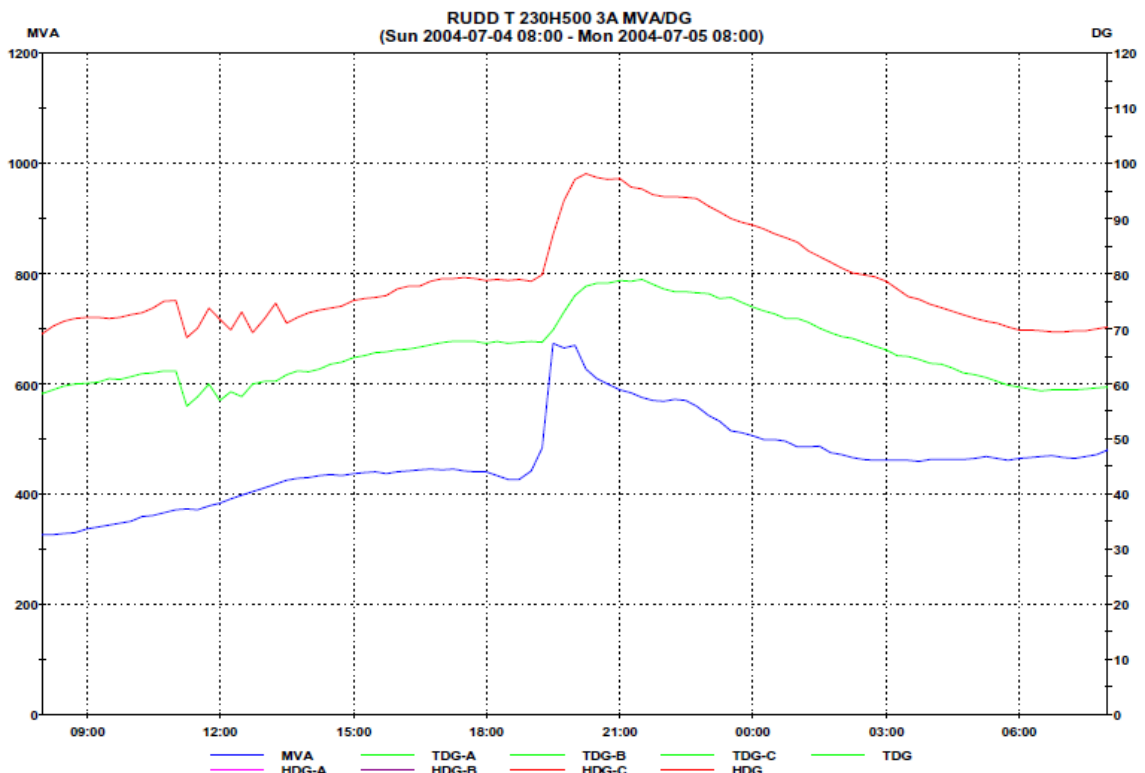


Figura 4.25 – Comportamento térmico com relação ao aumento de carga em um transformador de 600 MVA. Medição de temperatura via decaimento fluorescente. Traduzida do trabalho de LUNDQUIST e KNUTH (2008).

4.4 Sistemas Baseados em Redes de Bragg para Medição de Temperatura

4.4.1 Considerações Preliminares

Os sistemas baseados nos sensores FBG vêm sendo empregados no monitoramento térmico de transformadores. A configuração utilizada nesse tipo de equipamento elétrico pode ser bem distinta. Há casos de aplicação onde apenas um sensor FBG foi inscrito em um dos terminais da fibra e o sensoriamento térmico do transformador foi realizado

inserindo-se diversas fibras no equipamento. Em contrapartida, existem outros casos onde diversos sensores foram inseridos em uma mesma fibra instalada nos enrolamentos do transformador. A adoção da configuração a ser utilizada deve abranger aspectos como número de canais do interrogador, tipo de multiplexação, confiabilidade requerida para o sistema entre outros fatores.

Devido às várias disponibilidades de configurações dos sistemas de monitoramento térmico baseados nos sensores FBG, faz-se necessário destacar alguns aspectos gerais relativos a esse tipo de sistema, conforme exibidos pela Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Características gerais dos sistemas baseados em redes de Bragg.

	Sensores FBG
Tipo de Fibra	Monomodo
Sensores por Fibra	Dezenas de sensores
Alcance	Dezenas de quilômetros
Multiplexação	Sim ⁶
Calibração	Imune
Sensibilidade Cruzada	Não imune ⁷

4.4.2 Aplicações em Transformadores

A medição de temperatura em transformadores por meio de sensores convencionais como, por exemplo, o sensor PT100, é realizada através da inserção do termômetro em áreas de menor densidade de campo eletromagnético – radiadores, dutos de óleo, topo do óleo entre outros – conforme destaca o trabalho de TEUNISSEN et al. (2001). Nesse caso, a temperatura do ponto mais quente do transformador é estimada tomando-se como base a leitura do termômetro agregada à modelagem térmica do equipamento. Contudo, a localização e a medição da temperatura do ponto mais quente do transformador podem ser alcançadas devido às técnicas de sensoriamento baseadas em fibras ópticas, pois esses elementos podem ser instalados na parte ativa do equipamento.

Utilizando-se de uma das técnicas de sensoriamento baseada em FO, especificamente as redes de Bragg, os autores do trabalho realizam experimentos de forma a

⁶ A multiplexação pode ser realizada no domínio do tempo e/ou comprimento de onda. Tal fato permite um aumento considerável do número de sensores, podendo alcançar um sistema *quasi*-distribuído de medição térmica.

⁷ A variação do comprimento de onda de Bragg depende de dois fatores: temperatura e deformação mecânica. Sendo assim, pode-se ocorrer a sensibilidade cruzada na leitura de temperatura.

levantar a possibilidade de aplicação dessa metodologia para a medição térmica em transformadores. Trabalhando-se com a possibilidade de inserção de diversos sensores em uma única fibra óptica, foram realizados ensaios em um sistema contendo três sensores FBG em um guia luminoso de forma a se obter uma melhor relação custo-benefício para o sistema. A Figura 4.26 mostra o arranjo experimental utilizado para averiguação do sistema baseado em redes de Bragg.

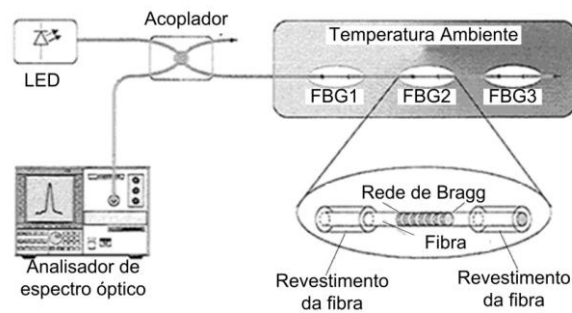


Figura 4.26 – Esquemático dos ensaios experimentais para medição de temperatura por meio de sensores FBG. Traduzida do trabalho de TEUNISSEN et al. (2001).

Os sensores foram submetidos à variação térmica entre -20°C a 150°C , que é suficiente para a aplicação em transformadores. A Figura 4.27 exhibe os resultados obtidos do experimento. Observa-se um comportamento linear dos sensores FBG em relação à variação do comprimento de onda com a temperatura. Outro fato importante que pode ser constatado por meio da Figura 4.27 é com relação à distinção, no comprimento de onda, da faixa de operação dos sensores. Ressalta-se que, como cada elemento se encontra centrado em um comprimento de onda específico, não há sobreposição dos sinais provindos dos sensores e os mesmos podem ser facilmente distinguidos entre si.

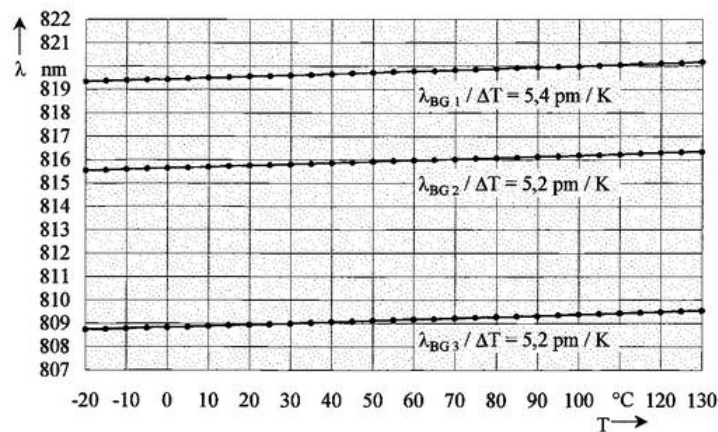


Figura 4.27 – Aspectos da sensibilidade e da linearidade dos três sensores FBG inscritos no guia óptico. Traduzida do trabalho de TEUNISSEN et al. (2001).

TEUNISSEN et al. (2001) concluíram que os sistemas de medição de temperatura baseados nos sensores FBG apresentaram boas características de operação para a faixa de variação térmica dos transformadores. Outra vantagem intrínseca dos sensores baseados em redes de Bragg é com relação à possibilidade de inscrição de mais de um sensor em uma mesma fibra óptica, tornando a relação custo-benefício por sensor mais promissora.

A informação precisa da localização e do valor da temperatura do ponto mais quente do transformador é importante para o diagnóstico de possíveis falhas do equipamento bem como para seu cálculo da vida útil. Objetivando localizar e medir a temperatura do ponto mais quente de um transformador de potência, o trabalho de KIM et al. (2008) utilizou diversos sensores FBG e termopares, primeiramente instalados em um transformador de distribuição monofásico de 20 kVA. Esse sistema foi utilizado como protótipo para avaliar o comportamento das redes de Bragg no ambiente interno do transformador.

Em uma fibra óptica monomodo, foram inscritos quatro sensores centrados em diferentes comprimentos de onda e distribuídos ao longo do comprimento do guia óptico. A fibra óptica contendo os sensores FBG foi instalada junto aos enrolamentos do transformador. Paralelamente, foram instalados quatro termopares em pontos adjacentes aos correspondentes locais das grades de Bragg. Assim, realizou-se o ensaio de elevação de temperatura do transformador de distribuição e coletaram-se os dados sobre o comportamento térmico do equipamento.

A Figura 4.28 traz o registro da temperatura por meio de um dos sensores FBG e seu respectivo termopar. O autor concluiu que os sensores FBG apresentaram menor nível de ruído do sinal em relação ao do termopar. Também foi relatado que o sensor baseado nas redes de Bragg apresentou em comparação ao termopar, maior estabilidade na leitura de temperatura frente aos transitórios elétricos.

Confirmado o bom desempenho dos sensores FBG em transformadores, os autores do trabalho instalaram dez desses sensores em um transformador de 3 MVA. Novamente, apenas uma fibra óptica monomodo foi utilizada para a inscrição dos sensores. Por meio da Figura 4.29 (a), é possível visualizar o esquemático do sistema de medição de temperatura utilizado.

Com o sistema de medição instalado, realizou-se o monitoramento térmico do equipamento durante dois meses de operação. O gráfico mostrado na Figura 4.29 (b) apresenta o comportamento térmico para um dos sensores instalados no transformador durante o período de análise. O autor atribui o comportamento térmico pouco variante em

função do consumo estável de energia e do comportamento da temperatura ambiente do local de instalação do transformador.

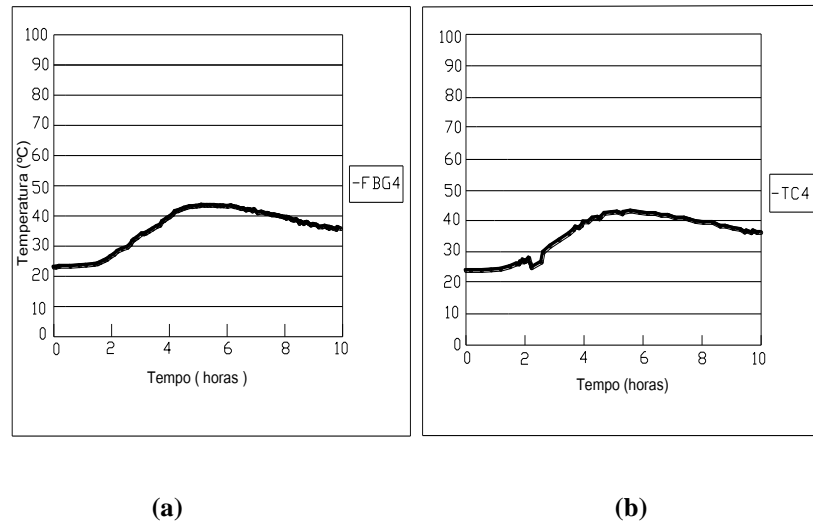


Figura 4.28 – Medição da temperatura em um mesmo ponto (a) por meio de um sensor FBG e (b) através de um termopar. Traduzida do trabalho de KIM et al. (2008).

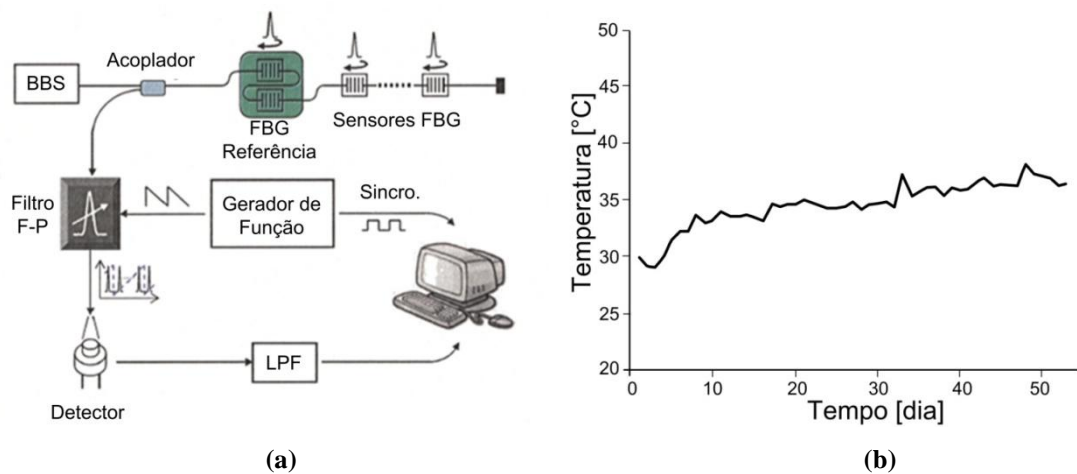


Figura 4.29 – (a) Esquemático do sistema de sensoriamento térmico via FBG; (b) Variação da temperatura em um dos sensores instalados no transformador de 3 MVA. Traduzida do trabalho de KIM et al. (2008).

No ramo de monitoramento de temperatura em transformadores, RIBEIRO et al. (2008) apresentaram um sistema de medição de temperatura diretamente aos enrolamentos, papel isolante, núcleo, dutos de óleo e no próprio óleo isolante de um transformador trifásico de 20 MVA. O total de 12 sensores FBG foi inserido no equipamento sob análise para o registro e mapeamento dos pontos onde ocorrem as maiores solicitações térmicas. Os sensores FBG foram todos inscritos no comprimento de Bragg de 1550 nm. Todo o sistema de sensores operou utilizando-se um multiplexador de 12 canais. A Figura 4.30 (a) e (b)

exibem o esquemático de medição de temperatura utilizado no sistema e a fotografia do sistema durante os ensaios de aquecimento.

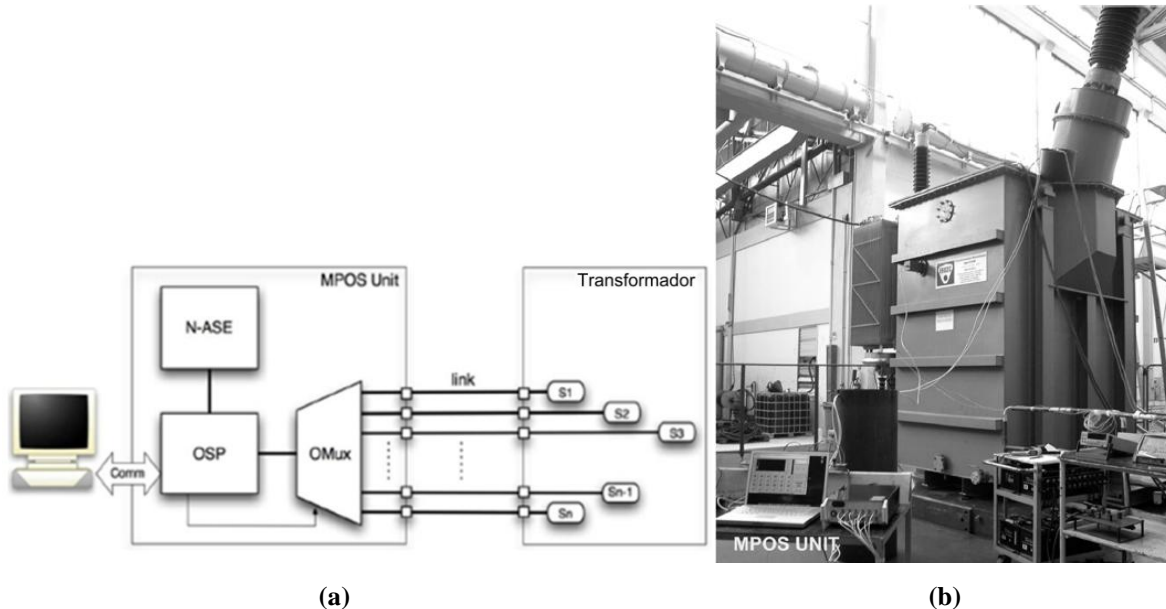


Figura 4.30 – (a) Esquemático do sistema de monitoramento utilizado. (N-ASE: fonte de luz do sistema; OSP: Processador do sinal óptico; OMux: Multiplexador; Sn: Sensores FBG); (b) Foto do transformador de 20 MVA durante ensaio de elevação de temperatura com sistema de leitura integrado. Traduzida do trabalho de RIBEIRO et al. (2008).

Os resultados do monitoramento térmico obtido por esse sistema podem ser visualizados por meio da Figura 4.31, onde são apresentadas 12 curvas representando o comportamento térmico desses pontos do transformador.

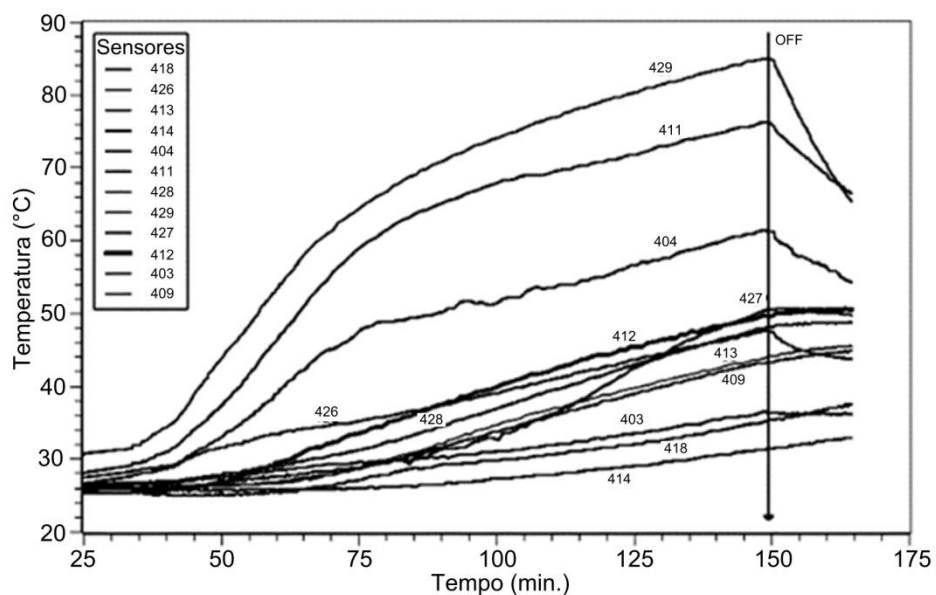


Figura 4.31 – Medição de temperatura obtida através da instalação dos diversos sensores no transformador de 20 MVA. Traduzida do trabalho de RIBEIRO et al. (2008).

Os sensores FBG utilizados nesse sistema operaram com resolução de temperatura de $0,1^{\circ}\text{C}$, com exatidão de 1°C , podendo operar entre -50°C a 250°C . Segundo RIBEIRO et al. (2008), o sistema apresenta desempenho satisfatório para trabalhar no ramo de monitoramento de temperatura em transformadores.

Objetivando desenvolver um sistema para monitorar a temperatura dos enrolamentos do transformador, WEI-GEN et al. (2008) construíram e instalaram quatro sensores FBG nas bobinas de um transformador de 100 kVA , $5000/400\text{ V}$. O esquemático do sistema de monitoramento utilizado é exibido na Figura 4.32. Para fins de comparação, também foram alocados quatro termopares nos mesmos pontos de instalação das redes de Bragg.

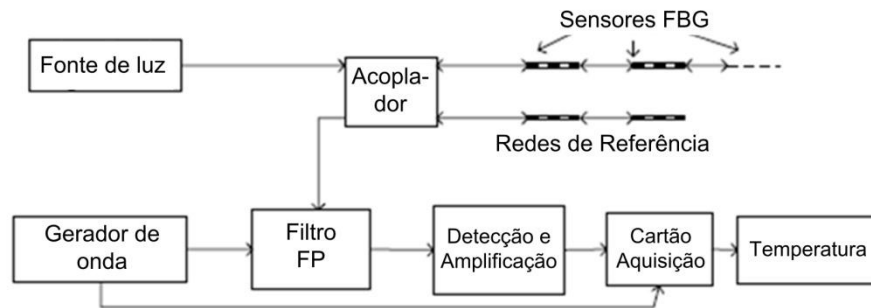


Figura 4.32 – Esquemático do sistema de medição de temperatura utilizado para o monitoramento térmico do transformador. Traduzida do trabalho de WEI-GEN et al. (2008).

A Figura 4.33 mostra os resultados da medição de temperatura por meio de um dos sensores FBG e respectivo termopar.

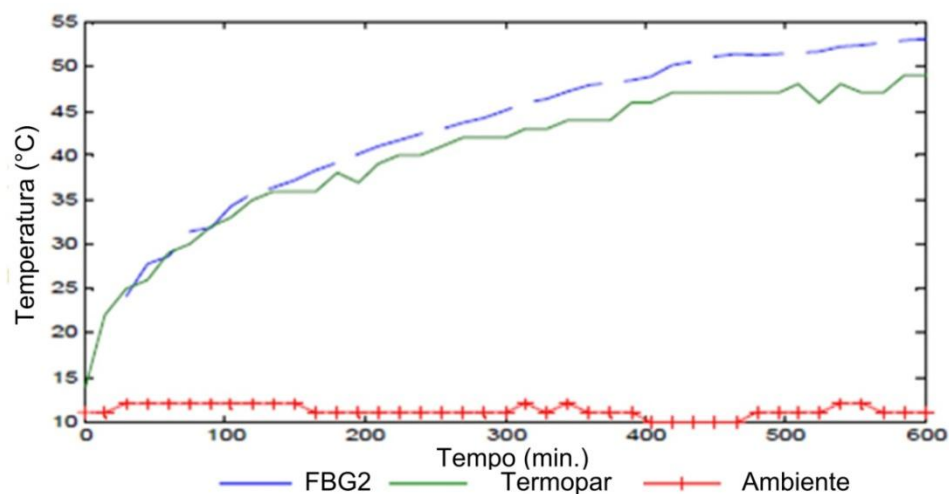


Figura 4.33 – Medição da temperatura por meio de um FBG e respectivo termopar instalados no transformador. Traduzida do trabalho de WEI-GEN et al. (2008).

Os autores do trabalho concluíram que os sensores FBG têm uma resposta rápida às variações térmicas do transformador e que essas sondas térmicas podem ser utilizadas com efetividade para o monitoramento térmico desses equipamentos.

ZIMMERMANN et al. (2007) descreveram o princípio de funcionamento dos sensores FBG em fibras ópticas e as aplicações desses sensores em sistemas elétricos de alta tensão. Em se tratando de transformadores, os autores do trabalho relataram sobre a medição de temperatura diretamente nos enrolamentos do equipamento através das redes de Bragg, substituindo o cálculo do ponto mais quente com base na medição da temperatura do topo do óleo do equipamento.

Para exemplificar a diferença nos modos de inserção e alocação dos sensores através do método convencional em relação ao sensoriamento FBG, a Figura 4.34 apresenta o esquemático de um transformador de potência utilizando-se os dois métodos de medição de temperatura.

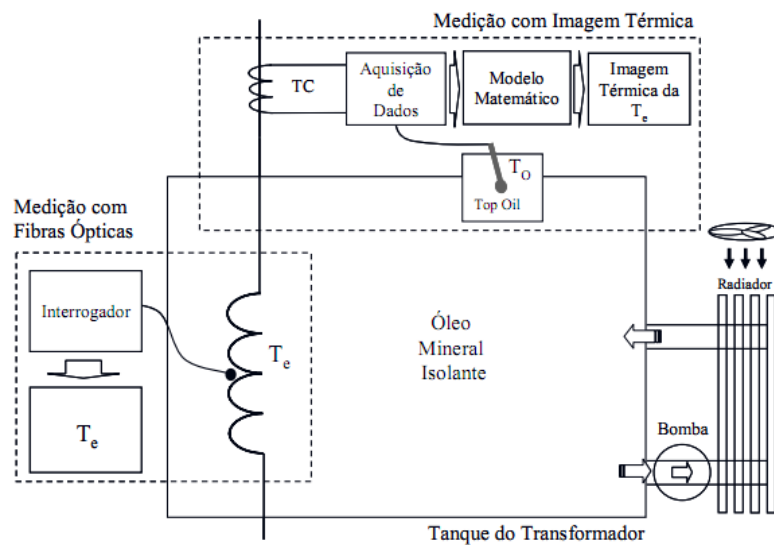


Figura 4.34 – Medição da temperatura pelo método convencional (topo do óleo) e pela inserção de sensor FBG em contato direto com os enrolamentos do transformador (ZIMMERMANN et al., 2007).

Nota-se que para o sensor em redes de Bragg, pode-se instalá-los diretamente nos enrolamentos do transformador, ao passo que para os sensores convencionais, a instalação deve ser feita no topo do óleo. Nesse caso, a temperatura do ponto mais quente é estimada, através de modelo matemático, com base na leitura da temperatura desse sensor.

Os autores do trabalho concluíram que a medição da temperatura do ponto mais quente por meio dos sensores FBG apresentou menor incerteza em relação à estimativa por

meio de modelos térmicos, uma vez que esse está submetido às aproximações realizadas na modelagem térmica.

Com a finalidade de analisar a estabilidade dos sensores baseados nas redes de Bragg operando em transformadores de potência, o trabalho realizado por TEUNISSEN et al. (2002) traz um levantamento da condição de operação dos sensores FBG instalados nesses equipamentos. Primeiramente, esse trabalho realizou ensaios experimentais para averiguar a condição mecânica das fibras ópticas de sílica imersas em óleo aquecido. Para tanto, utilizaram-se 15 amostras de fibra óptica que foram submersas em óleo a uma temperatura de $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 300 h . Em seguida, as fibras foram submetidas a esforços de tração, cujo valor da força aplicada foi de 65 N . A elongação obtida desses ensaios foi de 8% em relação ao comprimento total da fibra, resultado idêntico ao obtido em uma amostra do mesmo tipo de guia óptico submetido às mesmas condições mecânicas de tração, porém à temperatura ambiente.

Avaliada a condição mecânica do guia de onda, os autores do trabalho iniciaram ensaios para a determinação do comportamento do índice de refletividade do sensor FBG com a variação da temperatura. Dessa forma, trabalhando-se com o índice de refletividade relativo da rede de Bragg, onde a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ seu valor foi considerado unitário, alterou-se a temperatura de um sensor FBG e mediu-se a sua refletividade relativa, conforme mostrado pela Figura 4.35.

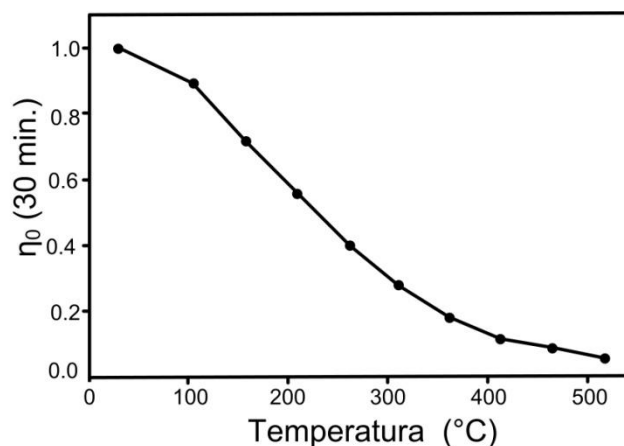


Figura 4.35 – Variação do índice de refração relativo de um sensor FBG com a temperatura. Traduzida do trabalho de TEUNISSEN et al. (2002).

Como a temperatura do ponto mais quente do transformador, segundo os autores, é em torno de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, de acordo com a Figura 4.35, pôde-se concluir que o índice de

refletividade relativo residual – em torno de 0,7 – é suficiente para que o interrogador de Bragg possa realizar as leituras dos sinais refletidos.

Por fim, nesse mesmo trabalho também foi investigada a influência da inserção da fibra óptica no dielétrico do transformador. Mesmo sendo o guia luminoso composto por material de altíssima resistência elétrica, a introdução desse no transformador pode causar uma distorção do campo elétrico devido às diferenças de permissividades elétricas da fibra e do óleo. Para isso, realizaram-se ensaios experimentais com uma fibra óptica submersa em óleo sob diferentes temperaturas, diferentes distâncias entre a esfera e a placa aterrada (vide Figura 4.36) e analisou-se a tensão de ruptura do conjunto comparando-se com o sistema sem a presença do guia óptico. A Figura 4.36 mostra o arranjo experimental utilizado para levantar o comportamento da tensão disruptiva com a presença de uma fibra óptica de sílica. Ressalta-se que a montagem utilizada no sistema representa a pior condição possível de inserção do guia óptico dentro do transformador.

Utilizando-se desse sistema, os autores do trabalho realizaram diversas medições do valor da tensão disruptiva para diferentes valores de d (vide Figura 4.36) e de temperatura. Os resultados obtidos mostraram que o valor da tensão disruptiva é aproximadamente 8 % menor quando se compara os valores alcançados com a inserção da fibra óptica com o sistema sem a presença do guia de luz.

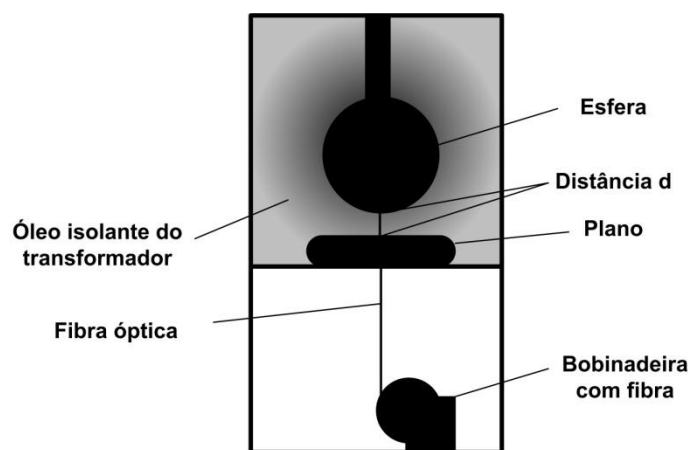


Figura 4.36 – Arranjo experimental para a averiguação da influência do guia óptico no dielétrico do transformador. Traduzida do trabalho de TEUNISSEN et al. (2002).

Desse modo, os autores do trabalho concluíram que a fibra óptica de sílica apresenta boa estabilidade mecânica e valor residual suficiente do índice de refração do guia óptico quando operando sob condições similares ao ambiente interno do transformador. Também foram apresentados os resultados para a influência da fibra óptica no dielétrico do

transformador. Os resultados apontaram para um decréscimo do valor da tensão disruptiva quando da utilização do guia óptico no sistema.

Objetivando-se levantar o comportamento térmico de um transformador de distribuição eficiente, no trabalho de PIKANÇO (2009) foram instalados sensores FBG para a medição de temperatura em dois transformadores monofásicos de distribuição. No total, foram utilizados 12 sensores para cada equipamento, onde os mesmos foram igualmente distribuídos ao longo de 3 fibras ópticas. As redes de Bragg foram instaladas ao longo dos enrolamentos de maior e menor tensão bem como no canal de óleo entre as duas bobinas do transformador. No enrolamento de menor tensão, a fibra óptica contendo os sensores FBG foi instalada de forma helicoidal, localizada entre as espiras da primeira camada da bobina, conforme mostrado na Figura 4.37.

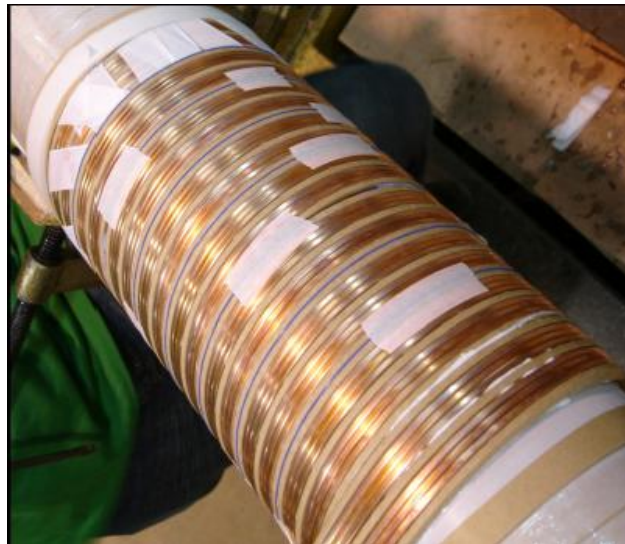


Figura 4.37 – Enrolamento da primeira camada da bobina de menor tensão com a fibra entre as espiras do enrolamento (PIKANÇO, 2009).

Com o sistema preparado para os ensaios de rotina do transformador, realizou-se a medição da temperatura por meio dos sensores FBG e através de termopares instalados em volta do equipamento e no topo do óleo do mesmo. A Figura 4.38 exibe a configuração do sistema para o ensaio de elevação de temperatura.

Alguns dos resultados da distribuição térmica axial das bobinas de menor e maior tensão podem ser visualizados por meio da Figura 4.39 (a) e (b), respectivamente. Os sensores FBG foram nomeados como T1, T2, T3 e T4, localizados, respectivamente, no início, a 1/3, a 2/3 e no topo da bobina. O sensor T5 representa o termopar inserido no topo do óleo.

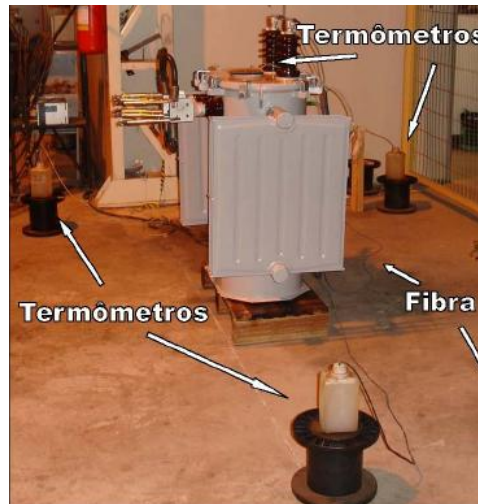


Figura 4.38 – Configuração do ensaio de elevação de temperatura (PICANÇO, 2009).

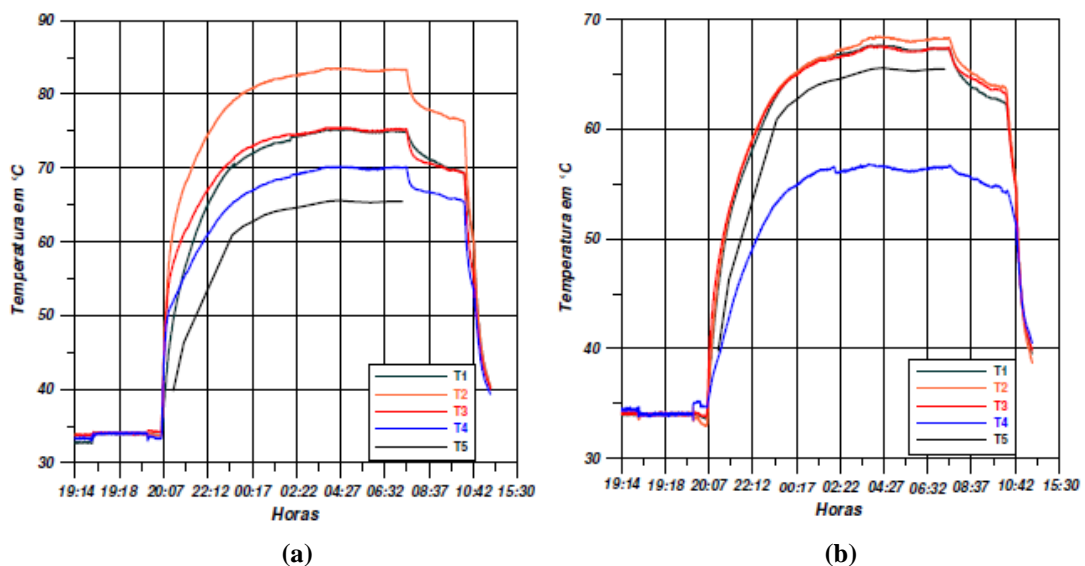


Figura 4.39 – Registro do comportamento térmico da (a) bobina de menor tensão e (b) bobina de maior tensão (PICANÇO, 2009).

Esse trabalho também permitiu a visualização da distribuição térmica radial nos enrolamentos do transformador, conforme exibido pela Figura 4.40. Observando-a, nota-se que o ponto mais quente está situado no enrolamento de menor tensão, a 1/3 da base da bobina, com valor de temperatura de 83,5 °C.

Segundo PICANÇO (2009) e com base na análise dos resultados obtidos, notou-se que o maior valor de temperatura mensurado pelos sensores FBG foi 18 °C maior do que a medição normalizada.

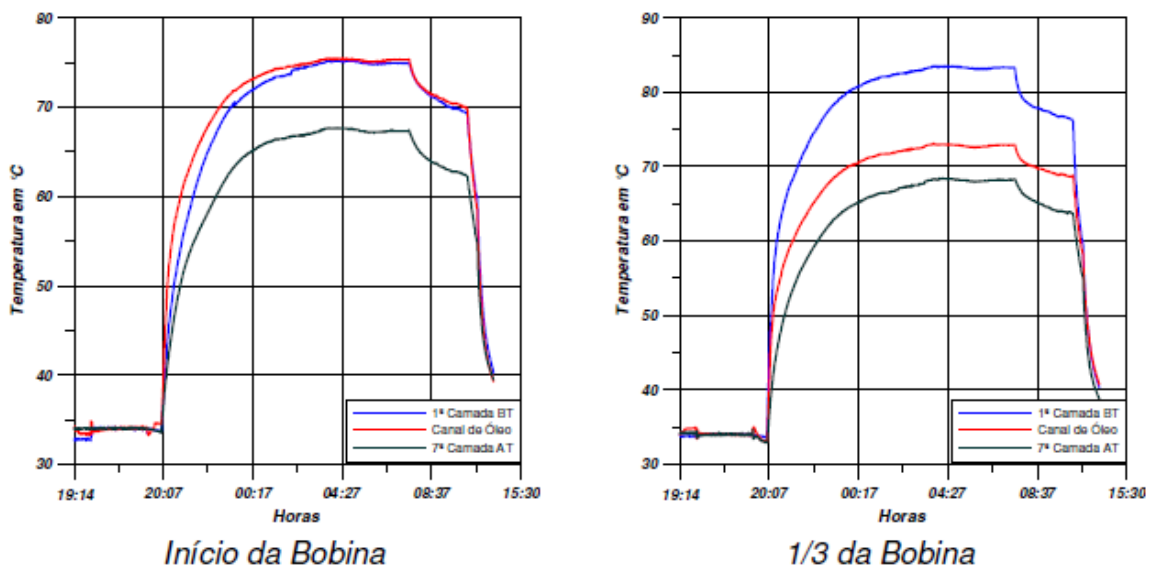


Figura 4.40 – Distribuição radial da temperatura no início da bobina e a 1/3 da mesma (PICANÇO, 2009).

4.5 Sistemas Baseados no Espalhamento de Luz para Medição de Temperatura

4.5.1 Considerações Preliminares

As técnicas de medição de temperatura fundamentadas na utilização do espalhamento de luz vêm sendo densamente empregadas no sistema elétrico de potência. Grande parte das aplicações dessas tecnologias é voltada à medição de temperatura em cabos de linhas de transmissão, usufruindo do mensuramento distribuído de longo alcance apresentado por essas técnicas.

Os sistemas de medição de temperatura baseados no espalhamento Rayleigh apresentam excelente resolução espacial nas medições de temperatura. Dessa forma, é possível localizar, com precisão e exatidão, os pontos de maiores solicitações térmicas ao longo do guia de onda. No entanto, os sistemas baseados nessa tecnologia apresentam limitações quanto ao alcance da medição ao longo do comprimento da fibra óptica. Portanto, ao dimensionar e especificar um sistema de medição de temperatura baseados no espalhamento Rayleigh deve-se considerar ambos os fatores de forma a obter uma solução cabível às necessidades requeridas para o sistema.

Com relação ao espalhamento Raman, os sistemas de medição de temperatura embasados nesse tipo de dispersão têm sido aplicados desde meados de 1980. Esses

sistemas podem operar com a medição de temperatura ao longo de fibras de dezenas de quilômetros de comprimento. Naturalmente, as aplicações dessas técnicas se voltaram para a necessidade de monitoramento térmico de longo alcance.

Os sistemas de medição de temperatura baseados no espalhamento Brillouin estimulado apresentam características de maior intensidade frente aos espalhamentos espontâneos. Por isso, os sistemas de medição baseados nessas técnicas trabalham com fibras de grandes extensões, onde o interrogador do sistema realiza a varredura da leitura da temperatura ao longo de todo comprimento da fibra. Além da vantagem de medições em fibras de grandes extensões, os equipamentos, que trabalham com a medição térmica baseados na dispersão Brillouin, apresentam boa sensibilidade da variação do comprimento de onda com a temperatura.

Objetivando levantar algumas características da configuração dos sistemas de medição de temperatura baseados no espalhamento de luz, faz-se necessário relatar sobre alguns aspectos dessas técnicas, conforme exibido na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Características gerais dos sistemas baseados no espalhamento de luz.

	Rayleigh	Raman	Brillouin
Tipo de Fibra	Monomodo	Multimodo	Monomodo
Sensores por Fibra⁸	200.000	40.000	100.000
Alcance	Unidades de quilômetros	Dezenas de quilômetros	Centenas de quilômetros
Multiplexação⁹	Sim	Sim	Sim
Calibração¹⁰	Imune	Não imune	Imune
Sensibilidade Cruzada¹¹	Sim	Não	Sim

4.5.1.1 Aplicações em Transformadores

Com o objetivo averiguar a aplicabilidade do sistema distribuído de medição de temperatura para o monitoramento térmico de transformadores, YU et al. (2006) calcularam

⁸ Para o sistema Rayleigh, estimou-se esses valores com base no alcance de 2 km, com resolução espacial de 1 cm. Já para os sistemas Raman e Brillouin, o número de sensores adotados foi calculado tomando-se 40 km e 100 km de alcance de fibra óptica, respectivamente, com ambos apresentando resolução espacial de 1 m.

⁹ A multiplexação dos sistemas de sensoriamento distribuídos é realizada no domínio do tempo.

¹⁰ As medições de temperatura baseadas no espalhamento Raman não são imunes à calibração devido ao fato das mesmas serem realizadas através da medição da intensidade do sinal retroespalhado.

¹¹ Os sistemas baseados nos espalhamentos Rayleigh e Brillouin não são imunes à sensibilidade cruzada, pois os espectros de ambos também variam com a deformação mecânica, diferentemente do sistema Raman, que é influenciado somente pela temperatura.

a elevação de temperatura do ponto mais quente de um transformador operando na condição nominal e em condição de curto-circuito adjacente ao equipamento. Tais cálculos permitiram estimar a temperatura do ponto mais quente do equipamento como sendo 98°C durante a condição nominal de carregamento e $125,8^{\circ}\text{C}$ durante a condição de curto-circuito.

Os autores do trabalho realizaram ensaios da medição de temperatura, com base no espalhamento luminoso, ao longo de uma fibra óptica com o objetivo de avaliar a faixa de operação dos sensores distribuídos, conforme exibido pela Figura 4.41. Nota-se que seis trechos da fibra óptica foram submetidos a diferentes temperaturas, variando de 100°C a 150°C .

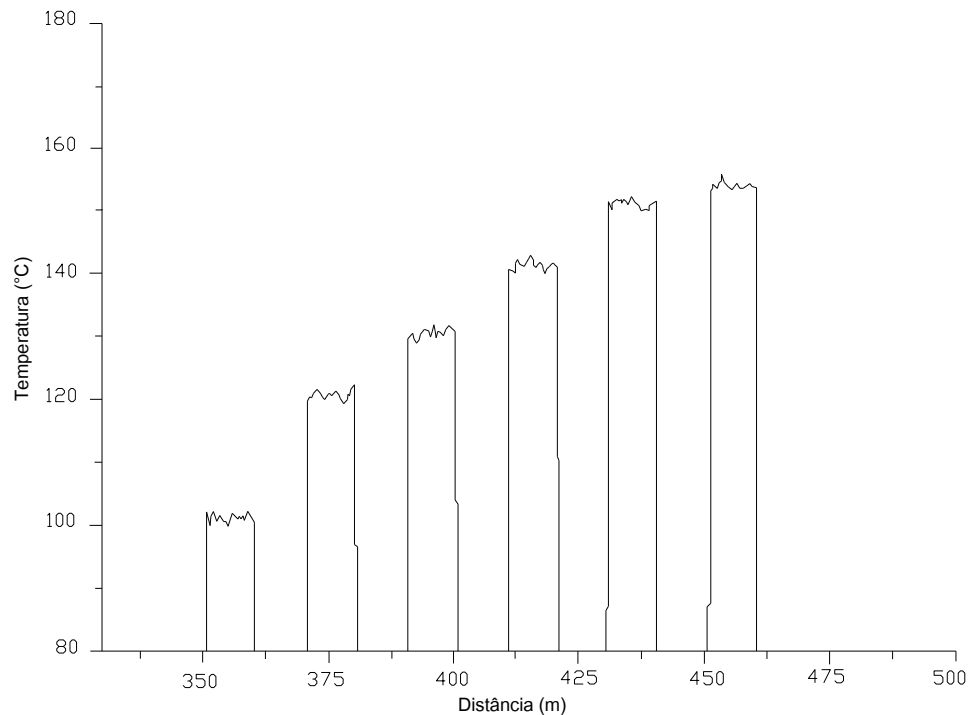


Figura 4.41 – Faixa de medição de temperatura do sistema Raman. Traduzida do trabalho de YU et al. (2006).

Tomando-se como base o levantamento das máximas temperaturas que o transformador pode estar submetido e comparando-se esses valores aos alcançados pela medição de temperatura realizada, os autores do trabalho concluíram que se utilizando uma resolução espacial de 4 m , o sistema de medição efetuou a leitura de temperatura de até 150°C , satisfazendo as condições térmicas para a operação em transformadores.

O trabalho de (DOWNES e LEUNG, 2004) realiza uma revisão do emprego do sensoriamento distribuído em sistemas elétricos de potência, desde a medição de

temperatura em geradores elétricos, cabos isolados e equipamentos de subestação a linhas de transmissão em alta tensão.

Em se tratando especificamente da medição térmica em transformadores de potência, os autores do trabalho ressaltam sobre a possibilidade da inserção da fibra óptica juntamente aos fios que constituem a bobina do equipamento. Sabe-se que a medição de temperatura realizada por meio de sensores em contato com a isolação do condutor provê um valor de temperatura menor que o do condutor propriamente dito, devido ao gradiente térmico entre o condutor e a superfície externa da isolação. Para prover uma medição de temperatura diretamente no condutor, os autores do trabalho propõem uma nova construção dos fios que compõem as bobinas do transformador, conforme exibido pela Figura 4.42.

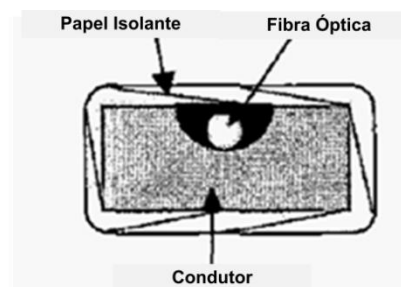


Figura 4.42 – Esquemático de um fio condutor integrado com fibra óptica. Traduzida do trabalho de DOWNES e LEUNG (2004).

Segundo os autores do trabalho, foi possível obter os perfis de temperatura do equipamento utilizando-se o guia de onda em contato direto com os fios da bobina do transformador.

Um levantamento das aplicações do sensoriamento térmico distribuído foi realizado por UKIL et al. (2011). Nesse trabalho, relatou-se o emprego de tais técnicas para o registro da temperatura dos enrolamentos do transformador. Segundo os autores do trabalho, cerca de 1 km de fibra óptica foi instalado juntamente aos fios de cobre dos enrolamentos de uma das bobinas do equipamento. O resultado da distribuição da temperatura ao longo da bobina do transformador pode ser visualizado por meio da Figura 4.43.

Nota-se que o maior valor de temperatura mensurado foi no topo da bobina. Também é possível observar flutuações do valor de temperatura ao longo dos 1000 m de fibra óptica. Tais valores refletem as diferenças de temperatura entre as camadas mais internas e mais externas do enrolamento, uma vez que a fibra percorreu a bobina do transformador como um todo.

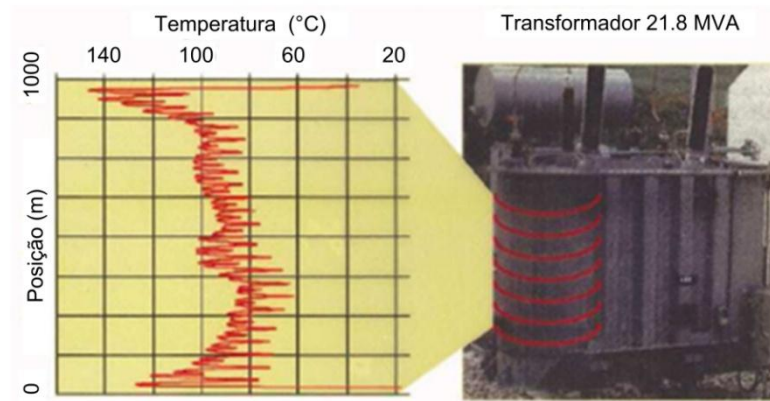


Figura 4.43 – Sistema DTS para o mapeamento térmico ao longo do enrolamento de um transformador de 22 MVA. Traduzida do trabalho de UKIL et al. (2011).

Uma segunda aplicação citada no mesmo trabalho também retrata a operação do sistema distribuído para o monitoramento térmico. Tal sistema foi instalado nos enrolamentos de um transformador utilizado para a alimentação de uma locomotiva pertencente à rota Zurique-Chiasso, na Suíça. Particularmente, o transformador em questão foi submetido a diferentes condições de carregamento ao longo do percurso. O resultado do monitoramento térmico pode ser observado por meio da Figura 4.44. Vale salientar que entre as cidades de Zurique e Chiasso, há uma região montanhosa, aproximadamente na metade do percurso. Justamente quando a locomotiva percorria esse trecho, foram registradas as maiores solicitações térmicas impostas ao transformador.

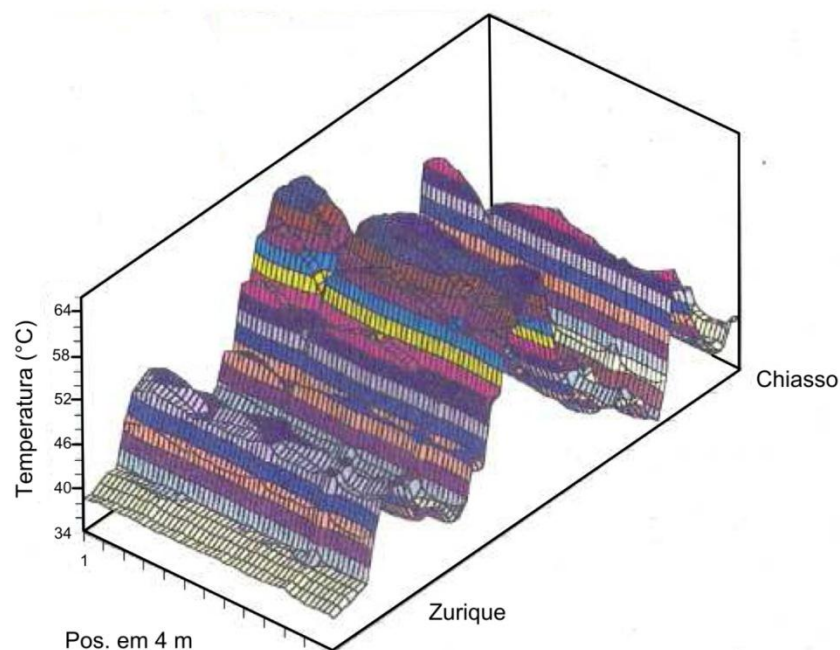


Figura 4.44 – Mapeamento térmico dos enrolamentos de um transformador utilizado para alimentar uma locomotiva. Traduzida do trabalho de UKIL et al. (2011).

4.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados diversos trabalhos que retrataram desde a aplicação de técnicas convencionais de medição de temperatura em transformadores ao emprego de técnicas baseadas em fibras ópticas. Também foram apresentados alguns dos aspectos que envolvem as técnicas de medição térmica, os quais devem ser levados em conta para o dimensionamento do sistema de medição de temperatura em transformadores.

Notou-se que os sistemas baseados em sensores convencionais podem ser empregados para o monitoramento térmico de transformadores e, dependendo da tensão de operação do equipamento, essas sondas térmicas podem ser instaladas nas partes ativas do transformador. Os sensores baseados no decaimento fluorescente foram os primeiros sensores em fibra óptica a serem utilizados, em escala comercial, em transformadores de potência. Há, conforme relatado neste capítulo, diversos transformadores em operação que são monitorados por essa tecnologia, onde os sensores são, geralmente, instalados nos topos das bobinas do equipamento.

Em relação ao sistema FBG, observou-se que se pode operar com maiores quantidades de pontos de monitoramento. Os trabalhos relataram aplicações usufruindo-se da capacidade de multiplexação dessas sondas, tanto no domínio do comprimento de onda quanto no domínio do tempo. Por fim, foram relatados artigos sobre a aplicação dos sistemas distribuídos para a medição térmica em transformadores, onde se pode operar com maiores distâncias de monitoramento.

Capítulo 5

Análise para o Dimensionamento do Mapeamento Térmico Volumétrico em Transformadores

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo realizar um levantamento comparativo das técnicas de mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência. Para tanto, primeiramente abordou-se os esquemas e detalhes do dimensionamento do sistema de sensoriamento. Em seguida, foram comparados os detalhes técnicos acerca de cada sistema e, por fim, confrontaram-se os custos associados a quatro configurações cabíveis a tais sistemas de mapeamento térmico.

5.2 Análises Preliminares dos Requisitos para a Obtenção do Monitoramento Térmico Volumétrico

Uma vez apresentadas, no Capítulo 4 deste trabalho, as técnicas convencionais e fundamentadas em fibras ópticas para medição de temperatura em transformadores e visto que há uma gama de informações relativas a cada tecnologia propriamente dita, faz-se necessário destacar determinados pontos relacionados às técnicas de medição térmica, conforme apresentado a seguir:

- **Sensores Convencionais:**

- 1°. Os sensores convencionais abordados neste trabalho devem ser instalados preferencialmente em locais de baixa intensidade de campo eletromagnético, uma vez que tais elementos não são imunes às interferências eletromagnéticas.
- 2°. Em precaução às interferências eletromagnéticas e aos possíveis problemas de isolamento em alta tensão, os sensores convencionais geralmente são instalados nas partes não-ativas do transformador: canais de óleo do radiador, topo e fundo do óleo, tanque entre outros.
- 3°. Há diversas constatações citadas neste trabalho que abordam o uso dos sensores convencionais em contato com a isolamento dos enrolamentos do transformador. No entanto, vale ressaltar que em determinados trabalhos, o nível da tensão do transformador era relativamente baixo, fazendo com que não houvesse problemas na isolamento do equipamento. Outros trabalhos

mostraram a aplicação desses sensores em transformadores de maior porte, com maior nível de tensão. Contudo, os casos citados apresentaram a medição de temperatura em ensaios laboratoriais, na configuração curto-circuito com perdas e/ou correntes nominais, onde a tensão nominal propriamente dita não foi aplicada ao equipamento.

4°. No trabalho de PIERCE (1992b), foram instalados 300 termopares em um transformador a seco de 2000 kVA, 4160/480 V, em contato direto com os fios de cobre do enrolamento de maior tensão da fase central do equipamento. O transformador foi energizado com tensão nominal nos terminais de menor tensão e ocorreram 24 falhas na isolação do equipamento devido à presença dos termopares.

- **Sensores Baseados no Decaimento Fluorescente:**

1°. Os sensores baseados no decaimento fluorescente são largamente utilizados em transformadores de potência para a medição de temperatura nos enrolamentos do equipamento, nas escalas de unidades a dezenas de pontos de medição. As configurações mais utilizadas são do tipo topo, onde é inserido 1 sensor por fibra. Nesse caso, para se trabalhar com um número razoável de sensores de forma a constituir um mapeamento térmico, deve-se utilizar o mesmo número de cabos ópticos.

2°. Existem alguns relatos, conforme encontrados em (YIN et al., 2008) e (CALDAS, 2003), da possibilidade de aplicação dos sensores baseados no decaimento fluorescente para o sensoriamento *quasi*-distribuído utilizando-se a configuração campo evanescente. No trabalho de YIN et al. (2008), sugere-se a utilização de uma fibra dopada, em determinadas regiões, com material fluorescente. Fazendo-se a multiplexação no tempo, pode-se obter a leitura de uma determinada grandeza ao longo do comprimento da fibra óptica.

3°. Um dos prováveis problemas da multiplexação no tempo dos possíveis sensores distribuídos baseados no decaimento fluorescente ocorre com relação à distinção dos sinais ópticos. Para distinguir os sinais, no domínio do tempo, provindos das regiões sensoras, é necessário que haja um atraso entre os mesmos de tal forma que o interrogador possa realizar a leitura e

processamento dos dados de uma determinada região por vez. Como o decaimento fluorescente é da ordem de milissegundos, naturalmente deverá existir um elevado comprimento de fibra óptica entre as regiões sensoras de forma a causar o atraso dos feixes ópticos.

- 4°. Trabalhando-se com a multiplexagem no comprimento de onda, as regiões sensoras podem ser localizadas próximas umas das outras, uma vez que não há a necessidade de um defasamento temporal entre os sinais provindos dessas localizações. No entanto, conforme pode ser observado por meio da Figura 5.1, não há uma distinção clara dos comprimentos de onda de diferentes tipos de materiais utilizados nos sensores fluorescentes. Observa-se também que a maioria dos materiais apresentados na Figura 5.1 ocupa uma larga faixa espectral do comprimento de onda. Vale ressaltar que a região do comprimento de onda onde se encontram os sinais fluorescentes é uma área de maiores atenuações do sinal transmitido pelo guia óptico, limitando o alcance desse sistema.

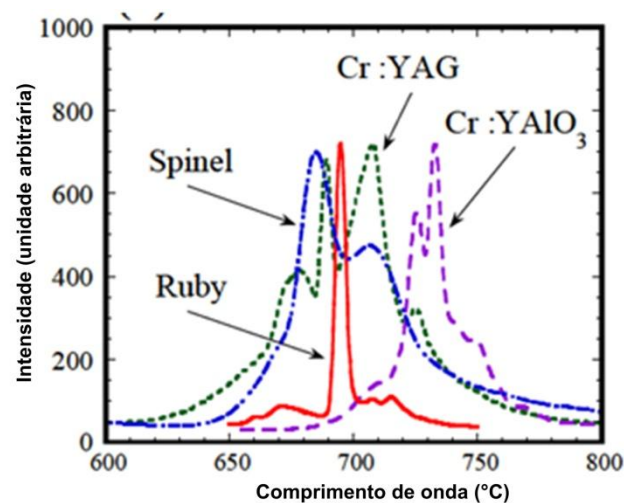


Figura 5.1 – Espectro de alguns tipos de materiais empregados nos sensores fluorescentes. Traduzida do trabalho de HANAMI et al. (2008).

- 5°. A técnica conhecida como excitação fluorescente através de dois fótons (*two photon excited fluorescence*) tem sido estudada para a implementação do sensoriamento fluorescente distribuído. Basicamente, esse sistema trabalha com a utilização de dois pulsos de luz (A e B) que se propagam em sentidos opostos, conforme apresentado pela Figura 5.2. Quando os feixes luminosos se sobrepõem, ocorre a excitação fluorescente, obviamente,

desde que o guia óptico seja dopado com algum tipo de material que gere o decaimento fluorescente. Assim, ajustando-se o tempo de disparo dos pulsos luminosos, é possível realizar uma varredura da temperatura ao longo do comprimento da fibra óptica.

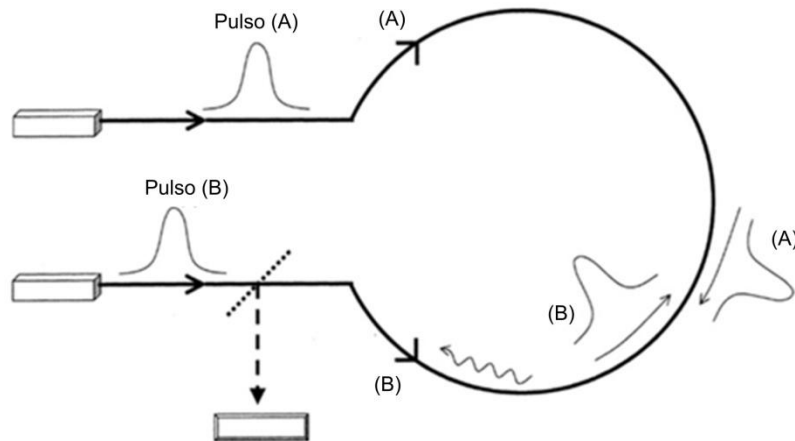


Figura 5.2 – Esquemático do sistema utilizado na técnica de dois fótons. Traduzida do trabalho de RUDDOCK e HAN (2005).

Utilizando-se dessa técnica, o trabalho apresentado por DALZELL et al, (2012) descreve a obtenção da temperatura ao longo do comprimento de uma fibra óptica dopada com fraseodímio, cujo guia óptico apresentava um comprimento de 10 m. RUDDOCK e HAN (2005) relataram sobre a excelente resolução espacial – na ordem de 20 mm – obtida por esse tipo de configuração. No entanto, DAKIN (1990) relatou em seu trabalho sobre alguns obstáculos agregados ao sensoriamento térmico distribuído baseado no decaimento fluorescente. O primeiro ponto destacado nesse trabalho foi com relação ao longo tempo de decaimento fluorescente dos materiais com boa eficiência fluorescente. O segundo aspecto frisado nesse mesmo trabalho foi com relação ao aumento da atenuação e da dispersão sofridas pelas fibras dopadas com material capaz de gerar o decaimento fluorescente.

- **Sensores Baseados em Redes de Bragg:**

1º. Os sensores baseados em redes de Bragg apresentam características condizentes com as necessidades requeridas para o mapeamento térmico

volumétrico de transformadores de potência. Pode-se citar, por exemplo, alguns desses fatores como multiplexagem no comprimento de onda e no domínio do tempo, possibilidade de inscrição de dezenas de sensores em uma fibra óptica e multiplexadores com 4 a 32 canais de medição. Com essas características aliadas, é possível projetar um sistema multiponto *quasi*-distribuído de leitura de temperatura.

- **Sensores Baseados no Espalhamento de Luz:**

- 1°. De uma forma geral, os sensores baseados no espalhamento de luz apresentam características essencialmente condizentes com as necessidades do mapeamento térmico volumétrico. Isso porque tais sistemas de sensoriamento trabalham com a medição distribuída de temperatura.
- 2°. Os sistemas baseados no espalhamento Raman e Brillouin são de longo alcance, trabalhando na ordem de dezenas a centenas de quilômetros, respectivamente. No entanto, a resolução espacial desses sistemas geralmente é em torno de 1 m . Assim, a detecção térmica é um valor médio da temperatura a cada metro da fibra óptica. Tal fato deve ser levado em conta para aplicação dessas técnicas.
- 3°. As técnicas baseadas no espalhamento Rayleigh apresentam excelentes resoluções espaciais que podem chegar à ordem de milímetros. Contudo, essas técnicas trabalham com alcances menores, da ordem de dezenas de metros a unidades de quilômetros, tornando-se mais limitada a aplicação em longas escalas de extensão.

Com base nas considerações levantadas sobre as técnicas de medição de temperatura, optou-se, neste trabalho, por comparar as tecnologias fundamentadas nas redes de Bragg com as embasadas nos espalhamentos luminosos. Tal decisão foi pautada nos relatos sobre as características dos sistemas convencionais e dos sistemas baseados no decaimento fluorescente descritos neste trabalho.

Com relação aos sistemas convencionais, dois aspectos principais motivaram a isenção desse tipo de tecnologia para o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência, a saber:

- Interferência eletromagnética;
- Utilização de apenas um sensor por cabo;
- Problemas de isolamento em alta tensão.

Em se tratando dos sensores baseados no decaimento fluorescente, decidiu-se por não relacioná-los ao mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência devido aos seguintes fatores:

- Utilização de apenas um sensor por fibra – configuração topo – fato que demandaria alta quantidade de cabo óptico inserido no transformador;
- Restrição quanto à distância entre regiões sensoras para a realização da multiplexação no domínio do tempo (configuração campo evanescente);
- Limitação da multiplexação, no domínio do comprimento de onda, devido a possíveis sobreposições das regiões sensoras;
- Alcance limitado da técnica baseada na excitação fluorescente através de dois fótons.

Desse modo, nos itens subsequentes serão abordados diversos aspectos relativos aos sistemas de mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência baseados em sensores FBG e DTS/DTSS.

5.3 Comparação entre as Técnicas Baseadas no Sistema FBG com as Baseadas no Sistema DTS/DTSS

5.3.1 Esquemas de Instalação

Inicialmente, para a compreensão dos sistemas de mapeamento térmico, são apresentadas as Figura 5.3 e Figura 5.4 contendo os diagramas esquemáticos dos sistemas FBG e DTS/DTSS respectivamente. Vale ressaltar que existem diferenças básicas entre os sistemas, conforme pode-se destacar:

- Cada sistema utiliza um interrogador especialmente desenvolvido para converter informações provenientes dos guias ópticos em dados de temperatura;

- Os multiplexadores, no domínio do tempo, utilizados para os sistemas FBG trabalham com menor tempo de chaveamento em relação aos mesmos equipamentos utilizados no sistema DTS/DTSS.

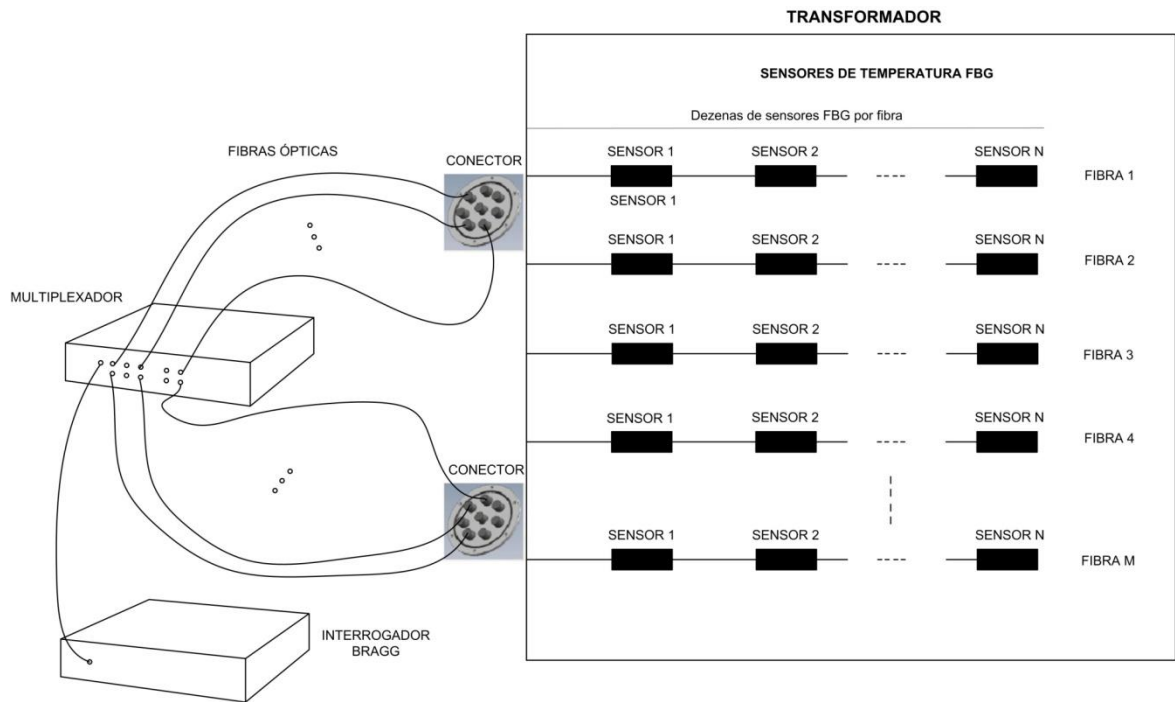


Figura 5.3 – Esquemático da instalação dos sensores FBG em transformadores: utilização de interrogador com um canal acoplado ao sistema multiplexador, flanges de conexão ao tanque do equipamento, diversos sensores em uma mesma fibra e vários guias ópticos no transformador.

Para melhor esclarecimento do arranjo apresentado na Figura 5.3, convém destacar certos aspectos relativos ao sistema de mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência baseado nos sensores FBG, conforme apresentados a seguir:

- As redes de Bragg podem ser inscritas desde distâncias milimétricas a quilométricas umas das outras;
- O posicionamento dos sensores FBG ao longo da fibra óptica pode ser definido de forma a melhor se adequar a leitura de temperatura em pontos-chave do equipamento;
- Os cabos ópticos contendo os sensores FBG podem ser alocados nas mais diversas partes do equipamento: tanque, núcleo, enrolamentos entre outras;
- O multiplexador apresentado para o sistema FBG é baseado no domínio do tempo, uma vez que a multiplexagem no comprimento de onda é realizada pelo próprio interrogador do sistema;

- Os sensores FBG inseridos em uma mesma fibra são interrogados praticamente de forma simultânea ao passo que as fibras ópticas são interrogadas uma por vez.

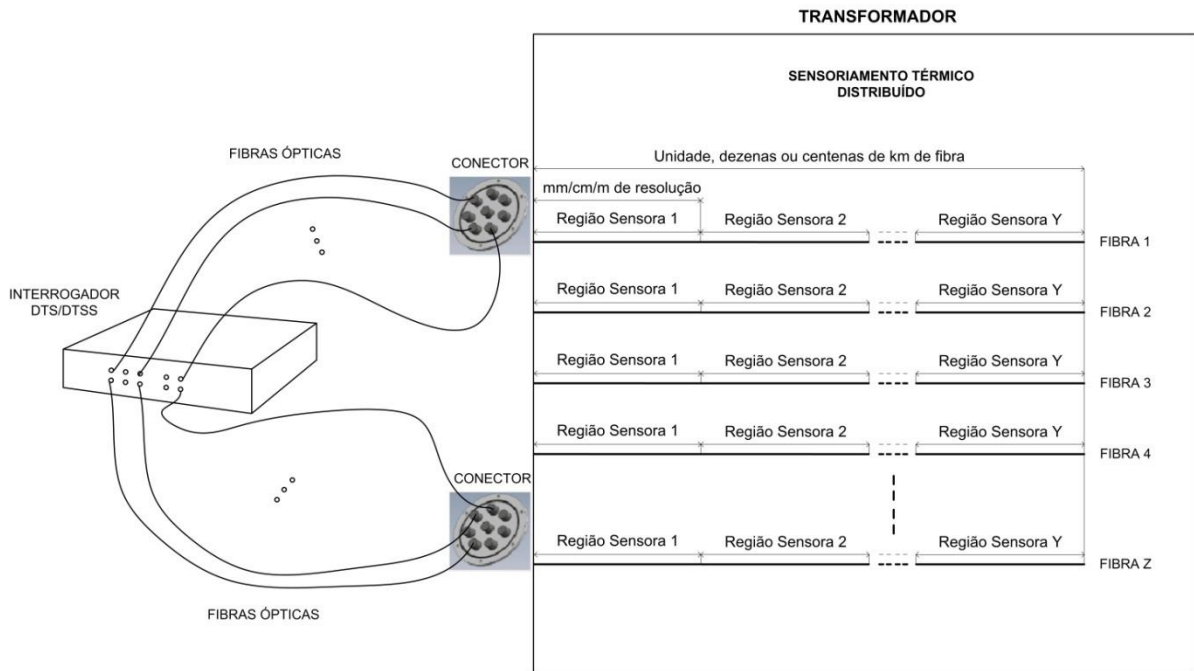


Figura 5.4 – Esquemático da instalação dos sensores DTS/DTSS em transformadores: sistema multiplexador no tempo incorporado ao interrogador, instalação de diversas fibras dentro do equipamento.

Em se tratando do sensoriamento térmico distribuído, faz-se necessário apresentar determinadas características para a melhor compreensão dos aspectos apresentados na Figura 5.4, conforme destacado a seguir:

- As fibras ópticas do sistema DTS/DTSS podem ser instaladas nas mais diversas partes do transformador;
- O interrogador do sistema DTS/DTSS realiza, além da conversão dos fenômenos ópticos em temperatura, a multiplexação, no domínio do tempo, dos diversos canais que o equipamento possui. Dessa forma, interroga-se uma fibra por vez até que o ciclo completo de leitura seja realizado;
- A resolução espacial e o alcance do sistema DTS/DTSS variam de acordo com o tipo de espalhamento de luz empregado no sistema;
- Embora não representado na Figura 5.4, o sistema DTS/DTSS pode trabalhar com a utilização de ambos os terminais da fibra óptica. Geralmente esse tipo de

configuração é utilizado para o espalhamento Raman e Brillouin. Dessa forma, deve-se trabalhar com o dobro de canais ópticos do interrogador e o dobro de conectores instalados no tanque do transformador em relação ao número de fibras.

Objetivando-se melhor apresentar a forma de instalação dos sensores FBG no transformador, a Figura 5.5 exibe um possível modo de alocação do guia óptico, contendo as redes de Bragg, junto aos enrolamentos do transformador. Nota-se que para a obtenção do mapeamento térmico de todo o volume das bobinas, deve-se, preferencialmente, instalar o conjunto óptico de forma helicoidal, entre as espiras do enrolamento e ao longo das diversas camadas do mesmo.

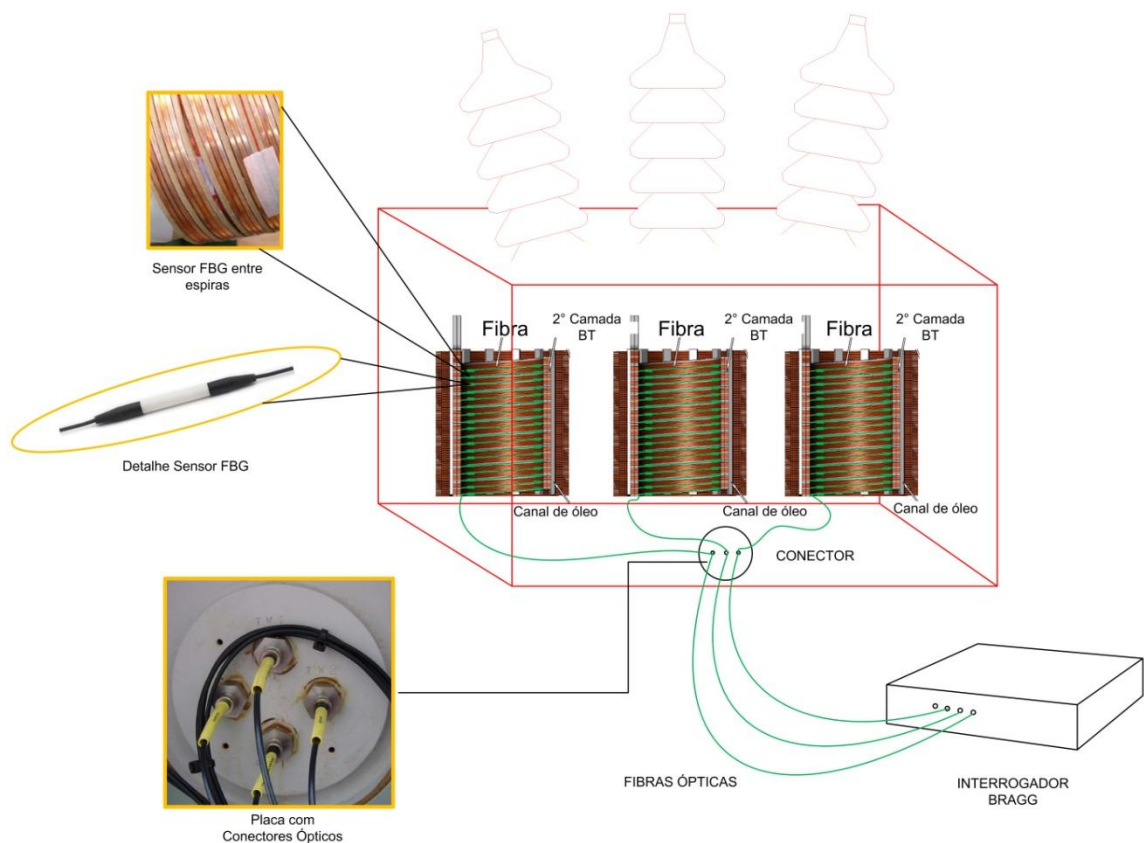


Figura 5.5 – Detalhes do arranjo e da instalação do sistema FBG nos enrolamentos do transformador. Instalação do conjunto fibra e sensores de forma helicoidal, detalhes da placa de conectores ópticos para transformadores e imagem de um sensor FBG real.

Da mesma forma, a Figura 5.6 apresenta o modo de instalação do sistema DTS/DTSS nos enrolamentos do transformador. Ressalta-se que o modo de instalação é semelhante ao sistema FBG. Porém, não é necessário predefinir as posições das regiões sensoras, uma vez que a fibra como um todo atua como elemento sensor. Nota-se por meio

da Figura 5.5, a utilização de terminação dupla dos cabos ópticos para melhor operação do sistema de medição. Todavia, os interrogadores que operam com terminação dupla devem apresentar o dobro de canais em relação ao número de fibras ópticas. Do mesmo modo, as placas que contêm os conectores ópticos devem possuir o dobro de conexões frente ao número de guia de onda.

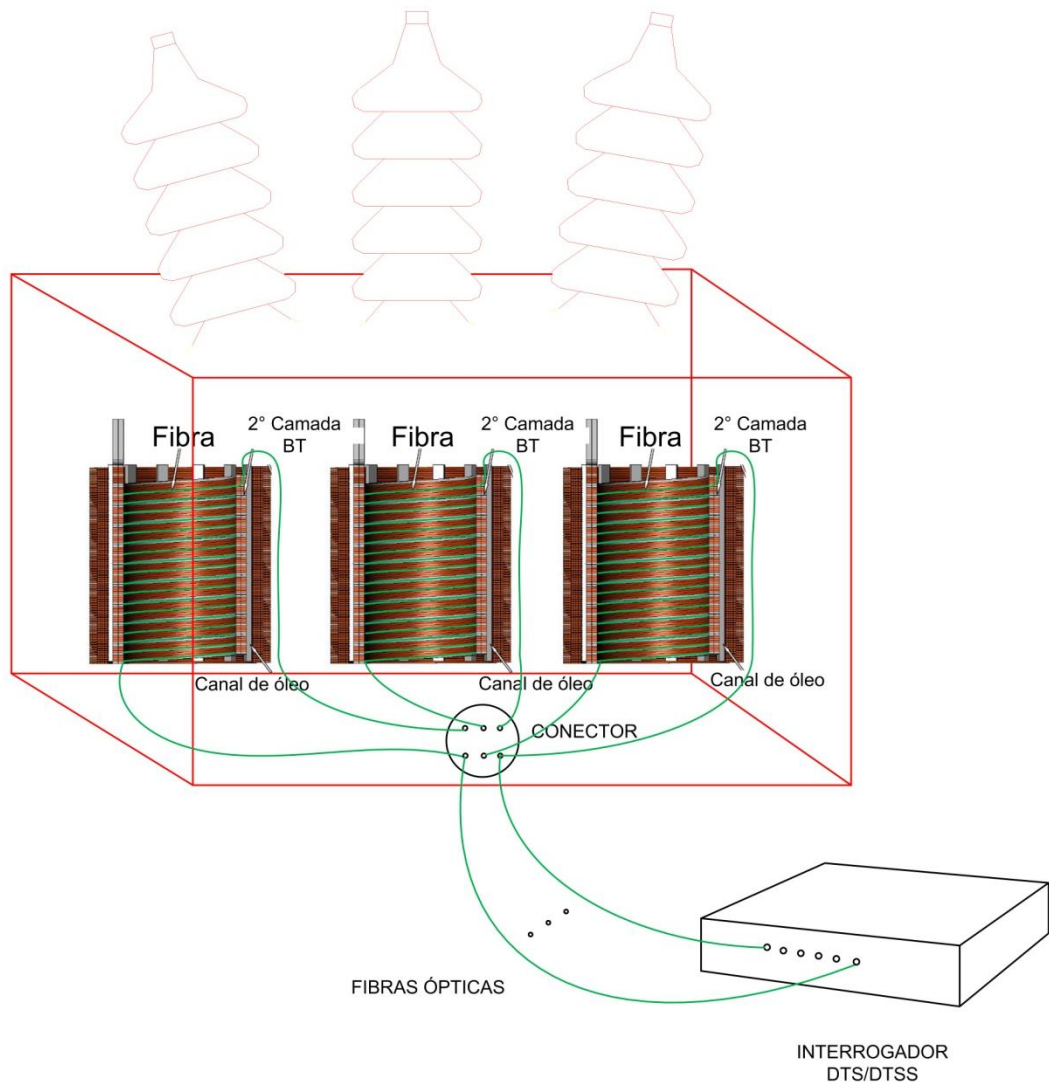


Figura 5.6 – Detalhes do arranjo do sistema DTS/DTSS nos enrolamentos do transformador. Interrogador na configuração terminação dupla.

Comparando-se as formas de instalação exibidas nas Figura 5.5 e Figura 5.6, faz-se necessário esclarecer certos aspectos, conforme apresentados a seguir.

Os sensores FBG apresentam uma proteção especial, uma vez que, dependendo do processo de fabricação dos sensores, a região de inscrição das redes de Bragg é mais frágil que o restante da fibra. Essa proteção do sensor FBG também atua como meio isolador da

grade de Bragg frente a possíveis deformações mecânicas. Contudo, o fato da utilização dessa camada protetora acarreta em um maior diâmetro na região da rede de Bragg, conforme mostrado na Figura 5.7.

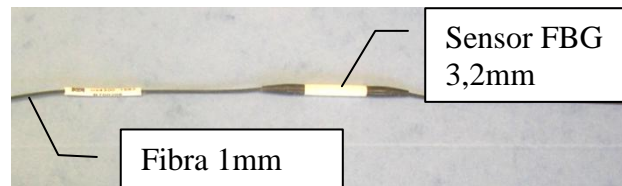


Figura 5.7 – Comparação e detalhe do sensor FBG com encapsulamento e da fibra óptica monomodo com camadas de proteção.

Tal problema não é encontrado nos sistemas DTS/DTSS, pois a proteção do guia óptico é uniforme em toda a sua extensão. A Figura 5.8 apresenta o esquemático de uma bobina do transformador instalada com a presença de uma fibra óptica do sistema DTS/DTSS.

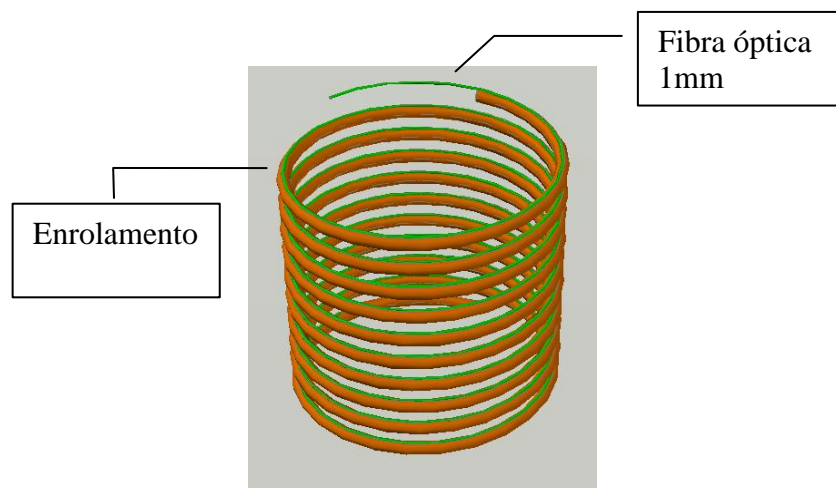


Figura 5.8 – Bobina do transformador com inserção da fibra óptica de forma helicoidal.

Uma vez apresentado os arranjos de instalação dos sistemas FBG e DTS/DTSS em transformadores, parte-se agora para o detalhamento dos dados técnicos relativos a cada sistema.

5.3.2 Detalhes Técnicos

Neste item o objetivo é comparar entre si, tomando-se como base os aspectos técnicos, os sensores FBG, DTS Raman, DTSS Rayleigh e DTSS Brillouin. Para realização

desses confrontamentos técnicos, foram obtidas informações de catálogos de diversos fabricantes bem como através do contato direto com representantes dos sensores em fibras ópticas. Para melhor visualização do comparativo técnico desses sensores, organizaram-se as informações conforme apresentadas pela Tabela 5.1. Procurou-se listar apenas as características semelhantes das técnicas de sensoriamento, exceto as peculiaridades relevantes de cada tipo de sistema.

Tabela 5.1 – Comparação técnica dos sensores (APSENSING, 2012), (FIBER SENSING, 2012), (MICRON OPTICS, 2012), (OMNISENS, 2012), (OZOPTICS, 2012), (SENSORNET, 2012).

Características		FBG	DTSS Rayleigh	DTS Raman	DTSS Brillouin
Operação	Faixa de Temperatura de Operação [°C]	-40 a 250	-50 a 300	-20 a 350	-270 a 700 ^(I)
	Faixa de Temperatura de Medição [°C]	0 a 150	-50 a 300	-20 a 350	-270 a 700
Interrogador	Exatidão Térmica [°C]	0,5 a 1	0,2	0,5	0,1
	Resolução Térmica [°C]	0,1	0,2	0,1 ^(II)	0,005 ^(II)
	Precisão Térmica [°C]	0,1	0,1	0,1	NI
	Sensibilidade	~10pm/°C	NI	NI	NI
	Resolução Espacial [m]	0,1	0,01	0,5 a 50 ^(II)	0,1 a 50 ^(II)
	Tempo de Aquisição [s]	1 a 5	2 a 10	10 a 300 ^(II)	1 a 300 ^(II)
	Nº de Canais	1, 2, 4 e 8	1	1 ou 2	1 ou 2
Multiplexador	Nº de Sensores por Canal	1 a 80	200.000 ^(III)	16.000 ^(IV)	20.000 ^(V)
	Nº de Canais	4, 8, 16 e 32	NI	2, 4, 8, 12, 24	4, 6, 8 ... 18, 20
Dimensões	Tempo de Chaveamento [s]	~1	NI	30 a 300 ^(VI)	60 a 120 ^(VI)
	Diâmetro do Sensor [mm]	~3,2	NA	NA	NA
	Diâmetro do Cabo [mm]	1 a 3	1 a 3	4,4	1 a 3
	Alcance [km]	NI	0,07 a 2	40 ^(II)	100 ^(II)
<i>Informações Adicionais</i>					
NA	<i>Características que não se aplicam ao sistema.</i>				
NI	<i>Valores não informados pelos fabricantes.</i>				
^(I)	<i>Depende do material que constitui o cabeamento óptico.</i>				
^(II)	<i>A resolução de temperatura, a resolução espacial, o tempo de leitura e o alcance do sistema são grandezas relacionadas entre si para os efeitos Raman e Brillouin.</i>				
^(III)	<i>Calculado com base no alcance máximo de 2 km dividido pela resolução espacial de 0,01 m.</i>				
^(IV)	<i>Calculado com base no alcance de 8 km pela resolução espacial de 0,5 m.</i>				
^(V)	<i>Calculado com base no alcance de 2 km pela resolução espacial de 0,1 m.</i>				
^(VI)	<i>Tempo de chaveamento depende do tempo de aquisição do interrogador.</i>				

Com base nas características técnicas exibidas pela Tabela 5.1, torna-se essencial destacar alguns pontos importantes acerca dos sensores nela abordados, conforme a seguir:

- **Características de Operação:**

- 1°. As faixas de temperatura de operação e medição das quatro técnicas listadas são condizentes com os requisitos térmicos necessários para tal aplicação;

- **Características dos Interrogadores:**

- 1°. Os valores de exatidão, precisão e resolução térmica apresentados pelas técnicas são satisfatórios para aplicação proposta neste trabalho;

- 2°. Em se tratando dos sistemas DTS Raman e DTSS Brillouin não se devem utilizar resoluções espaciais muito grandes, uma vez que a temperatura obtida é a temperatura média de cada trecho de fibra. Dessa forma, se for utilizada uma resolução espacial extensa, pode ocorrer à subestimação do valor do ponto mais quente devido às médias térmicas ao longo do trecho;

- 3°. Conforme destacado nas informações adicionais da Tabela 5.1, as grandezas resolução de temperatura, resolução espacial, tempo de leitura e alcance do sistema são relacionadas entre si, uma dependente das outras.

- 4°. O número máximo de sensores FBG por fibra exibido na Tabela 5.1 toma como base recomendações cedidas pelos fabricantes. Se adotado esse número de sensores, o interrogador deve ser customizado para poder operar nessa situação;

- **Características dos Multiplexadores:**

- 1°. O tempo de chaveamento dos multiplexadores deve ser condizente com o tempo de leitura do interrogador. Nesse caso, os multiplexadores do sistema FBG apresentam tempos de chaveamento menores, pois a

interrogação de cada fibra ocorre de forma mais rápida em relação aos sistemas DTS/DTSS;

- **Características Dimensionais:**

- 1°. Os diâmetros dos cabos utilizados para as diversas técnicas são satisfatórios para o mapeamento térmico volumétrico em transformadores, uma vez que os mesmos se situam na ordem de unidades de milímetros;
- 2°. Embora não informado pelos fabricantes, o alcance dos sistemas FBG é da ordem de dezenas de quilômetros. No entanto, para a medição de temperatura *quasi*-distribuída, o cabeamento óptico se situa na ordem de dezenas de metros devido à limitação do número de sensores por fibra;
- 3°. O sistema DTSS/Rayleigh opera geralmente com alcance da ordem de dezenas de metros. A expansão para 2 km de fibra ocorre interrogando-se 70 m de fibra por vez, até que todo o comprimento do guia óptico seja lido. Tal fato incrementa razoavelmente o tempo total de leitura.

De forma a complementar as informações técnicas do sistema DTSS Rayleigh, exibe-se a Figura 5.9 que relaciona a variação do tempo de aquisição em função de diferentes tipos de interrogadores. No caso, os diferentes tempos de medições exibidos são relativos a fibras de 70 m de comprimento.

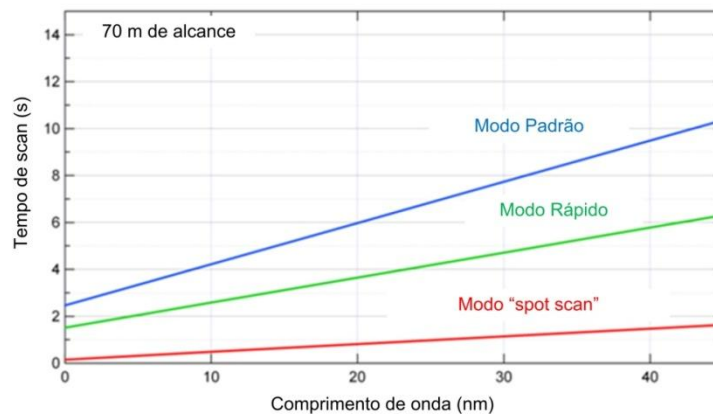


Figura 5.9 – Variação do tempo de leitura do sistema DTSS Rayleigh de acordo com o tipo de interrogador. Medições realizadas em fibras de 70 m. Traduzida de (LUNA TECHNOLOGIES, 2012).

A correlação entre tempo de medição, alcance e resolução de temperatura para 1 m de resolução espacial do sistema DTS Raman é exibida na Figura 5.10.

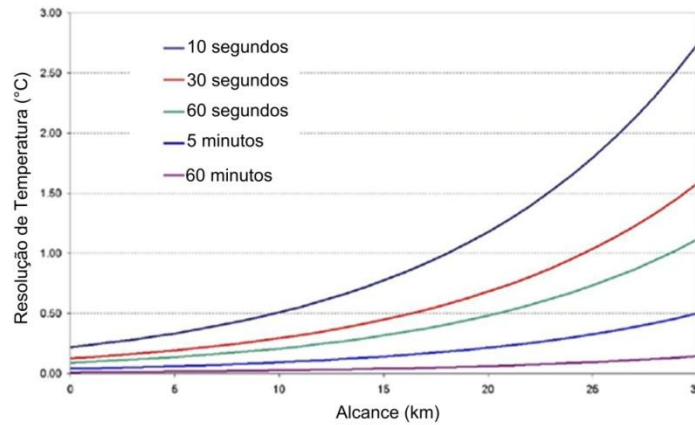


Figura 5.10 – Comportamento da resolução de temperatura do sistema DTS Raman em função do tempo de leitura e da distância da região sensora. Traduzida de (SENSORNET, 2012).

Nota-se, por meio da Figura 5.10, que à medida que a distância da região sensora aumenta, a resolução de temperatura diminui, considerando-se o tempo de aquisição fixo.

Por fim, a Figura 5.11 mostra as correlações entre resolução espacial e térmica, alcance e tempo de leitura para o sistema DTSS Brillouin.

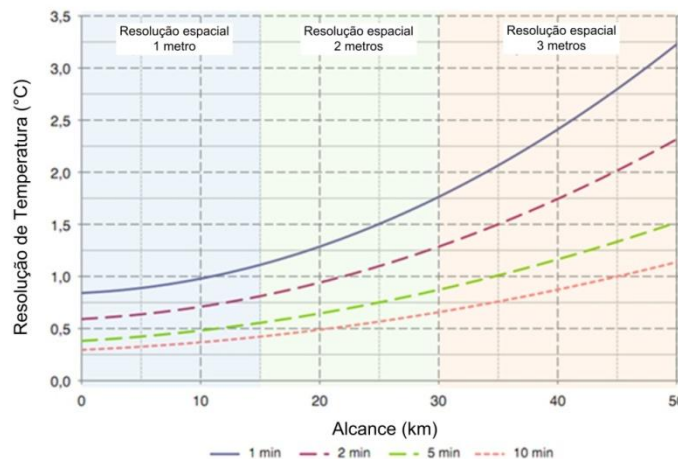


Figura 5.11 – Variações da resolução de temperatura do sistema DTSS Brillouin com a resolução espacial, tempo de leitura e comprimento da região sensora. Traduzida de (OMNISENS, 2012).

Os aspectos técnicos exibidos na Tabela 5.1 e nas Figura 5.9, Figura 5.10 e Figura 5.11 devem ser considerados para a determinação dos parâmetros que melhor se adéquem as necessidades do mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.

5.3.3 Custos Relativos

Uma vez exibido os esquemas de instalação dos sistemas FBG e DTS/DTSS e mostrados os detalhes técnicos dos mesmos, parte-se para o levantamento dos custos dos equipamentos utilizados em cada tecnologia.

Para tanto, decidiu-se por realizar uma comparação relativa entre os custos dos equipamentos em si e, por fim, dos sistemas completos. Assim, tomou-se como base o maior custo de aquisição entre todos os equipamentos cotados para os diversos sistemas. A Tabela 5.2 exibe os dados relativos do dispositivo em questão.

Tabela 5.2 – Dados relativos ao equipamento base para a comparação de custos.

Equipamento Base						
Tipo	Princípio de Funcionamento	Número de Canais	Tempo de Aquisição [s]	Resolução Espacial [m]	Tamanho da Fibra [km]	Valor [\$]
Interrogador	DTSS Brillouin	2	60 a 120	1	20	1.000,00

O preço do equipamento base foi adotado como sendo \$1.000,00 unidades monetárias. Portanto, fundamentado no custo desse equipamento, foi possível obter o valor relativo dos diversos dispositivos que constituem os diferentes sistemas de mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.

É importante destacar que as cotações dos diversos sistemas foram obtidas em diferentes épocas e, do mesmo modo, em diferentes moedas. Para se comparar os preços dos equipamentos, converteu-se todos os custos para uma mesma moeda. Além disso, foram incorporadas as taxas de importação e impostos, baseados na legislação vigente, aos preços dos equipamentos importados cujos fabricantes não possuíam representantes no Brasil. Por fim, vale ressaltar que não foram contabilizados os custos dos componentes auxiliares para a operação dos sistemas de mapeamento bem como os serviços de comissionamento e instalação dos sensores em fibras ópticas em transformadores.

Abordando-se primeiramente o sistema FBG, montou-se o sistema 1 conforme apresentado pela Tabela 5.3. Nota-se que são apresentados os dados básicos dos equipamentos, as quantidades e os preços dos mesmos.

Observa-se, por meio da Tabela 5.3, que o valor total do conjunto de fibras ópticas contendo sensores FBG é de praticamente 54 % do custo total do sistema. Da mesma forma, os multiplexadores utilizados no sistema 1 representam cerca de 23 % do valor total desse sistema.

Tabela 5.3 – Sistema 1: Configuração FBG para o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.

Sistema 1 – FBG				
Item	Equipamento	Quantidade	Valor Unitário [€]	Valor Total [€]
1	Interrogador – 1 canal – Tempo de aquisição de 1s	1	214,00	214,00
2	Multiplexador – 8x1 canais	1	224,00	224,00
3	Fibra óptica monomodo – proteção com Kevlar e Poliimida – temperatura de operação entre 0°C a 150°C – 40 sensores*	6	88,00	526,00
4	Flange – 8 conexões	1	13,00	13,00
Custo Total				977,00
<i>Informações Adicionais</i>				
*	<i>Quantidade Total de Sensores</i>		240	
	<i>Comprimento Total das Fibras [km]</i>		~1	

Nota-se que o sistema 1 atingiu 240 pontos de medição através da utilização de 6 fibras ópticas contendo 40 sensores FBG cada uma. Para a cotação realizada, projetaram-se os sensores FBG localizados a uma distância de 5 m entre si. Deste modo, cada cabo óptico possui um comprimento total de 200 m. Ao todo, utilizou-se 1,2 km de cabo óptico para a composição desse sistema.

Observa-se também que se optou por trabalhar com, no máximo, 40 sensores por fibra. Tal escolha foi tomada com base na consideração do fabricante, pois para se interrogar, por exemplo, 80 sensores em uma mesma fibra, há a necessidade de aquisição de um medidor especial, que custará mais do que os valores aqui apresentados. Já a utilização de seis fibras ópticas foi tomada como base para utilização de um cabo óptico por enrolamento de um transformador trifásico.

Paralelamente ao levantamento dos custos sistema 1, realizou-se da mesma forma a composição de uma configuração cabível ao sistema DTSS Brillouin (Sistema 2), conforme exibido pela Tabela 5.4. Destaca-se que foram adotados cabos com conexões duplas, pois as mesmas apresentam vantagens quanto ao alcance do sistema.

Ressalta-se que o preço de aquisição dos cabos ópticos do sistema 2 representa cerca de 52 % do custo total desse sistema. Já o valor de aquisição do interrogador do mesmo sistema representa 32 % do preço total do mesmo.

Tabela 5.4 – Sistema 2: Configuração DTSS Brillouin para o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.

Sistema 2 – DTSS Brillouin				
Item	Equipamento	Quantidade	Valor Unitário [\$]	Valor Total [\$]
1	Interrogador 20 km – 2 canais – resolução 1m – tempo de aquisição de 2 minutos	1	1.000,00	1.000,00
2	Fibra óptica monomodo – conexão dupla – revestimento para proteção – temperatura de operação entre 0°C a 150°C – 6 km*	4	341,00	1.365,00
3	Multiplexador – 8x2 canais	1	264,00	264,00
4	Flange – 8 conexões	1	13,00	13,00
Custo Total				2.641,00
<i>Informações Adicionais</i>				
*	<i>Comprimento do cabeamento óptico [km]</i>		24	
	<i>Comprimento efetivo da região sensora [km]</i>		24	
	<i>Quantidade Total de Sensores</i>		24.000	

Observa-se também que se pôde atingir um total de 24.000 regiões sensoras, uma vez que o comprimento efetivo do cabeamento óptico foi de 24 km com resolução espacial de 1 m. Outro aspecto observável nesse mesmo sistema é a relação entre o número de canais do multiplexador com o número de fibras totais. Devido ao fato de se utilizar cabeamento com terminação dupla, o multiplexador deve possuir o dobro de canais em relação ao número de cabos.

Comparando-se os custos de aquisição do sistema 2 em relação ao sistema 1, observa-se que o sistema DTSS Brillouin apresenta um valor de aquisição de 2,7 vezes maior em relação ao sistema FBG. No entanto, as características de alcance e número de regiões sensoras do sistema 2 foram extremamente maiores em relação às obtidas pelo sistema 1.

A título de comparação, pode-se dimensionar uma configuração sistêmica de forma a operar nas proximidades de 20 km de fibra com cerca de 20.000 sensores FBG. Para isso, consideraram-se os sensores distribuídos a uma distância de 1 m entre si. Utilizando-se de 2 interrogadores contendo 8 canais cada um e de 16 multiplexadores, cada um contendo 32 canais, foi possível obter o sistema 3, conforme descrito na Tabela 5.5. Observa-se também que foram utilizadas 512 fibras ópticas e 64 flanges.

Tabela 5.5 – Sistema 3: Segunda configuração FBG para o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.

Sistema 3 – FBG				
Item	Equipamento	Quantidade	Valor Unitário [€]	Valor Total [€]
1	Interrogador – 8 canais – Tempo de aquisição de 1s	2	847,00	1.693,00
2	Multiplexador – 32x1 canais	16	566,00	9.055,00
3	Fibra óptica monomodo – proteção com Kevlar e Poliimida – temperatura de operação entre 0°C a 150°C – 40 sensores*	512	78,00	40.206,00
4	Flange – 8 conexões	64	13,00	819,00
Custo Total				51.773,00
<i>Informações Adicionais</i>				
*	<i>Quantidade Total de Sensores</i>		20.480	
	<i>Comprimento Total das Fibras [km]</i>		~20	

Nota-se que para nivelar as características de alcance e número de regiões sensoras do sistema FBG, apresentado na Tabela 5.5, em relação aos valores obtidos pelo sistema 2, foi necessária a utilização de diversos multiplexadores contendo o número máximo de canais bem como o emprego de um conjunto elevado de cabos ópticos contendo sensores FBG. Do mesmo modo, destaca-se a elevada quantidade de flange necessária para conectar as fibras ópticas internas aos multiplexadores. Em relação aos custos, o sistema 3 apresentou um valor total cerca de 20 vezes maior em comparação ao sistema 2.

Por fim, realizou-se de modo semelhante à composição da configuração do sistema DTS Raman (sistema 4). Ressalta-se que foram adotados apenas cabos redundantes para a comparação dos custos relativos ao sistema DTS. Além disso, também se optou por trabalhar com a terminação dupla, pois a mesma apresenta vantagens quanto à resolução térmica. Assim, a Tabela 5.6 apresenta descritivamente os itens que compõem o sistema 4, a quantidade de cada equipamento, o valor relativo de cada item e o custo total do sistema.

Ressalta-se que o preço de aquisição dos cabos ópticos do sistema 4 representa cerca de 65 % do custo total desse sistema. Observa-se também que se pôde atingir um total de 48.000 regiões sensoras, uma vez que o comprimento efetivo do cabeamento óptico foi de 24 km – devido à redundância do sistema – com resolução espacial de 0,5 m. Outro aspecto observável nesse mesmo sistema é a relação entre o número de canais do interrogador com o número de fibras totais. Devido ao fato de se utilizar cabeamento redundante com terminação dupla, o interrogador deve possuir quatro vezes mais canais em relação ao número de cabos.

Tabela 5.6 – Sistema 4: Configuração DTS Raman para o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.

Sistema 4 – DTS Raman				
Item	Equipamento	Quantidade	Valor Unitário [\$]	Valor Total [\$]
1	Interrogador 8 km – resolução 0,5m – tempo de aquisição de 30 s – multiplexador integrado de 12 canais	1	884,00	884,00
2	Fibra óptica multimodo redundante – conexão dupla – revestimento para proteção – temperatura de operação de 0°C a 300°C – 8 km*	3	569,00	1.706,00
3	Flange – 8 conexões	2	13,00	26,00
Custo Total				2.616,00
<i>Informações Adicionais</i>				
*	<i>Comprimento do cabeamento óptico [km]</i>		48	
	<i>Comprimento efetivo da região sensora [km]</i>		24	
	<i>Quantidade Total de Sensores</i>		48.000	

Uma vez realizado o levantamento dos custos dos sistemas de 1 a 4, parte-se agora para a comparação entre os valores de aquisição das quatro configurações e apresentação breve das principais características de cada sistema. Assim, confrontando-se tais sistemas, obteve-se a comparação exibida na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Comparação dos sistemas.

	FBG	DTSS Brillouin	FBG	DTS Raman
	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Comprimento da Região Sensora [km]	~1	24	~20	24
Número de Cabos Ópticos em Paralelo	6	4	512	3
Número de Flanges no Tanque	1	1	64	2
Número de Sensores	240	24.000	20.480	48.000
Tempo de Leitura Aproximado [s]	6	240 a 480	512	360
Custo Total [\$]	977,00	2.641,00	51.773,00	2.616,00

Por meio da Tabela 5.7, pôde-se confrontar, de maneira resumida, os sistemas de 1 a 4. Nota-se que o sistema 1 apresenta menor custo total de aquisição, porém o mesmo é mais restrito em relação ao alcance e número de sensores. Os sistemas 2 e 3 são muito semelhantes entre si, comparando-se desde as características técnicas aos custos de aquisição. Ressalva feita apenas para o número de sensores do sistema 4 que foi justamente

o dobro do sistema 2. Por fim, o sistema 3 apresentou-se inviável tanto tecnicamente quanto economicamente para a aplicação no mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.

5.4 Considerações Finais

Por meio deste capítulo, foi possível confrontar técnicas capazes de realizar o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência. A comparação das técnicas ocorreu, primeiramente, através do levantamento dos aspectos de instalação, passando pelas características técnicas de cada sistema e, por fim, abordando-se os aspectos econômicos de diferentes sistemas voltados para tal mapeamento.

Notou-se que o custo da fibra óptica contendo os sensores FBG é responsável por maior parte do custo total dos sistemas 1 e 3. Sendo assim, para o aumento da capacidade do sistema FBG, ocorre um aumento considerável do custo do sistema devido, principalmente, aos valores das fibras ópticas contendo os sensores. Portanto, o sistema 3 se mostrou inviável tanto economicamente quanto tecnicamente por causa do preço de aquisição, da quantidade de cabos ópticos, flanges e canais dos multiplexadores.

Os sistemas 2 e 4, formados pelas tecnologias DTSS Brillouin e DTS Raman, respectivamente, apresentaram características similares entre si, considerando-se os aspectos técnicos e econômicos. Obviamente, os preços de ambos os sistemas podem reduzir caso trabalhe-se com regiões sensoras menores.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Conclusões e Contribuições

Primeiramente, este trabalho apresentou as características do mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência. Inicialmente, definiram-se conceitos relacionados à medição de temperatura, ao monitoramento térmico e, por fim, ao mapeamento térmico seja ele comum, registrado, tridimensional ou volumétrico.

Uma vez esclarecidas às definições de mapeamento térmico volumétrico, listou-se as características da aplicação dessa técnica em transformadores de potência bem como os benefícios da utilização dessa metodologia nesses equipamentos. Em seguida, foram apresentados os requisitos necessários para a implementação do mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.

De posse das considerações sobre as condições para a aplicação de tal mapeamento, abordaram-se as ferramentas que, a princípio, possibilitariam alcançar os requisitos necessários para o bom emprego dessa metodologia. Assim, dividiu-se este trabalho em três frentes de investigação tecnológica, a saber:

- 1°. Sensores de temperatura convencionais, abordados os termopares e termorresistores;
- 2°. Sensores de temperatura pontuais em fibras ópticas, especificamente FBG e decaimento fluorescente;
- 3°. Sensores de temperatura distribuídos em fibras ópticas, sobretudo os baseados nos espalhamentos de luz Rayleigh, Raman e Brillouin.

Diversas aplicações em transformadores dessas tecnologias foram citadas no Capítulo 4 deste trabalho. E, de acordo com as informações exibidas nesse mesmo capítulo somadas as obtidas por meio do Capítulo 3, foram possíveis escalar as tecnologias que apresentaram habilitação para operar segundo as primícias do mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.

Definida a utilização dos sistemas FBG, DTS e DTSS para o mapeamento volumétrico em questão, partiu-se, primeiramente, para a comparação dos esquemas de instalação e das características técnicas dos sensores previamente selecionados para aplicação em tal mapeamento. Por fim, de posse dos esquemáticos de instalação e das informações técnicas e, agregando-se os valores financeiros dos equipamentos e dispositivos

que compõem cada sistema em si, realizou-se uma comparação dos custos relativos de quatro sistemas projetados para o mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência.

Através dos resultados obtidos por meio das comparações dos custos de cada sistema projetado e, levando-se em conta as características técnicas de cada tecnologia, pode-se concluir:

- **Sistema 1 – FBG:**

- 1°. Esse sistema apresenta o menor custo entre as configurações listadas neste trabalho;
- 2°. O tempo de leitura total obtido para esse sistema é de 6 segundos, sendo o menor valor comparado aos outros sistemas citados;
- 3°. Pode-se obter 240 regiões sensores através da utilização de 6 fibras ópticas contendo, cada uma, 40 sensores FBG;
- 4°. As características frente ao número de pontos de medição do sistema 1 são de 100 e 200 vezes menores em comparação aos sistemas 2 e 4, respectivamente;

- **Sistema 2 – DTSS Brillouin:**

- 1°. Para o sistema 2, utiliza-se de um interrogador de dois canais operando com um multiplexador de 8x2 canais, contendo 4 cabos ópticos de 6 km cada um. Com a resolução de 1 m, pode-se obter 24.000 regiões de medição de temperatura;
- 2°. O tempo de aquisição desse sistema é coerente com as necessidades de mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência;
- 3°. Em termos de confiabilidade, esse sistema perde 25 % de região de monitoramento se um dos cabos ópticos for danificado. Tal fato ocorre supondo a instalação dos cabos em locais distintos;
- 4°. O custo desse sistema é extremamente competitivo em comparação ao sistema DTS Raman;

- **Sistema 3 – FBG:**

- 1°. Esse sistema apresenta capacidade de operação em longos comprimentos de região sensora, 20 *km* aproximadamente, contendo um sensor a cada metro;
- 2°. A redundância do número de fibras encontradas nesse sistema é extremamente elevada. Desse modo, há o inconveniente da disposição da elevada quantidade de cabos ópticos dentro do transformador, principalmente nas bobinas do equipamento e no percurso bobina até o tanque do transformador;
- 3°. Obviamente, o elevado número de fibras ópticas implica em um elevado número de conectores instalados no tanque do transformador. No caso, o sistema 3 opera com 512 conexões ópticas;
- 4°. Do mesmo modo, o número de equipamentos multiplexadores bem como dos seus canais tem que ser muito elevado para que se possa interrogar a quantidade de fibras propostas;
- 5°. Mesmo com a elevada quantidade de guias ópticos interrogados, o tempo de aquisição total dos sistemas FBG propostos é satisfatório para aplicação em transformadores;
- 6°. Em relação aos custos desse sistema, nota-se que os valores foram extremamente elevados devido ao alto número de equipamentos e dispositivos utilizados e, principalmente, devido ao custo das fibras ópticas contendo sensores FBG.

- **Sistema 4 – DTS Raman:**

- 1°. O sistema DTS Raman apresentado neste trabalho tem capacidade de operar sob longos comprimentos de regiões sensoras. Nota-se que se utiliza um interrogador capaz que realizar a leitura dos sinais retroespalhados em uma fibra de até 8 *km*. Com a utilização de diversos canais do multiplexador incorporado ao interrogador, foi possível alcançar 24 *km* de região sensora;
- 2°. O cabo óptico utilizado nos sistemas DTS Raman possui duas fibras ópticas multimodo, ou seja, apresenta redundância de 100 % em relação aos guias

ópticos. São utilizados 3 cabos ópticos, contendo assim 6 fibras ópticas no sistema como um todo;

- 3°. Em termos de confiabilidade, esse sistema perde 33,3% de região de monitoramento se um dos cabos ópticos for danificado. Tal fato ocorre supondo a instalação dos cabos em locais distintos;
- 4°. A resolução espacial de 0,5 m possibilita um número elevado de regiões sensoras ao longo do guia de onda;
- 5°. O tempo de aquisição total desses sistemas é condizente com as necessidades de monitoramento de transformadores de potência.
- 6°. O custo total desse sistema se mostra fortemente competitivo em relação ao sistema DTSS Brillouin.

Com base nas considerações supracitadas, conclui-se que o sistema FBG pode ser utilizado para a proposta deste trabalho, no entanto, em escalas de menor resolução volumétrica como um todo. Já os sistemas DTS Raman e DTSS Brillouin podem ser empregados para o mapeamento volumétrico completo devido às características de longo alcance e grande quantidade de regiões sensoras atingidas. Por outro lado, a aplicação de um sistema FBG com uma grande quantidade de sensores, tal qual o sistema 3, é extremamente inviável economicamente.

6.2 Trabalhos Publicados

Por meio da realização deste trabalho, conseguiu-se a publicação e apresentação de um artigo no POF 2011 (*The 20th International Conference on Plastic Optical Fibers*) e uma aceitação para publicação no ISEI 2012 (*IEEE International Symposium on Electrical Insulation*), respectivamente intitulados como:

- *System Proposition for Mapping Temperature and Mechanical Deformation in Power Transformers Based on Optical Fiber Sensing;*
- *System Proposition to Monitor the Insulation Temperature and to Calculate of Transformer Life Cycle.*

6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Nesse item, abordam-se alguns tópicos relacionados ao tema de mapeamento térmico volumétrico para o desenvolvimento de posteriores trabalhos, conforme listados a seguir:

- **Investigação da rigidez dielétrica:** A fibra óptica e os dispositivos que constituem os cabos ópticos apresentados neste trabalho são constituídos por materiais dielétricos. No entanto, dependendo da disposição do guia de onda dentro do transformador e da quantidade de cabeamento óptico utilizado, pode-se diminuir a rigidez dielétrica do meio. Sendo assim, um trabalho extremamente importante pode ser realizado através da investigação do valor da tensão disruptiva considerando-se transformadores com e sem a presença de cabeamento óptico;
- **Análise econômica:** Neste trabalho, foram apresentados custos comparativos de sistemas aplicados ao mapeamento térmico em questão. No entanto, pode-se realizar uma análise econômica completa dos diversos sistemas cabíveis ao mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência, do custo desses sistemas em comparação aos custos dos transformadores e do impacto econômico no processo de manufatura do transformador utilizando-se as técnicas de mapeamento neste trabalho descritas;
- **Análise técnicas:** Embora o sensoriamento via fibras ópticas possua dimensões bastante reduzidas, a utilização de diversos cabeamentos ópticos e sensores pode impactar no aumento das dimensões de bobina e, conseqüentemente, do transformador. Assim, faz-se necessário investigar os parâmetros de projeto que podem alterar com a inserção das fibras no equipamento;
- **Instalação propriamente dita dos sistemas de mapeamento térmico volumétrico em transformadores de potência;**
- **Uma vez realizado o monitoramento térmico volumétrico, obter um estudo mais preciso sobre a vida útil técnica e econômica, de acordo com o carregamento, em transformadores.**

Referências Bibliográficas

AGRAWAL, G. P.; KELLEY, P. L.; KAMINOW, I. P. *Nonlinear Fiber Optics*. California: Academic Press, 2001. 481 p.

AIZAWA, H.; KATSUMATA, T.; KOMURO, S.; MORIKAWA, T.; ISHIZAWA, H.; TOBA, E. Fiber-Optic Thermometer for High Temperature Measurement. *In: SICE-ICASE International Joint Conference, Korea, IEEE, 2006*.

ALLIL, R. C. S. B. Sensores a Fibra Óptica com Tecnologia FBG para Medida de Temperatura e Alta Tensão. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução N° 513, de 16 de Setembro de 2002.

ANSY. Disponível em <<http://www.ansys.com>>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2012.

APSENSING. *Distributed Temperature System DTS Data Sheet*. Disponível em <<http://www.apsensing.com>>. Acesso em: 22 de agosto de 2011.

AUGOUSTI, A.; GRATAN, K.; PALMER, A. A Laser-pumped Temperature Sensor Using the Fluorescent Decay Time of Alexandrite. *In: Journal of Lightwave Technology, IEEE, 1987*.

BASS, M.; STRYLAND, E. W. V. *Fiber Optics Handbook*. New York: McGRAW-HILL, 2002. 398 p.

BORTONI, E. C.; MOLINA, R. V.; CRAVEIRO, M.; TAKAHASHI, R. Tecnologias de Sensores Ópticos para o Monitoramento de Pontos Quentes em Transformadores. *In: Décimo Segundo Encontro Regional ibero-americano do CIGRÉ*, Foz do Iguaçu, Brasil, 2007.

BOYD, C. D.; DICKERSON, B. D.; FITZPATRICK, B. K. Monitoring Distributed Temperatures Along Superconducting Degaussing Cables via Rayleigh Backscattering in Optical Fibers. *In: Proceedings of the Intelligent Ships Symposium IX*, Philadelphia, USA, 2011.

CALDAS, P. S. A. *Sensores de Fluorescência em Fibra Óptica*. 2003. 201f. Dissertação – Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2003.

CHESTER, A. N. *Optical Fiber Sensors*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1987. 471p.

CULVERHOUSE, D.; FARAH, F.; PANNELL, C.N.; JACKSON, D.A. Potential of Stimulated Brillouin Scattering as Sensing Mechanism for Distributed Temperature Sensors. *In: Electronics Letters, IEEE*, 1989.

DAKIN, J. P. Distributed Optical Fibre Sensors. *In: Optoelectronics Research Centre, University of Southampton*, 1990.

DAKIN, J. P.; PRATT, D. J.; BIBBY, G. W.; ROSS, J. N. Distributed Optical Fiber Raman Temperature Sensor Using a Semiconductor Light Source and Detectors. *In: IEEE Electronic Letters, VOL. 21*, 1988.

DALZELL, C. J.; HAN, T. P. J.; RUDDOCK, I. S.; HOLLIS, D. B. Two-Photon Excited Fluorescence in Rare-Earth Doped Optical Fiber for Applications in Distributed Sensing of Temperature. *In: IEEE Sensors Journal, Vol. 12, N°. 1*, 2012.

DECUSATIS, C. Handbook of Fiber Optic Communication. New York: Academic Press, 2002. 854 p.

DOWNES, J.; LEUNG, H. Y. Distributed Temperature Sensing Worldwide Power Circuit Monitoring Applications. *In: International Conference on Power system Technology – POWERCON*, 2004.

ELLIOTT, B.; GILMORE, M. *Fiber Optic Cabling*. Oxford: Newnes, 2002. 334 p.

ELMOUDI, A. Thermal Modeling and Simulation of Distribution Transformers. *In: 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, IEEE*, 2008.

FIBER SENSING. FS3300 – Temperature Sensors High Performance FBG Temperature Sensors. Disponível em <<http://www.fibersensing.com>>. Acesso em: 09 de maio de 2011.

FRAZÃO, O.; ARAÚJO, F. M.; DIAS, I.; FERREIRA, L. A.; SANTOS, J. L. Sensores de Bragg em Fibra Óptica. *In: INESC Porto*, Portugal, 2006.

FRAZÃO, O.; CORREIA, C.; GIRALDI, M. T. M. R.; MARQUES, M. B.; SALGADO, H. M.; MARTINEZ, M. A. G.; COSTA, J. C. W. A.; BARBERO, A. P.; BAPTISTA, J. M. Stimulated Raman Scattering and its Applications in Optical Communications and Optical Sensors. *In: The Open Optical Journal*, 2009.

GOUVEIA, C. A. J. Sensores em Fibra Óptica para Monitorização Ambiental. 2008. 123f. Dissertação – Departamento de Matemática e Engenharias, Universidade da Madeira, Portugal, 2008.

GRATTAN, K. T. V.; MEGGITT, B. T. *Optical Fiber Sensor Technology – Fundamentals*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. 335 p.

GRATTAN, K. T. V.; PALMER, A. W. Infrared Fluorescence “Decay-time” Temperature Sensor. *In: Review of Scientific Instruments, IEEE*, 1985.

GUPTA, B. D. *Fiber Optic Sensors: Principles and Applications*. New Delhi: NIPA, 2006. 279 p.

HANAMI, N.; KATSUMATA, T.; AIZAWA, H.; HONDA, M.; SHIBASAKI, M.; OTSUBO, K.; KOMURO, S. Fluorescence Thermometer Based on Luminescence Imaging of Garnet Sensor. *In: International Conference on Control, Automation and Systems*, 2008.

HEATHCOTE, M. J. *J&P Transformer Book*. Oxford: Elsevier Ltd Co., 2007. 969p.

HORIGUCHI, T.; KURASHIMA, T.; TATEDA, M. Tensile Strain Dependence of Brillouin Frequency Shift in Silica Optical Fibers. *In: IEEE Photonics Technologies Letters*, 1989.

IEC 60076-2 International Standard. Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers, 2011.

INAUDI, D.; GLISIC, B. Distributed Fiber Optic Strain and Temperature Sensing for Structural Health Monitoring. *In: The Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, Porto, Portugal, 2006.

INAUDI, D.; GLISIC, B. Integration of Distributed Strain and Temperature Sensors in Composite Coiled Tubing. *In: SPIE Smart Structures and Materials Conference*, San Diego, USA, 2006.

ISLAM, M. N. Raman Amplifiers for Telecommunications 1 – Physical Principles. New York: Springer, 2004. 307 p.

KEE, H.H.; LEES, G.P.; NEWSON, T.P. Technique for Measuring Distributed Temperature with 35-cm Spatial Resolution Utilizing the Landau-Placzek Ratio. *In: Photonics Technology Letters, IEEE*, 2000.

KIM, M.; LEE, J. H.; KOO, J. Y.; SONG, M. A Study on Internal Temperature Monitoring System for Power Transformer using Optical Fiber Bragg Grating Sensors. *In:*

Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Yokkaichi, Mie, Japan, 2008.

KREGER, S. T.; GIFFORD, D. K.; FROGGATT, M. E.; SOLLER, B. J.; WOLFE, M. S. High Resolution Distributed Strain or Temperature Measurements in Single- and Multi-mode Fiber Using Swept- Wavelength Interferometry. *In: Luna Technologies*, Blacksburg, USA, 2005.

LI, J.; JIANG, T.; GRZYBOWSKI, S. Hot spot Temperature Models Based on Top-oil Temperature for Oil Immersed Transformers. *In: Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE*, 2009.

LIN, Y.; WANG, W. A Novel Fiber Bragg Grating Sensor with Temperature Compensation. *IN: IEEE*, 2009.

LUNA TECHNOLOGIES. *Optical Backscatter Reflectometer*. Disponível em <<http://www.lunatechnologies.com>>. Acesso em: 22 de agosto de 2011.

LUNDQUIST, T.; KNUTH, W. Finally Fiber Optic Sensing of Power Transformer "Hotspots" Is Paying Off. *In: International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 2008.

MALEEWAT, P.; TADSUAN, S.; SAELEE, V.; CHOMPOO-INWAI, C. Oil-Immersed Transformer temperature Monitoring by ANSI/IEEE C57.91 Model. *In: 8th Power Engineering Conference (IPEC 2007), IEEE*, 2007.

MAMIZADEH, A.; ISKENDER, I. Analyzing and Comparing Thermal Models of Indoor and Outdoor Oil-Immersed Power Transformers. *In: IEEE Bucharest Power Tech Conference*, Bucharest, Romania, 2009.

MARQUES FILHO, L. A. *Sensores de Temperatura Baseado em Fluorescência Utilizando Fibra Óptica Plástica (POF)*. 2006. 149f. Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

MCNUTT, W. J.; MCIVER, J. C.; LEIBINGER, G. E.; FALLON, D. J.; WICKERSHEIM, K. A. Direct Measurement of Transformer Winding Hot Spot Temperature. *In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1984.

MICRON OPTICS. *Non-metallic Temperature Sensor*. Disponível em <<http://www.micronoptics.com>>. Acesso em: 22 de Agosto de 2011.

MINARDO, A. Fiber-Optic Distributed Strain/Temperature Sensors Based on Stimulated Brillouin Scattering. Tese – Segunda Universita' Degli Studi di Napoli, Napoli, Itália, 2003.

MOREY, W. W.; MELTZ, G.; GLENN, W. H. Fiber Optic Bragg Grating Sensors. *In: SPIE – Fiber Optic and Laser Sensors VII*, 1989.

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*. Disponível em <<http://photojournal.jpl.nasa.gov>>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2012a.

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*. Disponível em <<http://photojournal.jpl.nasa.gov>>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2012b.

NBR 5380. Transformador de Potência – Método de Ensaio. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Maio de 1993.

NIKLES, M. Fibre Optic Distributed Scattering Sensing System: Perspectives and Challenges for High Performance Applications. *In: Micron Optics*, 2007.

NORTON, E. T.; WICKERSHEIM, K. A.; SUN, M. H. Improved Fiberoptic Temperature Measurement System for Monitoring Winding Temperatures in Medium and Large Transformers. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, N° 3*, 1987.

OMINISENS. *SDITEST STA-R Data Sheet*. Disponível em <<http://www.omnisens.ch>>. Acesso em: 22 de agosto de 2011.

OZOPTICS. *Foresight™ Series Data Sheet*. Disponível em <<http://www.ozoptics.com>>. Acesso em: 22 de agosto de 2011.

PARENTONI, M. F. C. *Análise Experimental do Acréscimo de Perdas Elétricas Devido à Circulação de Correntes Distorcidas*. 2010. 155f. Tese – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil.

PARKER, T.R.; FARHADIROUSHAN, M.; FECED, R.; HANDEREK, V.A.; ROGERS, A.J. Simultaneous Distributed Measurement of Strain and Temperature from Noise-initiated Brillouin Scattering in Optical Fibers. *In: Journal of Quantum Electronics, IEEE*, 1998.

PARKER, T.R.; FARHADIROUSHAN, M.; HANDEREK, V.A.; ROGER, A.J. A Fully Distributed Simultaneous Strain and Temperature Sensor Using Spontaneous Brillouin Backscatter. *In: Photonics Technology Letters, IEEE*, 1997.

PARKER, T.R.; FARHADIROUSHAN, M.; HANDEREK, V.A.; ROGERS, A.J. The Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Distributions from Brillouin Backscatter. *In: Optical Techniques for Smart Structures and Structural Monitoring, IEEE, 1997.*

PICANÇO, A. F. *Desenvolvimento de uma Metodologia para a Aplicação de Transformadores Eficientes com Base nos Perfis de Carregamento.* 2009. 267f. Tese – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil.

PIERCE, L. W. An Investigation of the Temperature Distribution in Cast-Resin Transformer Windings. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, 1992b.*

PIERCE, L. W. An Investigation of the Thermal Performance of an Oil Filled Transformer Winding. *In: IEEE Transactions on Power Delivery, 1992a.*

RAO, Y.; WEBB, D. J.; JACKSON, D. A.; ZHANG, L.; BENNION, I. In-Fiber Bragg-Grating Temperature Sensor System for Medical Applications. *In: Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, N° 5, 1997.*

RIBEIRO, A. B. L. *Esquemas de Multiplexagem de Sensores de Fibra Óptica.* 1996. 225f. Tese – Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1996.

RIBEIRO, A. B. L.; EIRA, N. F.; SOUSA, J. M.; GUERREIRO, P. T.; SALCEDO, J. R. Multipoint Fiber-Optic Hot-Spot Sensing Network Integrated Into High Power Transformer for Continuous Monitoring. *In: IEEE Sensors Journal, 2008.*

RIBEIRO, J. A. J. *Comunicações Ópticas.* São Paulo: Editora Érica, 2005. 454 p.

RIGHINI, G. C.; TAJANI, A.; CUTOLO, A. *An Introduction to Optoelectronic Sensors.* London: Word Scientific, 2009. 585 p. (Series in Optics and Photonics – Vol. 7).

ROSSETTO, J. F. Sensores Distribuídos Utilizando Efeitos não-Lineares em Fibras Ópticas para a Aplicação em Estruturas Inteligentes. Tese – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2004.

RUDDOCK, I. S.; HAN, T. P. J. Continuously Distributed Sensing via Two Photon Excited Fluorescence in Doped Optical Fibre. *In: Journal of Physics Conference Series 15, 2005.*

SANG, A. K.; GIFFORD, D. K.; DICKERSON, B. D.; FIELDER, B. F.; FROGGATT, M. E. One Centimeter Spatial Resolution Temperature Measurements in a

Nuclear Reactor Using Rayleigh Scatter in Optical Fiber. *In: IEEE Sensors Journal, Vol. 8, N° 7, 2008.*

SENSORNET. *Sentinel DTSTM Data Sheet.* Disponível em <<http://www.sensornet.co.uk>>. Acesso em: 22 de agosto de 2011.

SILVA, J. C. C.; MARTELLI, C.; DIESEL, B. W.; FABRIS, J. L.; KALINOWSKI, H. J.; GOOTHOFF, N.; CANNING, J. Termômetro de Alta Temperatura (0-400 °C) baseado em Redes de Bragg em Fibra Ótica para Aplicação no Setor de Petróleo. *In: III Seminário Nacional de Controle e Automação, Salvador, Brasil, 2003.*

SOLLER, B. J.; FROGGATT, M. E.; GIFFORD, D. K.; WOLFE, M. S. Measurement of Localized Heating in Fiber Optic Components with Millimeter Spatial Resolution. *In: Luna Technologies, Blacksburg, USA, 2006.*

SOLOMAN, S. *Sensors Handbook.* New York: Mc Graw Hill, 2010. 1424 p.

SOUSA, C. V. *Projeto e Montagem de uma Bancada Regenerativa para Ensaio de Carregamento em Transformadores de Potência.* 2011. 236f. Tese – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

STODDART, P. R.; CADUSCH, P. J.; PEARCE, J. B.; VUKOVIC, D.; NAGARAJAH, C. R.; BOOTH, D. J. Fibre Optic Distributed Temperature Sensor with an Integrated Background Correction Function. *In: Measurement Science and Technology, 2005.*

STOLEN, R. H.; IPPEN, E. P. Raman Gain in Glass Optical Waveguide. *In: Application Physical Letter, 1973.*

STOLEN, R. H.; IPPEN, E. P.; TYNES, A. R. Raman Oscillation in Glass Optical Waveguides. *In: Application Physical Letter, 1972.*

TEUNISSEN, J.; HELMIG, C.; MERTE, R. PEIER, D. Fiber Optical On-Line Monitoring for High-Voltage Transformers. *In: Proceedings of SPIE, Fiber Optic Sensor Technology II, 2001.*

TEUNISSEN, J.; MERTE, R.; PEIER, D. Stability of Fiber Bragg Grating Sensors for Integration into High-Voltage Transformers for Online Monitoring. *In: Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, IEEE, 2002.*

THERMOMAX. Disponível em <<http://thermomax.com.br>>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2012.

THÉVENAZ, L. *Advanced Fiber Optics – Concepts and Technology*. New York: CRC Press, 2011. 394 p.

UKIL, A.; BRAENDLE, H.; KRIPPNER, P. Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications. *IN: IEEE*, 2011.

WAIT, P.C.; HARTOG, A.H. Spontaneous Brillouin-based Distributed Temperature Sensor Utilizing a Fiber Bragg Grating Notch Filter for the Separation of the Brillouin Signal. *In: Photonics Technology Letters, IEEE*, 2001.

WEBB, D.J.; LECOEUQUE, V.; HATHAWAY, M.W.; PANNELL, C.N.; JACKSON, D.A. 20 km Distributed Temperature Sensor Utilising Spontaneous Brillouin Scattering. *In: Lasers and Electro-Optics Europe, IEEE*, 2000.

WEI-GEN, C.; JUN, L.; YOU-YUAN, W.; LIU-MING, L.; JIAN-BAO, Z.; YAN-FENG, Y. The Measuring Method for Internal Temperature of Power Transformer Based on FBG Sensors. In: 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China, 2008.

WICKERSHEIM, K.A.; ALVES, R.V. A New Optical Technique for the Measurement of Temperature in RF and Microwave Fields. *In: Microwave Symposium Digest, IEEE*, 1981.

YIN, S.; RUFFIN, P. B.; YU, F. T. *Fiber Optic Sensors*. New York: CRC Press, 2008. 494 p.

YU, D.; JING, L.; SHENGBIN, W.; AIDE, Z.; HESAN, Z.; CHAO, Z. Study on On-line Monitoring of Temperature of Transformer Winding Based on Distributed Fiber Optical Temperature Sensing Technology. *In: IEEE*, 2006.

YU, F. T. S; YIN, S. *Fiber Optic Sensors*. New York: DEKKER, 2008. 494 p.

ZIMMERMANN, A. C.; VEIGA, L. N.; TONDELLO, G. F.; SOUZA, M. M. S.; MARTINS, R. H.; ZIMMERMANN, R. Sensores Baseados em Redes de Bragg e Fibras Ópticas para Medição de Grandezas em Sistemas Elétricos de Alta Tensão. *In: Universidade Federal de Santa Catarina*, 2007.