

COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA EM UM SENSOR ÓPTICO-ELÉTRICO PARA
MEDIDAS DE TENSÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Bessie de Assumpção Ribeiro

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Rio de Janeiro
Agosto de 2015

COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA EM UM SENSOR ÓPTICO-ELÉTRICO PARA
MEDIDAS DE TENSÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Bessie de Assumpção Ribeiro

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph.D.

Prof. Rubens de Andrade Júnior, D.Sc.

Prof. Isabel Cristina dos Santos Carvalho, D.Sc.

Dr^a. Regina Célia da Silva Barros Allil, D.Sc.

Prof. José Brant de Campos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
AGOSTO DE 2015

Ribeiro, Bessie de Assumpção

Compensação de temperatura em um sensor óptico-elétrico para medidas de tensão em linhas de transmissão/ Bessie de Assumpção Ribeiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XVIII, 187 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 119-127.

1. Sensor óptico-elétrico. 2. Redes de Bragg. 3. Compensação de Temperatura. 4. Filtro Óptico Sintonizável de FBG 5. Cerâmicas Piezoelétricas. I. Werneck, Marcelo Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha avó materna Orvalina Marques (*in memoriam*) por ter sido sempre um porto seguro em minha vida, minha amiga e confidente. Agradeço à Deus a oportunidade de ter convivido tanto tempo ao seu lado. Saudades...

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus por seu amor incondicional e pelo imenso cuidado com a minha vida. Sem Ti Deus eu nada poderia fazer, pois eu não sou, não tenho e não posso, mas Tú és, Tú tens e Tú podes.

Aos meus pais Hamilton e Jurema e minhas irmãs Luândá e Bianca, por compartilharem comigo meus sonhos, as lutas e os sucessos. Ao Janus por me proporcionar momentos de alegria durante a realização deste trabalho.

Ao meu orientador e amigo, Professor Marcelo Martins Werneck, pela parceria, paciência, otimismo e por mais uma vez ter acreditado em mim. Por seus ensinamentos, sua orientação e seu encorajamento diário. Por transpor comigo os obstáculos surgidos ao longo deste trabalho e por se alegrar com as vitórias alcançadas. Muito obrigada!

Agradeço a toda equipe de funcionários, colaboradores e alunos do LIF que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA EM UM SENSOR ÓPTICO-ELÉTRICO PARA MEDIDAS DE TENSÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Bessie de Assumpção Ribeiro

Agosto/2015

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Programa: Engenharia Elétrica

O aumento da demanda por energia tem levado à expansão contínua das Linhas de Transmissão (LTs) e distribuição. Dentro do setor elétrico, os sensores FBG (Fiber Bragg Grating) tem se apresentado como uma tecnologia viável para utilização em sistemas de medição e monitoramento, com confiabilidade e a segurança dos sistemas. Embora as redes de Bragg surjam como uma alternativa atraente dentro do mercado de energia elétrica, alguns fatores limitam o seu uso em aplicações práticas. Um desses fatores é a dificuldade na discriminação entre as variações de temperatura e strain sofridas simultaneamente pela FBG. Nesta tese é proposto o desenvolvimento e a construção de um sensor óptico-elétrico insensível à temperatura que funcionará como um Transformador de Potencial Óptico (TPO) usado para medir e monitorar as LTs. O sensor desenvolvido é baseado na tecnologia FBG aliada à tecnologia das cerâmicas piezoelétricas (PZT). Foram seguidas duas linhas de compensação térmica. A primeira proposta sugere uma compensação passiva do sensor FBG-PZT, combinando nas partes da sua construção materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica e variando seus comprimentos. A segunda proposta contempla a construção de um filtro óptico sintonizável baseado em redes de Bragg e controlado por temperatura. Nesta configuração uma FBG Filtro (FBG-F) é empregada e atuará como um filtro sintonizável termicamente, acoplado a um módulo termoelétrico (MTE). A sintonia do comprimento de onda de Bragg é realizada induzindo as variações de temperatura na FBG colada sobre o MTE, fazendo-o resfriar ou aquecer conforme uma referência de temperatura. Espera-se com o desenvolvimento do sensor FBG-PZT insensível à temperatura a confiabilidade e a precisão nas medidas realizadas dentro do setor elétrico.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

TEMPERATURE COMPENSATION IN AN OPTICAL-ELECTRIC SENSOR FOR
VOLTAGE MEASUREMENTS IN TRANSMISSION LINES

Bessie de Assumpção Ribeiro

August/2015

Advisor: Marcelo Martins Werneck

Department: Engenharia Elétrica

The increase in energy demand has led to continued expansion of Transmission Lines (TLs) and distribution. Within the energy sector, the FBG sensors (Fiber Bragg Grating) has emerged as a viable technology for use in measurement and monitoring systems with reliability and security systems. Although Bragg gratings emerge as an attractive alternative in the electricity market, some factors limit their use in practical applications. One such factor is the difficulty in discriminating between variations in temperature and strain simultaneously experienced by the FBG. This thesis proposed the development and construction of an optical-electric sensor insensitive to temperature that will work as an Optical Voltage Transformer (OVT) used to measure and monitor TLs. The developed sensor is based on FBG technology combined with the technology of piezoelectric ceramics (PZT). Were followed two lines of temperature compensation. The first proposal suggests a passive compensation of FBG-PZT sensor combining the parts of construction materials with different thermal expansion coefficients and by varying their lengths. The second proposal involves the construction of a tunable optical filter based on Bragg gratings and controlled by temperature. In this configuration one FBG Filter (FBG-F) is employed and will act as a tunable filter thermally coupled to a thermoelectric module (TEM). The tuning of the Bragg wavelength is carried out by inducing temperature changes in the FBG bonded to the TEM, causing it to cool or heat as a temperature reference. It is hoped that the development of FBG-PZT sensor insensitive to temperature brings reliability and accuracy in measurements within the electricity sector.

Sumário

Sumário.....	viii
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas	xvi
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xvii
Capítulo 1. Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Contextualização e Descrição do Problema.....	2
1.3 Objetivos e Descrição do Projeto.....	4
1.4 Estrutura da Tese.....	5
Capítulo 2. Fundamentação Teórica.....	7
2.1 Princípio de operação dos sensores FBG.....	7
2.2 Sensibilidade da FBG à temperatura e ao strain.....	8
2.2.1 FBG ao strain.....	8
2.2.2 FBG à temperatura.....	9
2.3 Dependência à temperatura de uma FBG colada em diferentes materiais.....	10
Capítulo 3. Revisão Bibliográfica.....	13
3.1 O Estado da arte do segmento de sensores em redes de Bragg.....	13
3.2 O Estado da arte das propostas de compensação de temperatura em redes de Bragg.....	14
3.3 Influência da fixação dos sensores FBG nas respostas de strain.....	22
Capítulo 4. Projeto de construção do sensor FBG-PZT.....	24
4.1 Teoria da Piezoeletrecidade.....	24
4.2 Estado da arte em sensores híbridos FBG-PZT.....	26
4.3 Projeto do sensor FBG-PZT.....	28
4.3.1 Método de fixação da FBG no arranjo mecânico através do processo de metalização.....	30
4.3.2 Fixação da FBG usando um parafuso de fixação.....	34
4.3.3 Fixação da pilha de cerâmicas PZT.....	38
4.3.4 Mecanismo de sintonia mecânica através do ajuste do λ_B	39
Capítulo 5. Proposta de compensação térmica mecânica.....	42
5.1 Sensibilidade térmica do sensor FBG-PZT.....	42

5.2 Ensaio experimental para a determinação da constante fotoelástica (ρ_e), do coeficiente termo-óptico (η) da fibra e do coeficiente de dilatação térmica da cerâmica PZT-5H.....	44
5.2.1 Determinação da constante fotoelástica (ρ_e) da fibra.....	44
5.2.2 Determinação do coeficiente termo-óptico (η).....	47
5.2.3 Determinação do coeficiente de dilatação térmica da cerâmica PZT-5H.....	50
5.3 Sensibilidade térmica teórica e experimental do sensor FBG-PZT.....	54
5.4 Análise teórica da proposta de compensação térmica do sensor FBG-PZT.....	58
5.5 Resultado experimental do sensor FBG-PZT com compensação de temperatura.....	60
Capítulo 6. Proposta de compensação térmica por meio da sintonia de uma FBG filtro.....	65
6.1 Filtros Ópticos Sintonizáveis.....	65
6.2 Implementação usando Redes Gêmeas.....	67
6.3 Projeto de compensação térmica aplicando a técnica de redes gêmeas....	69
6.3.1 As células termoeletricas.....	70
6.3.2 Arranjo mecânico FBG+MTE+Substrato.....	73
6.3.3 Circuito de Potência.....	77
6.3.4 Projeto do Controlador.....	78
6.3.5 Resposta Experimental do funcionamento do Filtro Sintonizável de FBG.....	81
6.4 Resposta experimental do funcionamento do filtro com rede gêmea.....	83
6.5 Algoritmo de Otimização.....	87
6.6 Sintonia do filtro sintonizável FBG-F em medidas dinâmicas.....	90
6.7 Estudo da resposta de sensibilidade usando entre os esquemas de demodulação com Filtro de Fabry-Perot e com Redes Gêmeas.....	92
6.8 Cálculo da Distorção Harmônica Total usando o Matlab.....	94
Capítulo 7. Resultados e discussão do sensor FBG-PZT em alta tensão.....	96
7.1 Sensibilidade do sensor FBG-PZT submetido à tensão CC sem compensação de temperatura.....	96
7.2 Influência da temperatura na resposta do sensor FBG-PZT submetido à tensão CA sem compensação de temperatura.....	101
7.3 Resposta do sensor FBG-PZT com compensação de temperatura e submetido à tensão CA.....	105

7.3.1 Resposta da tensão de saída CA do sensor FBG-PZT com compensação de temperatura e demodulado com a rede filtro FBG-F.....	105
7.3.2 Resposta da tensão de saída CA do sensor FBG-PZT com compensação de temperatura e demodulado com o filtro de Fabry-Perot (FFP).....	109
7.4 Resposta do sensor FBG-PZT com sintonia através do módulo termoelétrico (MTE).....	113
Capítulo 8. Conclusões e trabalhos futuros.....	116
Referências Bibliográficas.....	119
Anexos.....	128

Lista de Figuras

Figura 2.1: Resultado teórico da variação do λ_B em função da temperatura para uma FBG colada em diferentes materiais.....	11
Figura 3.1: Esquema do sensor FBG com compensação de temperatura (adaptado de Li <i>et al.</i> , 2009).....	17
Figura 3.2: Esquema do sensor de pressão com compensação de temperatura (adaptado de Huang <i>et al.</i> , 2013).....	17
Figura 3.3: Esquema do sensor de pressão com compensação de temperatura (adaptado de Hsu <i>et al.</i> , 2006).....	18
Figura 3.4: Seção transversal do dispositivo de compensação térmica (adaptado de YOFFE <i>et al.</i> , 1995).....	19
Figura 3.5: Esquema do dispositivo de compensação de temperatura para redes de Bragg (adaptado de HSUN <i>et al.</i> , 1995).....	20
Figura 3.6: Seção transversal do sistema cilíndrico de compensação de temperatura (adaptado de LIN, 2001).....	21
Figura 3.7: a) Dispositivo para guiar a fibra b) Espaçador para compensação de temperatura (adaptado de Zu <i>et al.</i> , 2006).....	21
Figura 4.1: Efeito Piezoelétrico Direto e Reverso.....	24
Figura 4.2: Configuração inicial do sensor FBG-PZT. (adaptado de RIBEIRO, <i>et al.</i> , 2011).....	29
Figura 4.3: Resistência do adesivo Loctite 416 TM (Brasil) ao calor.....	29
Figura 4.4: FBG colada usando um adesivo Epóxi.....	31
Figura 4.5: Alvo com o cobre posicionado.....	32
Figura 4.6: Setup experimental do sistema de ablação a laser.....	32
Figura 4.7: Microscopia eletrônica da seção transversal de uma FBG coberta com cobre.....	33
Figura 4.8: Curva da sensibilidade térmica da DTG antes e após o processo de metalização.....	34
Figura 4.9: Parafuso rosqueado em latão para fixação da FBG.....	35
Figura 4.10: Fotopolimerizador <i>Kavo Poly 600</i>	36
Figura 4.11: Detalhes da ponteira de fibra óptica.....	36
Figura 4.12: Fixação da FBG no parafuso de latão.....	38
Figura 4.13: Vista frontal do sensor FBG-PZT com as molas e as barras rosqueadas.....	39

Figura 4.14: Projeto do sensor FBG-PZT.....	40
Figura 4.15: Vista lateral do sensor FBG-PZT construído.....	41
Figura 5.1: Partes da mecânica de construção do sensor FBG-PZT.....	42
Figura 5.2: Montagem experimental do ensaio para determinação da constante fotoelástica (ρ_e).....	46
Figura 5.3: Sensibilidade da FBG à deformação.....	47
Figura 5.4: Montagem experimental para a determinação do coeficiente de dilatação térmica da cerâmica PZT.....	48
Figura 5.5: Sensibilidade da FBG à temperatura.....	49
Figura 5.6: Sensibilidade à temperatura da FBG.....	51
Figura 5.7: Esquemático e fotografia do arranjo “PZT+INVAR+FBG”.....	52
Figura 5.8: Variação no λ_B da FBG em função da temperatura antes e depois de ser colada no arranjo PZT+Invar.....	53
Figura 5.9: Sensor imerso em óleo isolante dentro do banho térmico da <i>Quimis</i>	56
Figura 5.10: Montagem experimental para a determinação da sensibilidade térmica do sensor FBG-PZT.....	56
Figura 5.11: Sensibilidade térmica experimental do sensor FBG-PZT sem compensação térmica.....	57
Figura 5.12: Variação do λ_B em função da temperatura substituindo o parafuso em latão por parafusos feitos de materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica.....	58
Figura 5.12: Parafusos usinados em alumínio, latão, cobre, aço e invar.....	61
Figura 5.13: Sensibilidade térmica do sensor FBG-PZT com compensação de temperatura usando os parafusos de Invar+Alumínio.....	63
Figura 6.1: Estrutura básica de um filtro sintonizável de <i>Fabry-Perot</i> . (Adaptado de KOONEN, 2006).....	66
Figura 6.2: Diagrama esquemático da demodulação de uma única FBG usando o filtro sintonizável de <i>Fabry-Perot</i>	67
Figura 6.3: Diagrama esquemático da técnica de demodulação por redes gêmeas...68	
Figura 6.4: Esquema físico de uma célula peltier. (Adaptado de Salerno, 2010).....	71
Figura 6.5: Peltier HTC-30-10-08.5 (Danvic).....	72
Figura 6.6: Caracterização Temperatura x Tensão do MTE para o processo de resfriamento e aquecimento.....	72
Figura 6.7: Caracterização Temperatura x Corrente do MTE para o processo de resfriamento e aquecimento.....	73
Figura 6.8: Arranjo mecânico: “MTE+FBG”.....	74

Figura 6.9: Sensor de temperatura LM35.....	74
Figura 6.10: Arranjo mecânico: “MTE+FBG”.....	75
Figura 6.11: Desenho e fotografia do arranjo mecânico da implementação do filtro FBG-F.....	75
Figura 6.12: Conversor CC-CC em ponte completa.....	78
Figura 6.13: Carga do conversor CC-CC: filtro LC+MTE.....	78
Figura 6.14: Diagrama de blocos do controle de temperatura.....	79
Figura 6.15: Resposta do controle de temperatura para (a) 20°C e (b) 60°C.....	80
Figura 6.16: Resposta teórica e experimental da variação do λ_B do filtro FBG-F em função temperatura.....	82
Figura 6.17: Curva de histerese para o filtro FBG-F.....	83
Figura 6.18: Diagrama esquemático do <i>setup</i> para os ensaios com o filtro sintonizável FBG-F.....	84
Figura 6.19: Curva espectral da FBG-S e a FBG-F.....	85
Figura 6.20: Curva de interseção entre os espectros de uma FBG-S e do filtro FBG-F, monitorado pelo OSA. A reflexão máxima ocorre quando o λ_B é de 1537.39 nm.....	86
Figura 6.21: Valores da potência óptica de saída em função da temperatura, mostrando o ponto onde a potência é máxima.....	86
Figura 6.22: Curva espectral para o filtro Fabry-Perot, $F_{FFP}(\lambda)$ e a FBG, $F_{FBG}(\lambda)$	88
Figura 6.23: Curva da convolução $F_{FFP}(\lambda)*F_{FBG}(\lambda_B)$	89
Figura 6.24: A derivada da convolução $F_{FFP}(\lambda)*F_{FBG}(\lambda_B)$	90
Figura 6.25: Derivada da convolução entre $F_{FBG-F}(\lambda)*F_{FBG}(\lambda)$	91
Figura 6.26: Excursão do ponto de máxima sensibilidade na curva espectral da convolução do sensor com o FFP e com o FBG-F.....	93
Figura 6.27: Formas de onda na saída do sistema de demodulação do sensor FBG com compensação de temperatura usando o FBG-F e o FFP.....	93
Figura 6.28: Distorção Harmônica Total para os sinais do sensor FBG-PZT.....	94
Figura 7.1: Diagrama esquemático com a montagem experimental para as medidas em tensão CC.....	97
Figura 7.2: Fotografia do <i>setup</i> experimental do sensor imerso em óleo isolante e submetido à alta tensão.....	98
Figura 7.3: Deslocamento do sensor FBG-PZT em função do incremento na tensão CC aplicada aos terminais do sensor.....	98

Figura 7.4: Variação no λ_B em função das variações de tensão CC aplicadas, para diferentes pressões nas molas do sensor FBG-PZT.....	99
Figura 7.5: Deslocamento do no λ_B em função da tensão CC aplicada, para diferentes pressões na mola.....	100
Figura 7.6 Evolução da temperatura em função da tensão CC aplicada aos terminais do sensor FBG-PZT.....	100
Figura 7.7: Diagrama esquemático do <i>set up</i> para os ensaios com tensão CA.....	101
Figura 7.8: Fotografia do setup com os instrumentos usados nos ensaios com tensão CA.....	102
Figura 7.9: Evolução da temperatura em função da tensão CA de 2 kV aplicada aos terminais do sensor FBG-PZT.....	103
Figura 7.10: Resposta experimental do sensor após 05 minutos em operação, em função de uma tensão CA de 2 kV entrada aplicada aos terminais do sensor FBG-PZT. Eixo vertical: 2 V/div (equivalente a 2.0 kV/div). Eixo horizontal: 5 ms/div.....	104
Figura 7.11: Área de interseção entre os espectros de refletância da FBG e do filtro FBG-F.....	105
Figura 7.12: Curva espectral do FBG-Filtro [$F_{FBG-F}(\lambda)$] e da FBG Sensora [$F_{FBG-PZT}(\lambda)$].....	106
Figura 7.13: Curva da convolução entre a FBG Sensora [$F_{FBG-PZT}(\lambda)$] e o filtro FBG-Filtro [$F_{FBG-F}(\lambda)$].....	107
Figura 7.14: A derivada da convolução entre o filtro FBG-Filtro [$F_{FBG-F}(\lambda)$] e FBG Sensora [$F_{FBG-PZT}(\lambda)$].....	107
Figura 7.15: Formas de onda do sensor FBG-PZT na saída do sistema de demodulação usando um FBG-F submetido à tensão CA de 2 kV no início do experimento e após intervalos de 5 minutos até 25 minutos do sensor em operação. Eixo vertical: 1 V/div (equivalente a 2.0 kV/div). Eixo horizontal: 10 ms/div.....	108
Figura 7.16: Curva espectral do λ_B do sensor FBG-PZT no início do ensaio e após o término.....	109
Figura 7.17: Curva espectral a) Filtro Fabry-Perot [$F_{FFP}(\lambda)$] e b) FBG Sensora [$F_{FBG-PZT}(\lambda)$].....	110
Figura 7.18: Curva da convolução entre (a) Filtro Fabry-Perot [$F_{FFP}(\lambda)$] e a FBG Sensora [$F_{FBG-PZT}(\lambda)$].....	111
Figura 7.19: A derivada da convolução entre a FBG-Filtro [$F_{FBG-F}(\lambda)$] e FBG Sensora [$F_{FBG-PZT}(\lambda)$].....	112
Figura 7.20: Formas de onda do sensor FBG-PZT na saída do sistema de demodulação usando o FFP submetido à tensão CA de 2 kV no início do experimento	

e após intervalos de 5 minutos até 25 minutos do sensor em operação. Eixo vertical: 2 V/div (equivalente a 2.0 kV/div). Eixo horizontal: 5 ms/div.....113

Figura 7.21: Diagrama esquemático do *set up* para os ensaios com tensão CA usando o filtro.....114

Figura 7.22: Resposta do sensor FBG-PZT submetido à tensão CA usando o filtro FBG-F construído.....114

Índice de Tabelas

TABELA I. COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA PARA ALGUNS MATERIAIS E A SENSIBILIDADE TÉRMICA TEÓRICA DA FBG COLADA SOBRE ESTES MATERIAIS.....	12
TABELA II. MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS (ATCP, BRASIL) E SUAS RESPECTIVAS PROPRIEDADES.....	26
TABELA III. PARÂMETROS DA FBG PARA O CÁLCULO DA CONSTANTE FOTOELÁSTICA DA FIBRA.....	46
TABELA IV. PARÂMETROS DOS MATERIAIS ENVOLVIDOS NO ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE TERMO-ÓPTICO.....	49
TABELA V. PARÂMETROS DO ARRANJO “FBG+PZT+INVAR”.....	54
TABELA VI. COMPRIMENTO E COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA DOS MATERIAIS ENVOLVIDOS NA CONSTRUÇÃO DO SENSOR FBG-PZT.....	55
TABELA VII. PARÂMETROS DOS MATERIAIS.....	59
TABELA VIII. CÁLCULO DO COMPRIMENTO DOS PARAFUSOS.....	60
TABELA IX. PESO DO SENSOR MONTADO COMBINANDO POSSÍVEIS MONTAGENS DE PARAFUSOS.....	61
TABELA X. PARÂMETROS DA FBG E DA PEÇA EM ALUMÍNIO.....	76
TABELA XI. RESPOSTAS DO AJUSTE LINEAR PARA AS CURVAS DE SENSIBILIDADE TÉRMICA DO FILTRO FBG-F.....	82
TABELA XII. RESPOSTA DA CURVA DE HISTERESE DO FBG-F.....	83
TABELA XIII. PARÂMETROS DA CERÂMICA PZT E DA FBG.....	97

Lista de Abreviaturas e Siglas

AD – Analógico-Digital
ASE – *Amplified Spontaneous Emission*
CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
DHT – Distorção Harmônica Total
DSP - Processador de Sinais Digitais
DTG – *Draw Tower Grating*
FBG – *Fiber Bragg Grating*
FBG-F – *Fiber Bragg Grating-Filtro*
FBG-PZT- *Fiber Bragg Grating- Lead (Plubum) Zirconium Titanate*
FBG-S- *Fiber Bragg Grating-Sensora*
FFP – *Fiber Fabry-Perot Tunable Filter*
IEC – International Eletrotechnical Commission
LED - *Light Emission Diode*
LIF - Laboratório de Instrumentação e Fotônica
LTs - Linhas de Transmissão
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MTE – Módulo Termo- Elétrico
OSA – *Optical Spectrum Analyzer*
P&D – Pesquisa e Desenvolvimento
PID - Proporcional Integral Derivativo
PWM – *Pulse Width Modulation*
PZT- *Lead (Plubum) Zirconium Titanate*
SFOs - Sensores a Fibra Óptica
SMF28 - *Single Mode Fiber 28*
SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
 T_c – Temperatura de Curie
TC – Transformador de corrente
TCOs - Tranformadores de Corrente Ópticos
TIA/EIA – Telecommunication Industry Association/ Electronic Industry Association
TP – Tranformador de potencial
TPOs - Tranformadores de Potencial Ópticos
TPs - Tranformadores de Potencial
U.V – Ultra Violeta

VARIAC – Regulador de Tensão Variável

WDM – *Wave Division Multiplexing*

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 Considerações Iniciais

As intensas transformações sofridas pelo setor elétrico, com o aumento da demanda por energia, têm levado à expansão contínua das Linhas de Transmissão (LTs) e distribuição. Para atender essa demanda, as empresas estão investindo em infraestrutura e na modernização de plantas mais antigas. De acordo com as constatações técnicas do último Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXII SNPTEE), ocorrido em Outubro de 2013, a implantação de LTs e subestações em áreas densamente ocupadas é um grande desafio para o setor elétrico brasileiro. Este período adverso pelo qual passa o setor elétrico contribui para a busca de alternativas atraentes, tanto do ponto de vista técnico quanto do ponto de vista econômico, para atender aos processos de geração e transmissão de energia elétrica, a otimização da planta, além de permitir sua integração com os sistemas existentes.

Os Transformadores de Instrumentação (Instrument Transformers) são equipamentos indispensáveis em subestações. Eles são divididos em Transformadores de Potencial (TPs) e Transformadores de Corrente (TCs) sendo utilizados em medidas de corrente e tensão para fins de monitoramento, tarifação e proteção. Embora esses equipamentos venham sendo utilizados há mais de um século, eles apresentam problemas inerentes ao seu princípio de funcionamento. Entre esses problemas, podemos citar o elevado peso, já que são formados de ferro, cerâmica e cobre, além de serem preenchidos com óleo isolante. Além disso, problemas como a dilatação térmica do óleo isolante pode gerar explosões, sobretensão, sobrecorrente, surtos ou descargas atmosféricas causando a explosão dos TPs, sérios prejuízos aos equipamentos, além de colocar em risco as pessoas que trabalham dentro das subestações. Os Transformadores de Potencial Ópticos (TPOs) e os Transformadores de Corrente Ópticos (TCOs) apresentam vantagens em relação aos transformadores convencionais, tais como: precisão nas medidas, menor peso e volume, isolamento galvânico, segurança, além de ser uma tecnologia limpa. Hoje, os TPs e TCs ópticos são fabricados por algumas empresas no mundo, incluindo a

Toshiba, ABB e Alston. Suas aplicações mais comuns estão baseadas nos Efeitos Pockels e Faraday que têm sido utilizados e tornaram-se métodos precisos e confiáveis para medidas de tensão e corrente. O efeito Pockels ou efeito eletro-óptico é característico da orientação dos dipolos nos cristais PZT em função da direção das linhas de campo elétrico e da polarização da luz. Quando a luz se propaga na direção de um cristal eletro-óptico, o Efeito Pockels causa uma diferença de fase entre duas ondas de luz orientadas perpendicularmente uma à outra. Para detectar o sinal óptico, a polarização Pockels é convertida em modulação da intensidade de luz usando polarizadores, conforme caracterizado na forma descrita por (SAWA *et al.*, 1990). No efeito Faraday, a luz polarizada flui através de um condutor induzindo um campo magnético afetando a propagação de luz através de uma fibra óptica (NIEWCZAS *et al.*, 2007).

Aspectos relativos à viabilidade técnica, econômica, ambiental e social (sustentabilidade) têm sido levados em conta na escolha por tecnologias inovadoras dentro do setor elétrico. Em função disto, o monitoramento constante do processo de operação dentro das subestações de energia elétrica requer o uso de técnicas de monitoramento e diagnósticos modernos que garantam a confiabilidade, a segurança e a eficiência dos sistemas.

1.2 Contextualização e Descrição do Problema

Nas últimas décadas, os sensores FBG (Fiber Bragg Grating) têm atraído grande interesse, tornando-se útil em diversas áreas de aplicação. Esses sensores têm sido utilizados para monitorar parâmetros como temperatura, deslocamento, deformação, aceleração, pressão, tensão, corrente, etc, podendo seu uso ser ampliado para diversas áreas de aplicação. Dentro do setor elétrico, a tecnologia FBG tem se apresentado como uma tecnologia viável para utilização em sistemas de medição e monitoramento, com garantias de confiabilidade, segurança dos sistemas e a redução dos impactos ambientais, (WERNECK *et al.*, 2014, NAZARÉ *et al.*, 2013, ALLIL *et al.*, 2011, RIBEIRO *et al.*, 2011, NIEWCZAS *et al.*, 2007). Entre as vantagens podemos citar a imunidade à interferência eletromagnética, operação elétrica passiva, alta sensibilidade, estrutura compacta, capacidade de multiplexação e o total isolamento galvânico entre o ponto de sensoriamento e monitoramento.

Paralelamente à utilização da fibra óptica, alternativas têm sido estudadas para monitorar e medir as linhas de alta tensão, como é o caso das cerâmicas PZT. Esses materiais atuam como um transdutor de tensão e apresentam uma deformação em

suas dimensões quando um campo elétrico é aplicado em seus terminais, conforme veremos adiante. A tecnologia descrita em RIBEIRO (2011) apresenta um sistema de medição de alta tensão como parte integrante de um TPO para a classe de 15 kV, construído a fim de prover medidas em subestações para calibração, controle, monitoramento e proteção. Ao invés de usar o efeito Pockels para medir a tensão, o TPO desenvolvido utiliza a tecnologia de sensoriamento híbrida baseada em Redes de Bragg aliada às propriedades eletromecânicas das cerâmicas piezoelétricas.

Embora, os sensores FBG surjam como uma alternativa atraente dentro do mercado de energia elétrica (ALLIL *et al.*, 2013), alguns fatores limitam o seu uso em aplicações práticas. Um desses fatores é a dificuldade na discriminação entre as variações de temperatura e strain sofridos por uma FBG. Isto porque, em aplicações envolvendo sensores FBG, variações na temperatura em torno de 100°C resultam em um deslocamento no comprimento de onda de Bragg (λ_B) de aproximadamente 1 nm, comprometendo a exatidão, a repetibilidade nas medidas e a resolução do sensor. Portanto, se faz necessário em medidas de strain, compensar o efeito térmico eliminando os deslocamentos no λ_B induzidos termicamente, a fim de medirmos somente o strain induzido pelo strain na FBG. Os esforços em aplicar técnicas de compensação de temperatura às FBGs aumentam a versatilidade destes sensores permitindo a sua utilização em diversos sistemas. Neste sentido, algumas propostas de compensação de temperatura têm sido exploradas.

Nos últimos anos, um grande número de técnicas para discriminação de temperatura e strain em sensores FBG têm sido propostas. Algumas dessas técnicas fazem uso da construção de sistemas capazes de medir simultaneamente o strain e a temperatura. Para resolver o efeito da sensibilidade simultânea à temperatura em sensores de strain, alguns pesquisadores também estudaram encapsulamentos e materiais bimetálicos de diferentes coeficientes de dilatação térmica para atuarem como compensadores passivos dos efeitos térmicos nos sensores FBG.

Outro fator que limita a aplicação dos sensores FBG é a forma de fixação do sensor na estrutura. Devido à elasticidade dos adesivos usados, pequenos deslocamentos entre a FBG e a estrutura resultam em erros no sistema de medição. Portanto, é necessário o desenvolvimento de procedimentos de fixação da FBG e a escolha de adesivos capazes de suportar tanto as deformações impostas quanto a temperaturas elevadas no ambiente de medidas da FBG.

1.3 Objetivos e Descrição do Projeto

Nesta tese é proposto o desenvolvimento e a construção de um sensor FBG-PZT insensível à temperatura usado para medir e monitorar a tensão em linhas de transmissão. As técnicas de compensação de temperatura apresentadas nesta tese, contemplam o sensor em condições de trabalho submetido à alta tensão (CC/CA) e a correção dos desvios no λ_B em função das variações térmicas no ambiente de medição. Entre as motivações que levaram ao desenvolvimento deste projeto, foi fazer frente aos novos desafios de inovação exigidos no campo da energia elétrica com a inserção de soluções alternativas para garantir a confiabilidade dos sistemas de transmissão.

A primeira proposta sugere uma compensação passiva do sensor FBG-PZT, combinando nas partes da sua construção, materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica e variando seus comprimentos. A estrutura mecânica compensada está baseada no conceito de se aplicar um compensador do deslocamento do λ_B através de uma expansão positiva ou negativa do conjunto sensor. Ao propor esta combinação, compensam-se as variações térmicas sofridas pelo sensor mantendo-se constante seu λ_B . Esta implementação apresenta como vantagem o fato de ser uma proposta simples, podendo ser desenvolvida em uma estrutura apropriada usando materiais de baixo custo, usinagem simples e de fácil aquisição no mercado.

A segunda proposta apresentada e demonstrada experimentalmente nesta tese contempla a construção de um filtro óptico sintonizável baseado em Redes de Bragg e controlado por temperatura. Nesta configuração uma FBG Filtro (FBG-F) é empregada como um filtro termicamente sintonizável, acoplado a um módulo termoeletrônico (MTE). O sistema de sintonia do λ_B é realizado induzindo as variações de temperatura na FBG colada sobre o MTE, fazendo-o resfriar ou aquecer conforme uma referência de temperatura. O arranjo mecânico desenvolvido foi construído com a finalidade de melhorar a sensibilidade da rede e dessa forma aumentar a faixa de sintonia alcançável pelo filtro. Em aplicações em campo, o filtro FBG não será instalado no mesmo ambiente de medidas do sensor FBG-PZT. Os dados referentes às variações de temperatura do sensor serão registrados usando uma FBG de referência no ponto de sensoriamento e enviados remotamente para o controle do filtro FBG. Para a sintonia do filtro FBG-F usando a FBG de referência, será necessário o desenvolvimento de um projeto para a conversão deste sinal de referência na placa do processador digital de sinais.

Por meio de um algoritmo de controle, o ponto ótimo de operação que otimiza e maximiza o processo de demodulação é calculado (RIBEIRO *et al.*, 2013). O método de cálculo foi adotado para estabelecer o ajuste ótimo, isto é, o ponto de máxima sensibilidade sobre as características de uma FBG-F. Este ajuste manterá a sintonia do λ_B do filtro FBG-F no ponto de máxima sensibilidade para a demodulação do sinal independente das variações térmicas sofridas pelo sensor FBG-PZT. Cabe ressaltar que os trabalhos apresentados até o momento, envolvendo sensores em redes de Bragg, não apresentam técnicas de compensação da temperatura em função da sintonia térmica no λ_B do filtro que demodula o sinal.

Simulando um ambiente em alta tensão, o sensor FBG-PZT foi submetido às variações de tensão nas dependências do Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) e avaliado experimentalmente seu desempenho dentro das condições de operação. Espera-se com o desenvolvimento do sensor FBG-PZT, sua aplicação como parte integrante de um TPO para linhas de transmissão, com a garantia de confiabilidade e a precisão nas medidas realizadas.

1.4 Estrutura da Tese

Este documento está organizado como se segue. Primeiramente, o Capítulo 2 descreve o estado da arte dos sensores FBG. O capítulo inicia com os fundamentos da teoria sobre a FBG, seu princípio de operação e apresenta uma abordagem sobre a dependência térmica da FBG colada em diferentes materiais. No Capítulo 3 é realizada uma revisão bibliográfica, mostrando algumas propostas desenvolvidas para a compensação de temperatura em Redes de Bragg e no do capítulo é discutida a influência da fixação dos sensores FBG nas respostas de strain. O Capítulo 4 inicia com uma breve teoria sobre a piezoelectricidade e o estado da arte em sensores híbridos baseados na tecnologia de redes de Bragg e conjunto com as cerâmicas PZT. Na sequência o capítulo apresenta a metodologia de construção do sensor FBG-PZT para aplicação das propostas de compensação de temperatura discutidas nesta tese. O Capítulo 5 apresenta uma proposta passiva de compensação térmica do sensor FBG-PZT usando a mecânica do protótipo desenvolvido, por meio do cálculo dos coeficientes de dilatação térmica e do comprimento dos materiais envolvidos. O capítulo estuda a conduta térmica teórica e experimental do sensor e apresenta os resultados experimentais da sensibilidade térmica do sensor compensado. No Capítulo 6 é apresentada a proposta dinâmica de compensação de temperatura usando a sintonia térmica do filtro FBG-F desenvolvido que demodula o sinal do sensor FBG-

PZT. Também são demonstradas as técnicas usadas na tese para a demodulação do sensor e aspectos do projeto de construção do arranjo mecânico do filtro FBG-F, do circuito de potência e do controlador implementado. Aspectos mecânicos e eletrônicos também são apresentados e discutidos no capítulo, mostrando a viabilidade e a confiabilidade do sistema desenvolvido. O capítulo encerra apresentando um algoritmo de ajuste do ponto ótimo de operação do filtro FBG-F para a demodulação do sensor FBG-PZT. No Capítulo 7, são apresentados os resultados experimentais obtidos com as propostas de compensação de temperatura aplicadas no sensor FBG-PZT submetido à alta tensão. O Capítulo 8 encerra apresentando sugestões para a melhoria dos sistemas desenvolvidos.

Capítulo 2

2. Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos sobre a tecnologia de Redes de Bragg (FBG). O capítulo descreve o princípio básico de sensoriamento de uma FBG e apresenta um estudo sobre a influência da fixação dos sensores FBG nas respostas de strain, bem como a abordagem sobre a dependência térmica da FBG colada em diferentes materiais. Os conceitos apresentados neste capítulo constituem a base para o entendimento e aplicação das propostas de compensação de temperatura que serão desenvolvidas nesta tese.

2.1 Princípio de operação dos sensores FBG

O princípio básico de sensoriamento de uma FBG está baseado em modulações periódicas que ocorrem no índice de refração do núcleo da fibra óptica ao longo de uma direção longitudinal. Quando um sinal luminoso de banda larga incide na fibra, com a FBG inscrita, parte do espectro será refletido e parte será transmitido. Devido às modulações periódicas do índice de refração, a luz refletida de cada plano irá juntar-se com os outros reflexos na direção contrária do feixe incidente. Esta interferência pode ser construtiva ou destrutiva, dependendo do λ_B , que satisfaz a condição de Bragg dada pela Eq. (2.1) (HILL *et al.*, 1997);

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

Ao espectro refletido damos o nome de comprimento de onda de reflexão de Bragg (λ_B), que corresponde ao comprimento de onda do pico da componente espectral de banda estreita refletida pela FBG. De acordo com a Eq. (2.1), este parâmetro é função do índice de refração efetivo da fibra (n_{eff}) e do período de modulação do índice de refração, isto é, a distância entre as grades (Λ). As primeiras observações de alterações no índice de refração foram observadas em fibras de sílica dopadas com Germânio e foram relatadas por HILL *et al.*, (1997). Os autores apresentam uma grade permanente escrita no núcleo da fibra através de um laser de argônio a 488 nm.

De acordo com a Eq. (2.1), qualquer agente externo capaz de mudar a periodicidade da grade Λ deslocará o espectro refletido centrado no λ_B . Uma deformação longitudinal devida a uma força externa, por exemplo, pode mudar tanto Λ (aumentando o período da grade) quanto n_{eff} , pelo efeito fotoelástico. Da mesma forma, uma variação de temperatura também pode mudar ambos os parâmetros Λ e n_{eff} , através da expansão térmica e do efeito termo-óptico, respectivamente. Como a informação do parâmetro medido está codificada no conteúdo espectral da luz refletida ou transmitida pela FBG, é possível a autocalibração destes sensores, garantindo a sua capacidade de multiplexação. Essencialmente uma FBG atua como sensor de temperatura e strain. Entretanto construindo interfaces apropriadas, muitos outros parâmetros de medidas podem modificar os parâmetros da grade, resultando no deslocamento do λ_B , o que permite sua atuação como transdutor (LAWRENCE *et al.*, 1999).

2.2 Sensibilidade da FBG à temperatura e ao strain

A variação do λ_B em relação à temperatura e ao strain pode ser calculada a partir da Eq. (2.2) que estabelece a dependência de uma FBG à temperatura e à ao strain (HILL *et al.*, 1997).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_{\text{FBG}} + (\alpha_{\text{FBG}} + \eta)\Delta T \quad (2.2)$$

2.2.1 FBG ao strain

O primeiro membro na Eq. (2.2) representa o deslocamento no λ_B em função de uma deformação sofrida isto é, a sensibilidade da FBG a uma deformação longitudinal. Este parâmetro é dado por:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_{\text{FBG}} \quad (2.3)$$

Onde ρ_e , a constante fotoelástica da fibra, representa a variação do índice de refração com o strain. O termo ε_{FBG} representa o strain no período da FBG devido ao strain da fibra, considerando seu comprimento L_{FBG} . Se aplicarmos uma deformação de ΔL na fibra então o strain será:

$$\epsilon_{\text{FBG}} = \frac{\Delta L_{\text{FBG}}}{L_{\text{FBG}}} \quad (2.4)$$

Substituindo na Eq. (2.3) o valor teórico da constante fotoelástica da fibra $\rho_e=0.22$ e o λ_B de uma FBG centrada em @1550nm, sua sensibilidade ao strain será de:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\Delta \epsilon} = 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon \quad (2.5)$$

2.2.2 FBG à temperatura

O segundo membro na Eq. (2.2) representa a sensibilidade da FBG com a temperatura, este valor será dado por:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta)\Delta T \quad (2.6)$$

Onde o primeiro termo representa o coeficiente de dilatação térmica da fibra (α) de sílica. O segundo termo, o coeficiente termo-óptico (η), é a dependência do índice de refração da sílica em relação à variação de temperatura. Considerando uma aproximação da sensibilidade térmica, temos os seguintes valores teóricos: $\alpha=0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ e $\eta=8.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (OTHONOS *et al.*, 1999). Substituindo estes parâmetros na Eq. (2.6) e considerando o λ_B de uma FBG sendo @1550nm, podemos calcular a sensibilidade térmica teórica de uma FBG:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T} = 14.18 \text{ pm}/^\circ\text{C} \quad (2.7)$$

Apesar da sensibilidade de uma FBG à temperatura depender das características da FBG, do seu processo de fabricação, da porcentagem de germânio em seu núcleo, a Eq. (2.7) mostra que a dependência do índice de refração à temperatura produzirá em média 14 pm/ $^\circ\text{C}$ de variação em seu λ_B . Esta variação pode limitar a aplicação dos sensores FBG, em medidas de strain, quando sujeitos às variações de temperatura. No Capítulo 5, serão apresentados procedimentos experimentais para a determinação da constante foto-elástica e do coeficiente termo-óptico do sensor FBG usado neste trabalho.

2.3 Dependência à temperatura de uma FBG colada em diferentes materiais

Conforme será apresentado adiante, no projeto de construção do sensor FBG-PZT e do filtro óptico sintonizável, a FBG usada foi colada sobre diferentes materiais, como: alumínio, cobre, aço, latão e Invar, desta forma, é necessário estudarmos sua conduta e sua sensibilidade térmica quando está colada sobre diferentes materiais.

Quando a FBG é submetida às variações de temperatura, ela sofrerá uma deformação/contração dependendo do incremento ou decremento na temperatura respectivamente e sua sensibilidade dependerá do tipo de material sobre o qual ela está colada. Neste caso, para determinarmos a sensibilidade ao strain e à temperatura da FBG, o cálculo deverá ser feito considerando o α_M do material sobre o qual ela está colada. A variação no comprimento da FBG (ΔL_{FBG}) será o strain sofrido pelo material (ΔL_M) em função da temperatura menos ao strain na FBG devido somente à temperatura. Assim, usamos a Eq. (2.8) para calcular a variação no comprimento de uma FBG colada sobre uma estrutura:

$$\Delta L_{FBG} = L_M \alpha_M \Delta T - L_{FBG} \alpha_{FBG} \Delta T \quad (2.8)$$

Onde L_M e α_M são respectivamente, o comprimento e o coeficiente de dilatação térmica, do material onde a FBG está colada. O parâmetro L_{FBG} representa a distância entre os pontos de cola na FBG e α_{FBG} é o coeficiente de expansão térmica da FBG. Já que o comprimento da FBG colada é o mesmo que o comprimento do material abaixo dela, temos:

$$L_{FBG} = L_M \quad (2.9)$$

Substituindo a Eq. (2.8) na Eq. (2.2), e considerando a condição dada pela Eq. (2.9), obtemos a Equação de Bragg para uma FBG colada em um material.

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) (\alpha_M - \alpha_{FBG}) \Delta T + (\alpha_{FBG} + \eta) \Delta T \quad (2.10)$$

A sensibilidade térmica de uma FBG colada sobre diferentes materiais pode ser teoricamente calculada, substituindo na Eq. (2.10) o coeficiente de expansão térmica do material e da FBG. O gráfico da Figura 2.1 mostra o resultado teórico da variação no λ_B em função da temperatura de uma FBG com $\lambda_B = 1537$ nm em @25°C colada

sobre diferentes materiais.

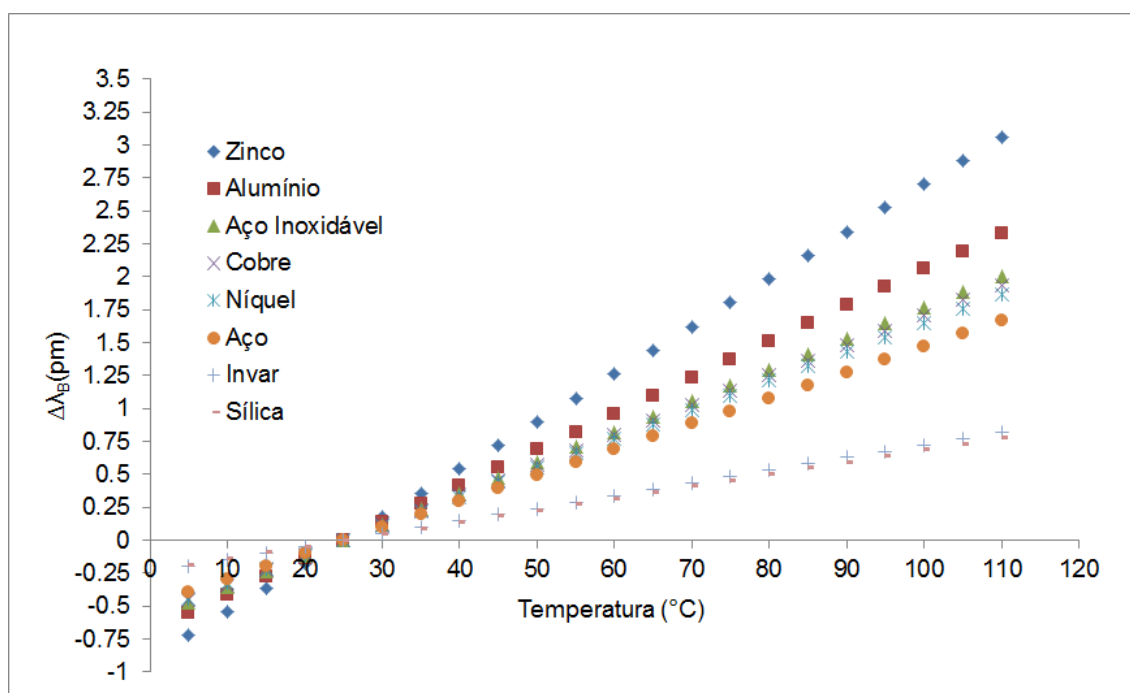


Figura 2.1: Resultado teórico da variação do λ_B em função da temperatura para uma FBG colada em diferentes materiais.

A regressão linear das curvas da Figura 2.1, são apresentados na Tabela I onde temos os diferentes valores de coeficientes de dilatação térmica dos materiais selecionados e a sensibilidade térmica da FBG colada sobre estes materiais. Para diferentes materiais, quanto maior o coeficiente de dilatação térmica, maior a sensibilidade da FBG. Conforme apresentado no resultado da Eq. (2.6), o coeficiente de dilatação térmica de $0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ para uma fibra de sílica, corresponde à sensibilidade térmica teórica da FBG de aproximadamente $14.2 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, considerando $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$.

Ainda de acordo com o gráfico da Figura 2.1, conclui-se que em aplicações onde a dilatação térmica do material onde a FBG está colada não deva interferir no resultado das medidas influenciando sua sensibilidade, uma opção é colar a FBG no Invar cujo coeficiente de dilatação térmica é $\approx 1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, valor este próximo ao α_{FBG} ($0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Agora, para aumentar a sensibilidade térmica da FBG e a faixa de sintonia do λ_B , de acordo com o gráfico, uma alternativa seria colar a FBG sobre o Zinco, visto que este material apresenta o coeficiente de dilatação térmica elevado, aproximadamente $35 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Supondo que o material onde a FBG foi colada é o vidro, então $\alpha_{\text{FBG}} = \alpha_{\text{VIDRO}}$,

logo o primeiro termo na Eq. (2.10) é igual a zero, valendo apenas o segundo termo. Como o vidro dilata tanto quanto a fibra, temos a Eq (2.10) igual a Eq. (2.6), então como a FBG não estica nem encolhe, a parte relativa ao strain é igual à zero.

TABELA I. COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA PARA ALGUNS MATERIAIS E A SENSIBILIDADE TÉRMICA TEÓRICA DA FBG COLADA SOBRE ESTES MATERIAIS.

Material	Coeficiente de Dilatação Térmica ($1/^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\lambda_B/\Delta T$ (pm/ $^{\circ}\text{C}$)	Ajuste Linear $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ (pm)
Sílica	0.55×10^{-6}	14.18	$y = 0.00915x - 0.22871$
INVAR	1.2×10^{-6}	14.97	$y = 0.00966x - 0.24145$
Aço	14×10^{-6}	30.44	$y = 0.01964x - 0.49097$
Níquel	17×10^{-6}	34.07	$y = 0.02198x - 0.5495$
Latão/Cobre	18×10^{-6}	35.28	$y = 0.02276x - 0.56903$
Aço Inoxidável	19×10^{-6}	36.49	$y = 0.02354x - 0.58855$
Alumínio	24×10^{-6}	42.53	$y = 0.02744x - 0.68597$
Zinco	35×10^{-6}	55.83	$y = 0.03602x - 0.90048$

Capítulo 3

3. Revisão Bibliográfica

Conforme mencionado anteriormente, o emprego da FBG como sensor de strain esbarra nos inconvenientes desvios na temperatura no ambiente de medidas por influenciarem nas respostas do sensor e comprometerem a confiabilidade das medidas. Neste capítulo são descritas propostas para contornar este problema, que fornecem alternativas para compensar e corrigir os desvios no λ_B provocados pelas variações térmicas no ambiente de sensoriamento.

3.1 O Estado da arte do segmento de sensores em redes de Bragg

Os avanços na indústria optoeletrônica aliado à difusão da tecnologia de fibra óptica resultaram na otimização e na redução dos preços dos equipamentos. Este fato propiciou a difusão da tecnologia em diversos ramos da indústria e, em especial, na área de sensores a fibra óptica (SFOs). O crescente desenvolvimento e a produção em massa dos SFOs têm permitido a substituição dos sensores convencionais no sensoriamento de diversos parâmetros e em diferentes áreas de aplicação, incluindo os diversos ramos da engenharia, a área médica, o setor militar, entre outros. (DZIUDA *et al.*, 2012, DAVIS *et al.*, 2012, NAZARE *et al.*, 2012 e ANTUNES *et al.*, 2012). Dependendo do parâmetro e das condições no ambiente onde o sensor é medido, o monitoramento do sistema pode ser difícil e, às vezes até mesmo impossível usando um sensor convencional. Nestes casos, um SFO pode ser uma alternativa viável e econômica, além de prover medidas confiáveis. Os sensores em redes de Bragg representam um exemplo deste tipo de sensores.

O princípio básico de operação de uma FBG se baseia no monitoramento do λ_B do sinal refletido em virtude das variações no parâmetro a ser medido (KERSEY *et al.*, 1997). Em geral, os sensores FBG apresentam vantagens significativas sobre outras tecnologias de sensoriamento, dentre as quais se destacam a operação eletricamente passiva, alta sensibilidade, a imunidade à interferência eletromagnética e a capacidade de multiplexação. Entre as características intrínsecas que tais sensores detêm, podemos citar a precisão, a durabilidade, a facilidade de instalação e operação, sua estrutura compacta e o baixo peso (ANNAMDAS, 2012).

3.2 O Estado da arte das propostas de compensação de temperatura em redes de Bragg

Observando somente $\Delta\lambda_B$ na Equação (2.2), é impossível distinguir se o deslocamento no λ_B é devido à temperatura ou ao strain sofrido pela FBG. Como esse deslocamento é função tanto do strain quanto da temperatura, a discriminação da sensibilidade à temperatura e ao strain, dificulta o uso indiscriminado dos sensores de Bragg em ambientes práticos.

Alguns sistemas têm demonstrado o uso de duas FBGs para discriminar medidas de temperatura e strain. Usando duas FBGs com diferentes comprimentos de onda, inscritas na mesma fibra óptica e submetida às mesmas variações térmicas, é possível obter sensibilidades térmicas diferentes fazendo com que uma delas seja insensível ao strain. Neste caso, o deslocamento no λ_B devido somente ao strain é o deslocamento total menos o deslocamento devido à temperatura. Desta forma, é possível obter a compensação térmica calculando $\Delta\lambda_B$ para cada uma das FBGs e eliminando o efeito da temperatura dos resultados. Esta compensação é feita, partindo-se da Eq. (3.1) desenvolvida em WERNECK *et al.*, 2013.

$$\Delta\lambda_{B1} = K_{\varepsilon1}\Delta\varepsilon + K_{T1}\Delta T \quad (3.1)$$

Onde:

$$K_{\varepsilon1} = (1 - \rho_e)\lambda_{B1} \quad (3.2)$$

$$K_{T1} = (\alpha + \eta)\lambda_{B1} \quad (3.3)$$

Do mesmo modo, considerando a segunda FBG temos:

$$\Delta\lambda_{B2} = K_{\varepsilon2}\Delta\varepsilon + K_{T2}\Delta T \quad (3.4)$$

Onde,

$$K_{\varepsilon2} = (1 - \rho_e)\lambda_{B2} \quad (3.5)$$

$$K_{T2} = (\alpha + \eta)\lambda_{B2} \quad (3.6)$$

Mas como esta última FBG está submetida somente a uma variação térmica, consideramos o primeiro termo da Eq. (3.4) sendo $K_{\varepsilon2}$ igual à zero. As Equações (3.1)

e (3.4) podem ser escritas na forma de uma matriz representada pela Eq. (3.7). Esta matriz é chamada de matriz de deslocamento do λ_B porque a sua solução fornece o deslocamento no λ_B das duas FBGs como função da temperatura e do strain:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon2} & K_{T2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Entretanto é necessário encontrar, para cada FBG individualmente, a matriz sensora que dá o strain e a temperatura em função do deslocamento no λ_B . Para isto, multiplicam-se os dois lados da Eq. (3.7) pelo inverso da matriz 2x2 da Eq. (3.7) e obtemos:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon2} & K_{T2} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Invertendo a matriz 2x2 obtemos a matriz de sensoriamento:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{\varepsilon1}K_{T2} - K_{\varepsilon2}K_{T1}} \begin{bmatrix} K_{T2} & -K_{T1} \\ -K_{\varepsilon2} & K_{\varepsilon1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Se as duas FBGs tem os mesmos coeficientes e o mesmo λ_B , o deslocamento será igual, portanto, teríamos:

$$K_{\varepsilon1}K_{T2} \approx K_{\varepsilon2}K_{T1} \quad (3.10)$$

A Equação (3.2) e Equação (3.5), bem como as Equações (3.3) e (3.6) respectivamente, diferem apenas pelo λ_B . Para evitar a redundância na Equação (3.9) usam-se FBGs com λ_B ligeiramente distanciados e assim forçar $K_{\varepsilon1}K_{T2} \neq K_{\varepsilon2}K_{T1}$. Resolvendo a Equação (3.9) para o strain e para a temperatura, obtemos:

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{K_{\varepsilon1}K_{T2} - K_{\varepsilon2}K_{T1}} (K_{T2}\Delta\lambda_{B1} - K_{T1}\Delta\lambda_{B2}) \quad (3.11)$$

$$\Delta T = \frac{1}{K_{\varepsilon1}K_{T2} - K_{\varepsilon2}K_{T1}} (K_{\varepsilon1}\Delta\lambda_{B2} - K_{\varepsilon2}\Delta\lambda_{B1}) \quad (3.12)$$

A Equação (3.11) corresponde ao strain da FBG₁ medido pela $\Delta\lambda_{B1}$, compensado pela variação de temperatura medida por $\Delta\lambda_{B2}$. A Equação (3.12) fornece a temperatura dos sensores, que deverá ser usada no cálculo da compensação

térmica, usando, por exemplo, a dilatação térmica dos materiais envolvidos na construção do sensor (WERNECK *et al.*, 2013).

Essa abordagem, usando duas FBGs no ponto de sensoriamento, é válida quando o local do interesse é um ambiente de alta tensão, onde não é possível medir eletricamente a temperatura, ou locais sujeitos à interferência eletromagnética. Neste sentido, alguns autores propuseram uma abordagem inscrevendo na mesma fibra óptica, duas FBGs com seus respectivos λ_B sobrepostos, resultando em diferentes respostas para as medidas de strain e de temperatura. Em JAMES *et al.*, (1996), os autores demonstraram uma técnica para discriminar simultaneamente medidas de temperatura e strain. Usando duas FBGs com λ_B estreitamente espaçados, emendadas em uma mesma fibra com diâmetros diferentes, as grades mostraram sensibilidade térmica iguais, entretanto, diferentes respostas à tensão aplicada.

Em SONG *et al.* (1997) os autores descrevem uma técnica para medidas simultânea de temperatura e strain usando duas FBGs com seus λ_B estreitamente espaçados (≈ 1 cm) e encapsuladas em série dentro de um tubo capilar de vidro cujo coeficiente de dilatação é semelhante ao da fibra de vidro utilizada. As extremidades de uma das FBGs foram firmemente fixadas na parede interna do tubo estando sensível somente à temperatura, enquanto a outra está sensível ao strain e temperatura.

LI *et al.*, (2009) desenvolveram um sensor FBG com compensação de temperatura, para monitorar estruturas em navios. O método usa uma FBG livre de deformação para medir diretamente a temperatura do sensor de deformação. A FBG de referência está localizada no mesmo ambiente térmico do sensor de deformação. O erro da deformação causado pelas variações térmicas é calculado subtraindo o deslocamento no λ_B induzidos pelas variações na temperatura do deslocamento no λ_B total obtido com o sensor de strain. A fibra contendo a FBG de referência é fixada nas duas extremidades com a FBG solta. Uma extremidade da placa de quartzo sem a FBG foi colada no substrato. Neste sensor o strain não pode influenciar a FBG de referência porque o quartzo é duro e a FBG de referência está solta. Por sua vez, o quartzo tem o mesmo coeficiente de expansão térmica assim a FBG referência está submetida à mesma temperatura que o sensor de strain. O diagrama esquemático do sensor FBG com compensação de temperatura é apresentado na Figura 3.1.

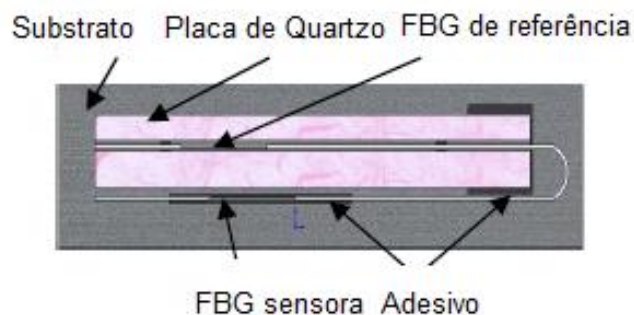


Figura 3.1: Esquema do sensor FBG com compensação de temperatura (adaptado de LI *et al.*, 2009).

Algumas aplicações práticas, usando a sintonia do λ_B a partir de uma deformação na FBG, para compensar o deslocamento no λ_B e conseqüentemente os efeitos térmicos, são apresentadas nos trabalhos de HUANG *et al.*, (2013) e HSU *et al.*, (2006). Um sensor FBG de pressão do tipo diafragma e insensível à temperatura, usado para medir e monitorar a pressão de um gás ou um líquido foi desenvolvido pelos autores em HUANG *et al.*, (2013), demonstrado na Figura 3.2. Usando a diferença na variação do λ_B de duas FBGs coladas diretamente na superfície do diafragma, a influência da temperatura é eliminada medindo simultaneamente o strain positivo e o strain negativo para obter somente a variação ao strain. Desta forma, garante-se a precisão nas medidas do sensor proposto.

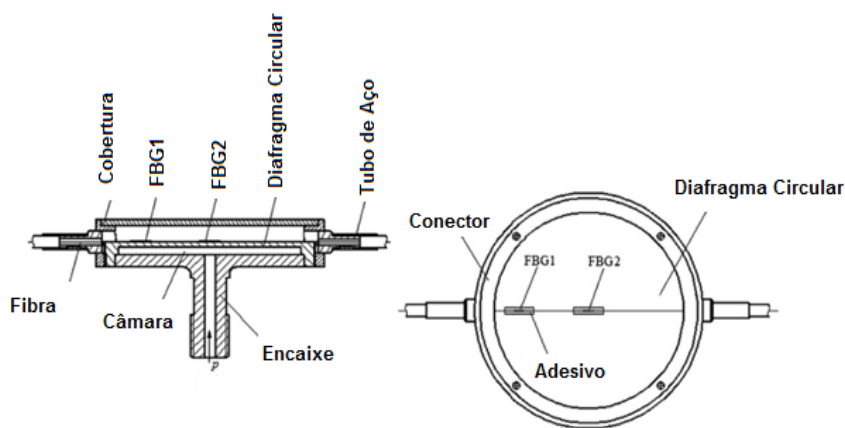


Figura 3.2: Esquema do sensor de pressão com compensação de temperatura (adaptado de HUANG *et al.*, 2013).

Por sua vez, em HSU *et al.*, (2006) os autores desenvolvem um sensor de pressão insensível à temperatura com uma FBG inicialmente presa na estrutura. A FBG é mantida esticada, isto é, a partir de tensão positiva aplicada inicialmente. Quando a temperatura ambiente aumenta, uma tensão negativa (para afrouxar a FBG)

é aplicada e produz um deslocamento (blue-shift) no λ_B . A compensação de temperatura é realizada fazendo o balanceamento entre o deslocamento (blue-shift) e o deslocamento (red-shift) do λ_B induzido termicamente. Os resultados indicaram que o λ_B varia dentro de uma distância de 0.02 nm dentro do range de temperatura.

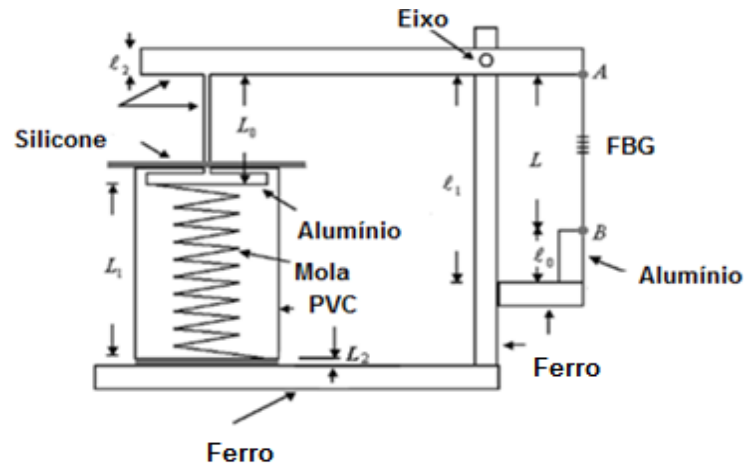


Figura 3.3: Esquema do sensor de pressão com compensação de temperatura (adaptado de HSU *et al.*, 2006).

Muitos pesquisadores têm proposto uma compensação passiva das variações de temperatura nos sensores de strain baseados em FBG. Encapsulamentos baseados em materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica funcionam como dispositivos bimetálicos, para compensar os efeitos térmicos. Os métodos de sintonia propostos a seguir, mostram alguma relação com o método de compensação mecânica desenvolvido nesta tese já que o sistema desenvolvido permite compensar mecanicamente as variações de temperatura, promovendo a sintonia mecânica no λ_B da FBG fixada no dispositivo, usando materiais de diferentes coeficientes de dilatação térmica.

Um encapsulamento atérmico, baseado em um dispositivo bimetálico, foi desenvolvido em LO *et al.* (2003) com o propósito de corrigir os desvios na temperatura da FBG. O compensador consiste de uma fibra óptica com uma cobertura metálica. Como o coeficiente de dilatação térmica do substrato é maior do que o da cobertura metálica, quando a temperatura ambiente aumenta, o compensador expande para comprimir a FBG. Portanto, um strain negativo é induzido na FBG, resultando na mudança no valor do strain, estabilizando o λ_B da FBG.

Propostas anteriores desenvolveram dispositivos de compensação de temperatura usando um encapsulamento com a FBG fixada em materiais bimetálicos com diferentes coeficiente de dilatação térmica, como o sistema descrito em YOFFE *et*

al., (1995), TSAI *et al.*, (2001), YANLIANG *et al.*, (2008). Nestes dispositivos, a dependência da temperatura pode ser compensada variando o strain proporcionalmente e contrariamente as mudanças na temperatura. A FBG é tensionada antes de ser fixada no material de tal modo que o strain é gradativamente aliviado à medida que a temperatura aumenta.

É importante mencionar, que nestas propostas de compensação, o dispositivo apresentado pelos autores apenas contempla a compensação das variações térmicas sofridas pela FBG, sem a utilização deste mecanismo de compensação em conjunto com uma proposta de sensoriamento que monitore outro parâmetro além da temperatura. Nesta tese, as propostas de compensação de temperatura apresentadas são aplicadas diretamente no sensor de tensão FBG-PZT e em condições de operação.

Em YOFFE *et al.*, (1995), os autores demonstraram um dispositivo compacto para a compensação de temperatura em Redes de Bragg. O dispositivo emprega um tubo de sílica, usado como o material com baixo coeficiente de dilatação térmica e o tubo rosqueado em alumínio como o material compensador que possui um alto coeficiente de dilatação térmica e a FBG tensionada é colada no dispositivo, como mostrado na Figura 3.4. Durante o aumento da temperatura o alumínio expande a fim de que a distância entre os pontos do adesivo, ou seja, os pontos de cola diminua, reduzindo a tensão na fibra, necessária para cancelar os desvios no λ_B devido ao aumento da temperatura. Uma porca é usada para produzir o tensionamento da FBG.

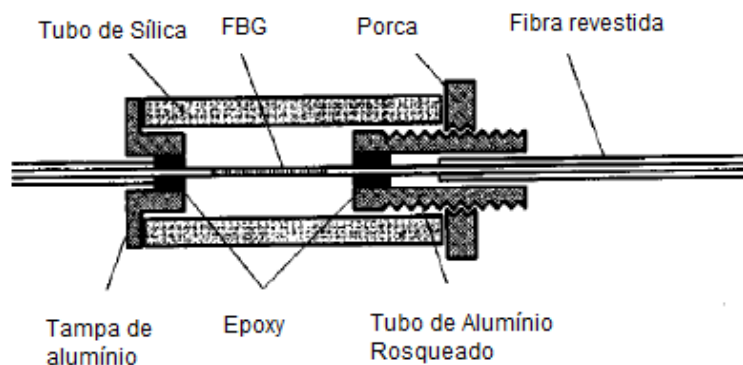


Figura 3.4: Seção transversal do dispositivo de compensação térmica (adaptado de YOFFE *et al.*, 1995).

Na proposta implementada por TSAI *et al.*, (2001), mostrada na Figura 3.5, os autores reportam um mecanismo de sintonia com compensação de temperatura para sintonizar os desvios no λ_B quando a temperatura varia, mantendo constante o λ_B .

Para a pré-sintonia do λ_B , é usado um par de parafusos rosqueados de aço inoxidável fixados com uma porca de Invar no tubo e a FBG inserida dentro da cavidade. Uma pré-tensão na fibra é realizada para sintonizar previamente o λ_B e evitar uma contração na FBG quando a temperatura estiver diminuindo. A fixação da FBG proporciona um incremento da deformação enquanto a temperatura diminui devido à contração térmica da FBG e dos parafusos. Similar à proposta anterior de YOFFE *et al.*, (1995), tanto a FBG quanto os parafusos dentro do tubo de sílica são fixados usando adesivo epóxi.

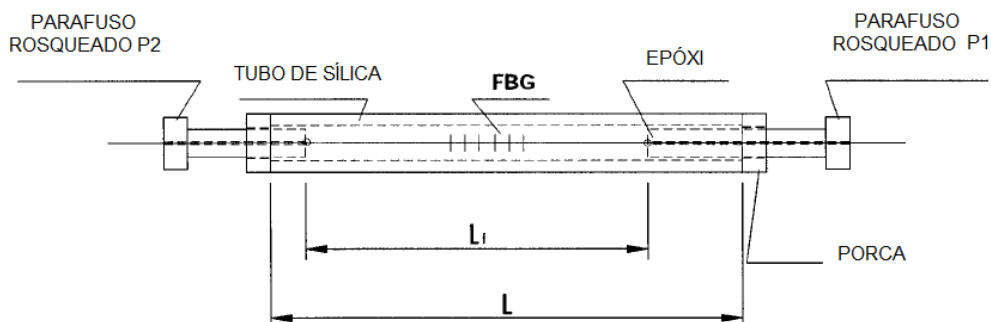


Figura 3.5: Esquema do dispositivo de compensação de temperatura para redes de Bragg (adaptado de TSAI *et al.*, 2001).

O método de sintonia proposto por LIN (2001) guarda alguma relação com o trabalho desenvolvido nesta tese já que o dispositivo permite selecionar o λ_B a partir da pós-sintonia da FBG fixada na estrutura do sensor desenvolvido. Para assegurar a independência entre as medidas de strain e compensar os desvios no λ_B provocados pelas variações térmicas no ambiente de sensoriamento, os autores propuseram um encapsulamento tubular onde uma FBG tensionada, tem seu λ_B sintonizado, promovendo tanto a correção positiva quanto a correção negativa no sensor. Nesta proposta, o autor sugere uma ajuste fino na sintonia λ_B no estágio final de implementação, isto é, com a FBG já colada na estrutura, como demonstrado na Figura 3.6. A FBG é fixada dentro de um pino que permite um movimento linear com parafuso na extremidade e o pino é guiado pelo parafuso de aperto. Na proposta, os autores sugerem o uso de adesivo ou a aplicação de uma camada metálica a fim de soldar a FBG no parafuso.

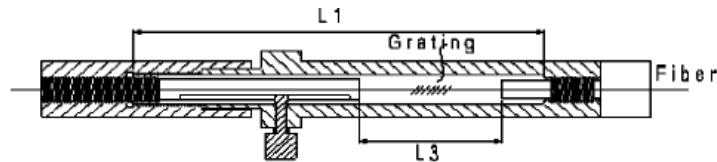


Figura 3.6: Seção transversal do sistema cilíndrico de compensação de temperatura (adaptado de LIN, 2001).

No sistema da Figura 3.7 apresentado em ZU *et al.*, (2006), os autores descrevem o desempenho de um filtro FBG com compensação térmica passiva. Um sistema de controle é empregado para sintonizar o λ_B compensando os desvios no λ_B , induzidos termicamente. O filtro é construído usando um material piezoelétrico para promover a deformação longitudinal na FBG e uma placa metálica e um módulo termoelétrico é usado para promover a sintonia térmica no λ_B .

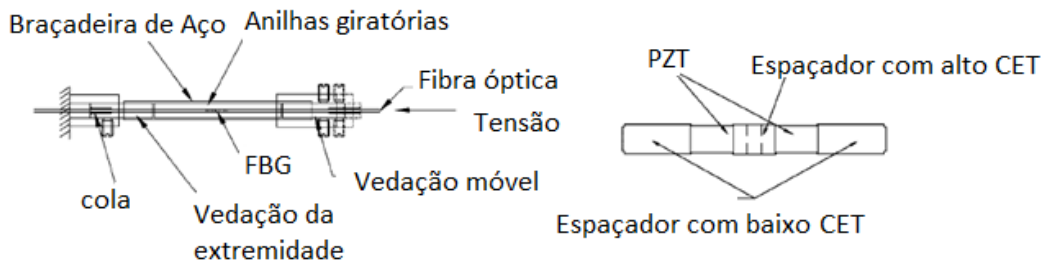


Figura 3.7: a) Dispositivo para guiar a fibra b) Espaçador para compensação de temperatura (adaptado de ZU *et al.*, 2006).

Conforme apresentado nas propostas anteriores, a maioria dos estudos mantém o foco no parâmetro deformação longitudinal na FBG para promover a sintonia λ_B , entretanto na segunda proposta de compensação térmica desenvolvida nesta tese, a sensibilidade térmica da FBG é usada como parâmetro de sintonia explorando os desvios no λ_B quando a temperatura varia. Devido ao seu efeito termo-óptico, o parâmetro temperatura pode ser usado para implementar um filtro de FBG sintonizável usando um módulo termo elétrico (MTE) para induzir as variações térmicas na FBG. A sintonia é feita submetendo o MTE a uma determinada temperatura que mantenha sintonizado o λ_B do sensor FBG colado sobre o módulo, O desenvolvimento e a construção da proposta do filtro sintonizável FBG será apresentado no Capítulo 6.

O diferencial desta tese reside no fato de que tanto na proposta de LIN (2001) quanto na maioria das propostas apresentadas anteriormente, o sistema de compensação da FBG apenas contempla a compensação térmica da FBG, sem a sua

utilização em um dispositivo sensor, onde a FBG atue como sensor para medidas de tensão. Nesta tese, o método de sintonia e compensação de temperatura contemplou a utilização do sistema no sensor de alta tensão para aplicação em linhas de transmissão e distribuição, conforme será abordado nos próximos capítulos.

3.3 Influência da fixação dos sensores FBG nas respostas de strain

Além da sensibilidade simultânea à temperatura e ao strain, outro parâmetro que influencia no desempenho do sensor FBG limitando sua aplicação, está relacionado aos componentes do sistema. Dependendo do método de fixação da FBG no dispositivo, a interação entre o elemento a ser medido e a FBG, sofre influência de fatores diversos, (HABEL *et al.*, 2009). Para assegurar a confiabilidade dos sistemas, vários aspectos precisam ser considerados, inclusive o tipo de adesivo usado para colar a FBG sobre uma estrutura. Dependendo do adesivo, o uso de diferentes especificações podem produzir medidas com baixos níveis de precisão, ou seja, não é possível conseguir um perfeito acoplamento entre os materiais, resultando em erros nas medidas. Outro ponto relevante a ser destacado é a necessidade de retirar o recobrimento primário (buffer) da fibra, antes de colar a FBG no material, já que a extração do buffer provoca microfissuras na superfície da fibra diminuindo sua resistência mecânica (LUPI *et al.*, 2005). Portanto, é importante listar as influências relevantes que afetam o sinal medido, além de ser possível distinguir entre a informação que vem do próprio sensor e as perturbações oriundas da aplicação.

HABEL *et al.* (2009) atenta para o fato das FBGs coladas na superfície dos materiais, produzirem uma estrutura com interface assimétrica. Segundo os autores, para sensores FBG colados em estruturas metálicas, as propriedades do adesivo, sua geometria em torno da cobertura e sua interação com o tipo de cobertura, são aspectos importantes na construção do sensor que afetam a transferência do strain entre o material e o sensor FBG. Em outro trabalho, HABEL *et al.* (2007) destacam a importância da definição de um guia para desenvolver e assegurar procedimentos de aplicação adequados, considerando as influências mecânicas dos materiais, tais como: o tipo de material do objeto medido, os adesivos, as camadas de cobertura, as camadas de proteção, bem como as interações químicas e físicas dos materiais em condições ambientes variáveis.

No início dos anos 90, a fabricação das fibras ópticas foi combinada ao processo de inscrição das FBGs. A idéia foi desenvolvida devido ao custo eficiente na fabricação de uma grande quantidade de sensores FBG e devido ao aumento na

resistência da FBG. O processo chamado de Drawn Tower Grating (DTG) proporciona resistência mecânica à FBG, já que o buffer é aplicado logo após a inscrição da FBG na fibra, melhorando a transferência do strain em aplicações como sensor de deformação (LINDNER *et al.*, 2012). A DTG é fabricada usando uma cobertura de cerâmica modificada chamada de Ormocer®, um material híbrido sintetizado por um processo sol-gel que melhora as propriedades mecânicas dos sensores FBG. A Ormocer® apresenta um Módulo de Young próximo ao do vidro, garantindo sua aderência com a fibra de modo que não há evidência de seu deslocamento em relação ao vidro, garantindo à DTG uma probabilidade de ruptura superior à uma fibra padrão SMF28 (Single Mode Fiber 28) (HABISREUTHER *et al.*, 2012)

Recobrimentos metálicos como: alumínio, titânio, cobre, níquel e ouro, têm sido aplicados nas fibras ópticas usando diferentes métodos de deposição, tais como: sputtering, deposição à vapor e galvanoplastia (MÜLLER *et al.*, 2008, FENG *et al.*, 2010, XIE *et al.*, 2007, LI *et al.*, 2009). A galvanoplastia é o método mais difundido para metalização de materiais, por causa de vantagens como baixo custo, simplicidade e deposição uniforme. De acordo com (FENG *et al.*, 2009), esta técnica possui a desvantagem de, para materiais não condutores, como polímeros e vidros, eles precisarem primeiramente ser tratados com ácido fluorídrico (HF) diluído para enrugar a superfície e permitir a aderência do metal ao vidro, resultando no enfraquecimento do material.

Nesta tese foram utilizados dois métodos de fixação da FBG na estrutura do sensor, um através da aplicação de uma camada metálica sobre uma DTG usando um processo de ablação a laser e uma segunda proposta inovadora usando uma resina fotopolimerizável. Um aspecto promissor em relação às propostas de compensação de temperatura desenvolvidas anteriormente e que será apresentado no próximo capítulo, é o fato dos autores utilizarem adesivos à base de epóxi ou sugerirem a aplicação de camada metálica na fibra a fim de soldar a FBG no metal.

Como proposta inovadora nesta tese, fazemos uso de uma resina fotopolimerizável, que se apresenta como um processo de adesão simples, rápido e eficiente para a fixação dos sensores FBG em estruturas metálicas. A utilização do processo de fotopolimerização da resina usado na adesão da FBG na estrutura garantiu a qualidade no processo de fixação das FBGs usadas nesta tese, além de possibilitar sua operação em ambientes de temperaturas elevadas, acima de 120°C onde a maioria dos adesivos disponíveis comercialmente não conseguiu suportar, provocando erros nos resultados das medidas.

Capítulo 4

4. Projeto de construção do sensor FBG-PZT

Este capítulo inicia apresentando uma breve teoria das cerâmicas piezoelétricas com destaque para a aplicação em medidas de deformação mecânica. Para se apresentar propostas de compensação de temperatura no sensor FBG-PZT, é necessário conhecer o estado da técnica no tocante à tecnologia híbrida das FBGs e das cerâmicas PZT aplicada às medidas de tensão. Assim, este capítulo discute o estado da arte em sensores híbridos FBG-PZT, em seguida, é descrito o processo de construção do sensor FBG-PZT para aplicação nas propostas de compensação de temperatura discutidas nesta tese.

4.1 Teoria da Piezoeletrecidade

A piezoeletrecidade é a propriedade que certas substâncias cristalinas possuem de gerar cargas elétricas quando estão submetidas a uma força mecânica ou, produzir uma deformação mecânica quando um campo elétrico é aplicado em seus terminais, a estes efeitos damos o nome de efeito piezoelétrico direto e reverso, respectivamente. Essa propriedade permite que os cristais PZT sejam empregados como transdutores de tensão.

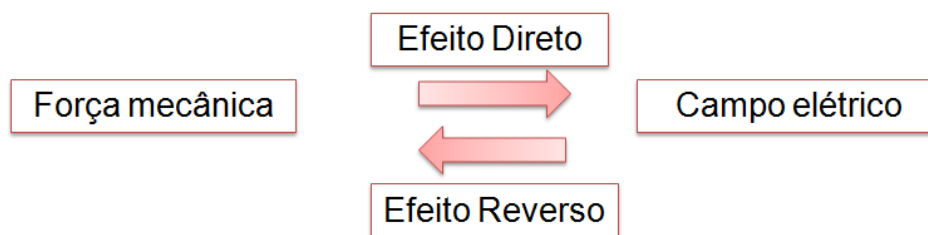


Figura 4.1: Efeito Piezoelétrico Direto e Reverso.

A sigla PZT é uma abreviação para cerâmicas policristalinas compostas de íons tetravalentes de Chumbo, Zircônio e Titânio e uma das vantagens do emprego de cerâmicas PZT na fabricação de sensores, é o fato de que estas não exigem uma fonte de alimentação externa para operar, sendo uma das principais motivações para o uso na detecção de sinais de baixa potência (SOMAN *et al.*, 2011). A deformação da espessura do PZT é dada pela constante d_{33} que representa a deformação sofrida pela

cerâmica na direção três a partir da incidência de um campo elétrico nesta mesma direção. A relação entre a variação da espessura (Δw) da cerâmica em função da tensão aplicada aos eletrodos do PZT é dada por:

$$\frac{\Delta w}{w} = d_{33}E \quad (4.1)$$

Onde w é a espessura da cerâmica, E (V/m) é o campo elétrico aplicado aos eletrodos do PZT e d_{33} é a constante de carga piezoelétrica, isto é, o coeficiente de deslocamento na direção de polarização em m/V. A sensibilidade de um transdutor FBG-PZT, que é a relação entre o deslocamento no λ_B e o campo elétrico aplicado ao PZT é obtida, partindo-se da Eq. (4.1). Como a FBG está colada ao PZT, ela sofrerá a mesma deformação, assim, combinando a Eq. (2.2) com a Eq. (4.1), e considerando a temperatura ambiente constante ($\Delta T=0$), obtemos a variação no λ_B em função da deformação sofrida pela cerâmica:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1-\rho_e)d_{33}\frac{V}{w} \quad (4.2)$$

A Equação (4.1) pode ser reescrita incluindo o número de elementos (n) de cerâmicas empregadas na construção do sensor:

$$\Delta w = nd_{33}V \quad (4.3)$$

A sensibilidade teórica do sensor FBG-PZT, a partir de uma tensão aplicada aos terminais das cerâmicas, é calculada combinando as Equações (4.2) e (4.3) e considerando $\Delta T=0$:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{V_{in}} = \lambda_B(1-\rho_e)\frac{nd_{33}}{L_{FBG}} \quad (4.4)$$

A relação entre a deformação do PZT e a tensão aplicada é linear. Quando a tensão for aplicada aos terminais do PZT, a cerâmica sofre uma deformação que produzirá as deformações na FBG. A deformação equivalente produzida pela tensão aplicada será obtida medindo-se o valor do λ_B . Cabe aqui destacar, que as variações na temperatura não podem influenciar nas respostas de strain do sensor em operação.

A Tabela II apresenta os principais materiais piezoelétricos do fabricante das cerâmicas empregadas nesta tese e suas respectivas propriedades. A cerâmica

utilizada foi a do tipo PZT-5H por possuir a maior constante de carga piezoelétrica (d_{33}), que conforme nos mostra a Eq. (4.4), permitirá aumentar a sensibilidade do sensor FBG-PZT.

TABELA II. MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS (ATCP, BRASIL) E SUAS RESPECTIVAS PROPRIEDADES.

Material	PZT-4	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H
k_p	0,60	0,50	0,61	0,60	0,63
k_{33}	0,68	0,63	0,70	0,71	0,73
d_{33} (10^{-12} C/N)	300	215	400	460	550
d_{31} (10^{-12} C/N)	-11,5	-9,5	-170	-210	-265
g_{33} ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	26	25	25	22	19
g_{31} ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	-11	-11	-11	-9	-9
K_3^T (baixo sinal) C. dielétrica relativa	1250	1000	1750	2450	3100
Fator de dissipação $\tan \delta$ (baixo campo)	0,004	0,004	0,020	0,020	0,020
Densidade (kg/m^3)	7600	7600	7650	7500	7500
Temp. de Curie ($^{\circ}\text{C}$)	325	330	360	260	190
Fator de qualidade Q_m	500	1000	75	70	65
s_{11}^E ($\times 10^{-12}$ m^2/N)	12	11	19	23	21
s_{33}^E ($\times 10^{-12}$ m^2/N)	16	14	16	16	15
N_o (Hz-m) (modo planar)	2200	2270	1950	2000	1950
N_t (Hz-m) (modo espessura)	1905	2032	1800	1950	2000

4.2 Estado da arte em sensores híbridos FBG-PZT

Nas subestações de energia elétrica os transformadores de instrumentação são equipamentos indispensáveis. Esses equipamentos estão divididos em TPs e TCs sendo utilizados para fins de monitoramento, tarifação e proteção. Embora usado dentro das subestações, eles apresentem problemas inerentes ao seu princípio de funcionamento, além de inconvenientes mecânicos, elétricos e de segurança.

Com o avanço de novas tecnologias no setor elétrico, surgiram soluções para eliminar ou minimizar os problemas dos TPs e TCs, como é o caso dos TPOs. Nos últimos anos, os TP e os TC ópticos têm alcançado um elevado grau de maturidade e começaram a competir com os transformadores de instrumentação convencionais (CHAVEZ *et al.*, 2001, RAHMATIAN *et al.*, 2001). Esses equipamentos se tornaram

ideais para ambientes de alta tensão, já que os transdutores ópticos possuem imunidade à interferência eletromagnética além do total isolamento galvânico entre o cabo de alta tensão e o potencial terra. Ao contrário de seus equivalentes convencionais, os TPs ópticos possuem menor peso e volume, o que diminui os custos com instalação em subestações próximas aos grandes centros urbanos. Além disso, os TPOs são à prova de explosões devido a descargas atmosféricas e o fato de não usarem isolamento a óleo ou SF₆, fazem com que a tecnologia seja considerada ecologicamente correta (RAHMATIAN *et al.*, 2003). Embora apresentem vantagens, os TPOs e TCOs apresentam alguns inconvenientes, incluindo a instabilidade mecânica e óptica devido à vibração e à temperatura (JAEGER *et al.*, 1995).

Alguns autores têm proposto o desenvolvimento de um TPO que não usa o efeito Pockels ou o Efeito Faraday, mas prevê o uso de uma FBG em conjunto com cerâmicas PZT. NING *et al.* (1991) foram os primeiros a utilizarem um cristal PZT em conjunto com um sensor a fibra óptica para aplicação em alta tensão. Os autores propuseram um esquema de um TC usando um interferômetro Michelson de fibra óptica em conjunto com um PZT, para medir corrente em uma linha de alta tensão. No esquema apresentado, o transdutor foi um transformador de corrente (TC) e a tensão no secundário foi aplicada ao PZT. Posteriormente, os mesmos autores fizeram avanços no desenvolvimento do sensor e substituíram o interferômetro por uma FBG e a utilizaram em conjunto com o PZT para medir corrente (FISHER *et al.*, 1997).

Um grupo do Instituto de Tecnologia em Sistemas Elétricos ABB foi quem pela primeira vez introduziu o conceito de usar o esquema de transdutor híbrido para medidas de tensão conforme descrito por PACHECO *et al.*, (1999). A fibra com a FBG inscrita foi fixada longitudinalmente em um PZT em formato de disco para medidas de alta tensão em linhas de distribuição. A partir de então, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos neste sentido, como a proposta apresentada em NIEWCZAS *et al.* (2005) que demonstraram o uso de um PZT junto com uma FBG para controlar a tensão de acionamento de bombas elétricas destinadas à indústria de petróleo e gás. Por sua vez, HATTA *et al.*, (2010) aplicaram um cristal PZT como um sensor interrogado usando uma estrutura com uma fibra monomodo-multimodo-monomodo para medir baixas tensões. Recentemente, ALLIL *et al.*, (2011) apresentaram uma pilha de PZT, juntamente com uma FBG, em uma configuração capaz de medir até 8.000 V_{DC} com uma precisão apropriada para aplicação de TPOs, de acordo com a norma IEC 60044-5.

Neste sentido, com o intuito de compensar o efeito da temperatura e aumentar a precisão nas medidas do sensor híbrido desenvolvido em NIEWCZAS *et al.* (2005),

os autores em NIEWCZAS *et al.*, (2006) estudaram as variações no pico central da FBG registrando as medidas através de um detector com um cartão de aquisição de dados e processando as leituras por meio de um controlador. Os autores utilizaram o processamento do sinal em tempo real e sua avaliação através de uma série de experimentos de laboratório. A compensação de temperatura é obtida através da calibração da compensação de histerese para um determinado conjunto de pontos de temperatura e coeficientes de calibração, quando a temperatura está dentro da faixa de interesse.

Até onde se pesquisou nas propostas realizadas por outros autores, os sistemas desenvolvidos não contemplam a compensação de temperatura através da sintonia do λ_B aplicados diretamente em um sensor elétrico-óptico, construído para prover medidas para calibração, controle, monitoramento e proteção em LTs. Nesta tese propõe-se e demonstra-se experimentalmente, dois métodos simples capazes de sintonizar o λ_B , compensando termicamente as variações de temperatura no sistema sensor FBG-PZT operando em alta tensão.

4.3 Projeto do sensor FBG-PZT

A opção de construção do sensor FBG-PZT contemplou uma solução capaz de substituir, tanto o adesivo usado na fixação da pilha de cerâmicas PZT quanto o adesivo usado na colagem da FBG no suporte mecânico. No conjunto mecânico desenvolvido em RIBEIRO *et al.*, (2011), ilustrado no desenho da Figura 4.2, a pilha contendo as 10 cerâmicas separadas por chapas de cobre, foi fixada por meio de um adesivo à base de epóxi (EPO-TEK® 302-3M, 2010). A resposta do sensor FBG-PZT, inicialmente satisfatória, encontrou um problema quando o sensor foi submetido às variações de temperatura devido à elasticidade do adesivo.

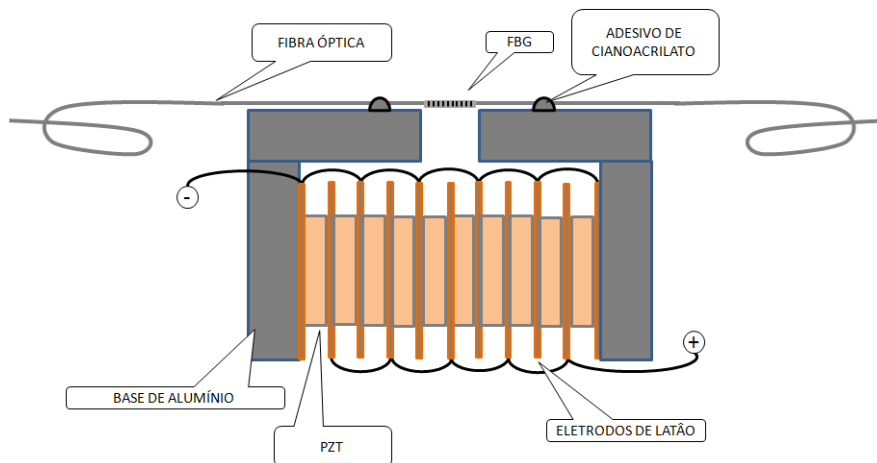


Figura 4.2: Configuração inicial do sensor FBG-PZT. (adaptado de RIBEIRO, *et al.*, 2011).

O adesivo epóxi, usado na união das cerâmicas com as chapas de cobre e fixação da pilha no suporte em alumínio, não suportou o incremento na temperatura, fazendo com que todo o conjunto mecânico cedesse, mascarando os resultados. Conforme é possível observar no gráfico da Figura 4.3, extraído da folha de dados técnicos do adesivo Loctite 416™ (Henkel, Brasil), à medida que a temperatura aumenta o adesivo vai perdendo sua resistência.

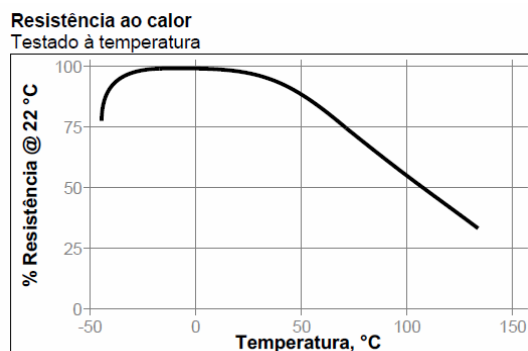


Figura 4.3: Resistência do adesivo Loctite 416™ (Brasil) ao calor.

O ponto de partida para uma proposta de compensação térmica do sensor FBG-PZT é a construção de um conjunto mecânico capaz de suportar o uso contínuo em ambientes sujeitos às variações na temperatura, já que durante a operação em alta tensão as cerâmicas aquecem fazendo com que os adesivos epóxis ou de cianoacrilato usado para colar as peças, acabem cedendo e interferindo nos resultados das medidas.

Em função da estrutura do conjunto mecânico envolvendo diferentes materiais e da dificuldade no manuseio da FBG, devido à sua fragilidade, optou-se pela

modificação do conjunto mecânico em etapas. Os passos a seguir mostram as etapas consecutivas, até a construção do sensor híbrido FBG-PZT para a aplicação das propostas de compensação de térmica apresentadas e discutidas nesta tese e a obtenção dos resultados do sensor nas condições de operação em alta tensão. No desenvolvimento de cada etapa de construção, foram realizados ensaios para validar o sensor até o seu ensaio final em alta tensão.

4.3.1 Método de fixação da FBG no arranjo mecânico através do processo de metalização

Na primeira etapa da construção, o objetivo foi alterar o método de fixação anteriormente usado para colar a FBG no suporte mecânico. Em MINAKUCHI *et al.*, (2014) os autores ressaltam que para assegurar a qualidade do adesivo usado na FBG, diversos estudos que avaliam o estado químico e a qualidade das superfícies adesivas sobre a FBG têm sido realizados e os resultados mostram a influência das camadas adesivas nas respostas de sensibilidade do sensor. Os autores mediram a influência de uma segunda camada adesiva aplicada sobre o sensor e de acordo com os resultados, a qualidade do adesivo depende do tipo de cura efetuada.

Conforme mostra a Figura 4.4, no protótipo inicial a FBG foi colada sobre a estrutura de alumínio usando o adesivo à base de cianoacrilato (*Loctite 416*) junto com uma fita adesiva. Durante a operação do sensor FBG-PZT, inconvenientes surgiram durante os ensaios: o adesivo perdeu sua propriedade adesiva ocasionando o desprendimento da FBG da estrutura metálica após um aumento na temperatura. Este fato comprova que, embora alguns adesivos ofereçam resistência à temperatura em torno de 100°C, dependendo do tipo de material ou da superfície onde se deseja colar a FBG, as propriedades do adesivo não se mantêm durante os ciclos de aquecimento. Na Figura 4.4 mostra uma FBG colada sobre a estrutura de alumínio usando o adesivo de cianoacrilato em conjunto com uma fita adesiva metalizada. A fita adesiva descolou da estrutura após o protótipo sensor ter sido submetido a uma variação de temperatura entre 25°C e 45°C durante ensaios consecutivos.

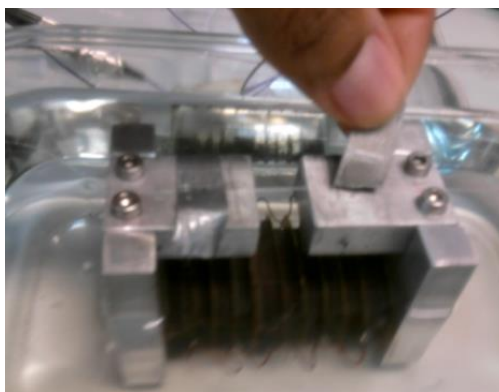


Figura 4.4: FBG colada usando um adesivo Epóxi.

Para contornar este problema, o primeiro método proposto na tese para colar a FBG na estrutura foi usar um processo de metalização através da deposição de uma camada de cobre sobre a fibra óptica contendo a FBG. A camada metálica depositada sobre a fibra permite que o sensor seja soldado diretamente na estrutura, evitando o uso de adesivos.

Vários métodos têm sido desenvolvidos para a deposição de filmes finos HENKEL (1994), CHEN *et al.*, (2012), KATHURIA *et al.*, (2011), SONG *et al.*, (2007). Em MÜLLER *et al.*, (2008), os autores removeram o revestimento primário e depositaram cobre sobre a fibra usando a técnica de galvanoplastia e, em seguida, soldaram a FBG na estrutura, aplicando a solda diretamente sobre a fibra. Embora seja uma técnica simples e que permite uma deposição uniforme, este método esbarra no problema da necessidade de retirar o acrilato da fibra, antes de aplicar a camada condutiva. A retirada do buffer provoca microfissuras na superfície da fibra diminuindo sua resistência mecânica (LUPI *et al.*, 2005). A solução encontrada para evitar a retirada da cobertura polimérica antes da deposição do metal na FBG, foi usar uma DTG (Draw Tower Grating). Neste caso particular, a deposição do metal na fibra foi feita por cima da camada deOrmocer®.

Para a deposição do cobre na fibra contendo a DTG, foi usada a técnica de ablação a laser. O processo deposição é usado para a formação de uma película fina através da interação entre o laser e materiais que evaporam partículas fundidas, que ao se solidificarem atingem a superfície do substrato, (MAFUNE *et al.*, 2000, POONDI *et al.*, 2000). A deposição de filmes finos tem atraído à atenção na produção de nanopartículas e filmes com espessura de micro e nanômetros e sua aplicação tem se estendido por diversas áreas de aplicação (SIBBALD *et al.*, 1996, ROSSIGNOL *et al.*, 1998, SEKAR *et al.*, 2012). Nesta técnica, os pulsos de laser são utilizados para evaporar a matéria a partir da superfície do alvo. Como resultado, a pluma de vapor é

ejetada normal à superfície do alvo e depositada sobre a superfície do material, conforme mostra a Figura 4.5.

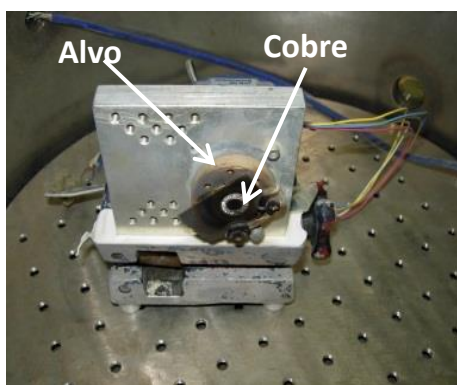


Figura 4.5: Alvo com o cobre posicionado.

O revestimento de cobre, depositado em cima do revestimento da fibra contendo a DTG, foi realizado usando um laser de Nd:YAG com comprimento de onda de 1064 nm, 5 ns de pulsos @ 10 Hz, um ângulo de incidência de 30° sobre o alvo, com 10 mm de distância, paralelo ao substrato. A Figura 4.6 mostra o sistema de ablação a laser com o laser Nd:YAG, a câmara de vácuo e o suporte para o alvo com a peça de cobre. Os experimentos foram realizados com uma intensidade do laser 7.8 W e o número de pulsos variaram de acordo com a energia total necessária para uma espessura apropriada.

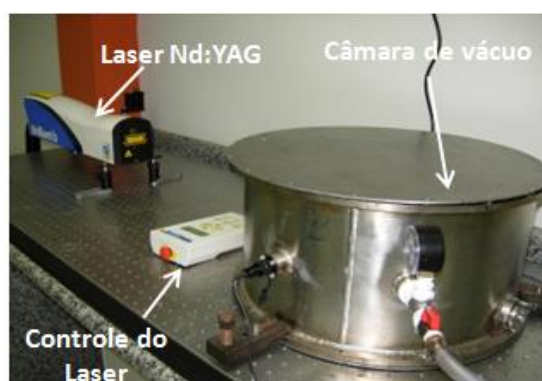


Figura 4.6: Setup experimental do sistema de ablação a laser.

Antes de aplicar a camada de cobre, a DTG foi imersa por 10 minutos em um banho ultrassônico contendo álcool isopropílico, para eliminar as impurezas e possibilitar a adesão do metal na superfície da DTG. A DTG (FBGs, Bélgica) contendo

1 metro de comprimento total da fibra, possui um λ_B de 1545.11 nm, uma refletividade em torno de 30%, o FWHM de 0,15 nm e o comprimento total da grade é de 8 mm. A espessura da camada de cobre e a sensibilidade da FBG foram medidas depois do processo de deposição. A Figura 4.7 mostra uma foto no MEV de uma DTG, após a deposição do filme de cobre.

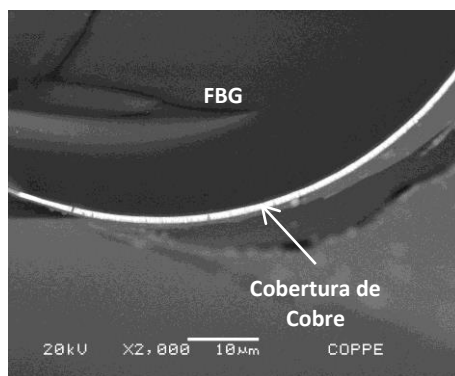


Figura 4.7: Microscopia eletrônica da seção transversal de uma FBG coberta com cobre.

Após o processo de deposição, a DTG metalizada foi colocada dentro de uma estufa e submetida a uma variação de temperatura entre 25 °C e 100°C para avaliar o efeito da deposição metálica sobre a sensibilidade térmica da DTG. As variações no λ_B foram obtidas usando um interrogador comercial e para registrar as variações de temperatura, foi utilizado o termômetro digital de dois canais, modelo TD-990 (ICEL, Brasil), com resolução de 0.1°C e exatidão de $\pm (0.3\% \text{ leitura} + 1^\circ\text{C})$. Na Figura 4.8, são mostradas duas curvas, uma é obtida antes do depósito de cobre na superfície da fibra óptica, enquanto a outra curva mostra a sensibilidade térmica da fibra óptica contendo a DTG após o processo de metalização. A sensibilidade térmica encontrada para a DTG sem depósito foi 11.95 pm/°C e a sensibilidade térmica da DTG com depósito foi de 12.28 pm/°C. A variação no λ_B da DTG com e sem depósito em função da temperatura possuem valores muito próximos, conforme mostra o gráfico da Figura 4.8. É possível observar pelo gráfico, que a conduta térmica da FBG permaneceu linear e que a deposição do filme de cobre, sobre a superfície da fibra óptica com a camada de Ormocer, não alterou a sensibilidade térmica do sensor de Bragg. Para aumentar a sensibilidade térmica da FBG, é possível aplicar a camada de cobre diretamente sobre a FBG.

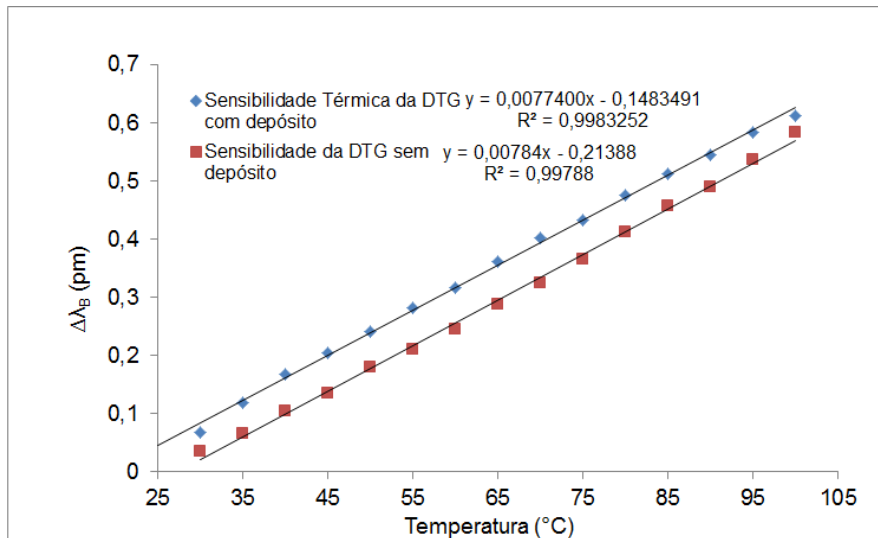


Figura 4.8: Curva da sensibilidade térmica da DTG antes e após o processo de metalização.

Entretanto, alguns fatores levaram ao abandono deste método de fixação da FBG. Entre eles podemos citar, a necessidade de usar uma placa de cobre sobre a superfície do alumínio para soldar a FBG, pois a solda não fixa no alumínio, somente no cobre. Processo este, que ainda envolvia o uso de um adesivo entre a placa de cobre e a superfície de alumínio. Outro fator que dificultou a aplicação deste método foi o tempo necessário capaz de promover a metalização, suficiente para soldar a barra de fibra óptica sobre a estrutura. Apesar destas dificuldades, o sensor foi submetido às variações de tensão CC/CA e as respostas dos ensaios mostraram que a espessura de cobre depositada foi suficiente para soldar a DTG na estrutura e obter as respostas das medidas, conforme mostram os resultados experimentais apresentados em RIBEIRO *et al.*, (2013).

4.3.2 Fixação da FBG usando um parafuso de fixação

A segunda proposta para a fixação da FBG na estrutura é usar um parafuso confeccionado em metal, passando pela cavidade interna do stack PZT. Na montagem inicial foram usinados dois parafusos em latão com 60 mm de comprimento, rosqueados com passo de 0.8 mm. Os parafusos possuem a mesma dimensão para evitar uma possível ruptura ou o desalinhamento da FBG durante a fixação na estrutura. Em cada extremidade, a peça foi rebaixada permitindo que a FBG fosse posicionada em um groove e colada na parte rebaixada feita no parafuso. O desenho da Figura 4.9 ilustra a fibra colada no parafuso rosqueado.

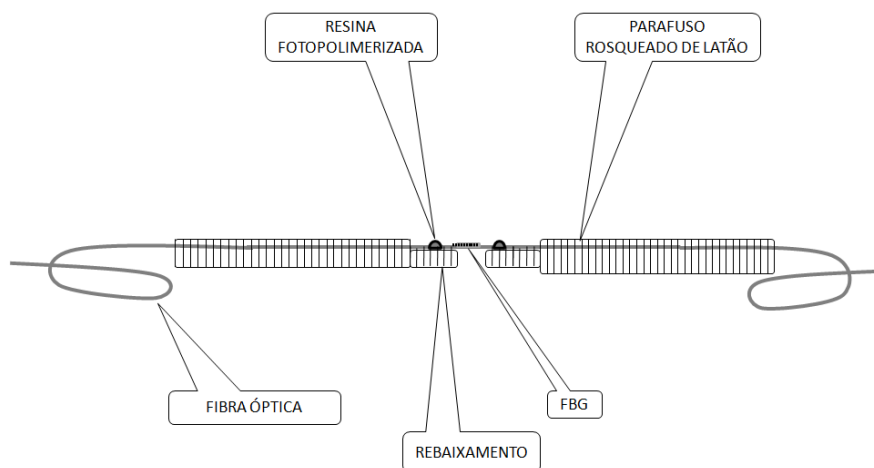


Figura 4.9: Parafuso rosqueado em latão para fixação da FBG.

Conforme demonstrado anteriormente, através da Eq. (4.4), quanto menor L_{FBG} maior a sensibilidade do sensor. Assim, nesta etapa tomou-se o cuidado de colar as extremidades da FBG o mais próximo possível uma à outra, a fim de aumentar a sensibilidade do sensor sem, contudo danificá-lo no momento de colar. O método de colagem da FBG no parafuso também possibilitou um perfeito contato entre o sensor e estrutura conforme apresentamos a seguir.

Para colar a FBG no parafuso de latão foi utilizada uma resina dual composta, usada como material de adesão no preenchimento e restauração de estruturas dentais. Os elementos em sua composição proporcionam propriedades físicas e mecânicas (força de união, resistência ao desgaste e resistência à compressão) superior aos demais materiais de cimentação (PRAKKI *et al.*, 2001). A resina usada *Enforce-Core dual* do fabricante Dentsply (Brasil), possui uma coloração semelhante à de estruturas dentais, e é composta de Base+Catalisador. Os elementos presentes na composição tanto da base quanto do catalisador são: Metacrilatos, Carga Inorgânica, Pigmento, Fotoiniciadores e Estabilizantes.

O processo de endurecimento da resina é feito através do processo de polimerização. Nas resinas fotoativadas, esse processo tem início quando ocorre a sensibilização pela luz de uma molécula fotoativada presente na resina. Para ativar a fotopolimerização da resina, um LED (*Light Emission Diode*) com comprimento de onda entre 450 nm e 460 nm e potência efetiva luminosa de 600 mW/cm² é utilizado. O fotopolimerizador *Kavo Poly 600* (KAVO, Brasil), mostrado na Figura 4.10 possui uma peça de mão em alumínio acoplada a uma ponteira de fibra óptica que garante uma maior eficiência na condução da luz por uma ponteira de fibra óptica, até a

superfície onde será fotopolimerizada a resina, conforme mostra a Figura 4.11. A emissão de luz é feita com pré-aquecimento de 7 segundos e com o aumento gradativo da potência, até atingir o pico máximo de 1100 mW/cm^2 , permanecendo assim durante 3 segundos e reduzindo, gradativamente, durante os outros 3 segundos, até atingir a potência de 600 mW/cm^2 .



Figura 4.10: Fotopolimerizador *Kavo Poly 600*.

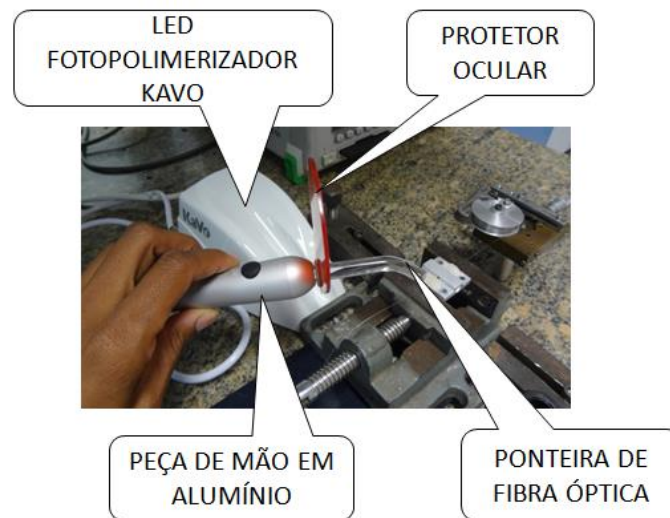


Figura 4.11: Detalhes da ponteira de fibra óptica.

A seguir é descrito, em etapas, o processo de fixação da FBG no parafuso de latão e a acomodação na estrutura do sensor FBG-PZT.

- 1) Limpeza da superfície do parafuso de latão para remoção das impurezas e retirada de toda gordura existente. A limpeza é feita usando o ácido Condaporcelana contendo ácido fluorídrico a 10% para promover uma perfeita interação entre a resina e a superfície.
- 2) Lavagem em água filtrada até a remoção total do produto.

- 3) Secagem do local com jatos de ar usando um soprador térmico, para retirar o excesso de umidade.
- 4) Procedimento de silanização usando uma solução etanólica de 3-Metacriloxipropiltrimetosilano hidrolizado para promover a união química da resina. O silano Prosil é usado como agente químico em processos de adesão e cimentação de resina.
- 5) Secagem do local com jatos de ar. Não foi necessária a retirada do produto.
- 6) Aplicação do adesivo *Alpha Bond Light* (Nova DFL, Portugal) a fim de promover a adesão da resina fotoativada.
- 7) Fotopolimerização do adesivo por 20 minutos.
- 8) Mistura em quantidades iguais, usando uma espátula, da resina *Enforce-Core* base e o catalisador até adquirir uma coloração uniforme. Obs: Após 30 segundos, a resina começa a endurecer, não sendo mais possível realizar a adesão da FBG à superfície de contato.
- 9) Incrementos com 1 mm de mistura (base+catalisador) entre a superfície de contato e a FBG foram feitos, a fim de garantir a perfeita adesão do material.
- 10) A princípio, uma camada de resina foi aplicada sobre o parafuso, posteriormente a fibra foi posicionada no groove e por último, foi aplicada mais uma camada de resina, cobrindo toda a superfície da fibra.
- 11) Fotopolimerização da resina por 60 minutos.

A Figura 4.12 mostra a FBG colada parafuso de latão usando a resina fotoativada. A resina foi aplicada nas extremidades da fibra óptica, com a FBG no meio.

Um ponto importante a ser destacado no uso da resina, é o fato dos materiais em sua composição permitirem a aplicação de uma camada espessa e homogênea sobre a fibra além de permitir que a quantidade aplicada seja moldada no parafuso. Aliado a isto, está o fato da FBG ser uma estrutura cujo diâmetro do cladding em torno de 125 μm permite que a camada de resina se acomode no sensor, permitindo que a resina a cubra por cima e por baixo. Nos cálculos e experimentos realizados neste trabalho o comprimento da FBG foi de 10 mm e a camada de resina coberta na fibra foi de ≈ 3 mm.

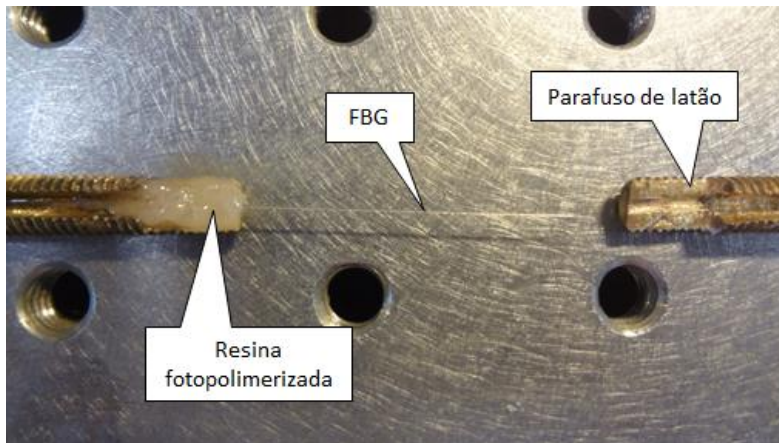


Figura 4.12: Fixação da FBG no parafuso de latão.

4.3.3 Fixação da pilha de cerâmicas PZT

Para formar a pilha de cerâmicas, cada pastilha PZT foi separada por uma chapa de latão (eletrodos) de 0.10 mm onde foram aplicados os contatos elétricos formando o stack (pilha) PZT. Os eletrodos foram organizados em ambos os lados dos discos e foram conectados em paralelo de tal maneira que todos os discos fossem submetidos à mesma tensão. Uma base em alumínio serviu como suporte para acomodar o stack PZT e o parafuso com a FBG colada, conforme veremos na próxima seção.

Nesta etapa, o adesivo epóxi para formar o stack PZT, unindo as cerâmicas e os eletrodos, foi substituído por quatro barras rosqueadas em aço inoxidável. Foram feitas quatro furações na base de alumínio para permitir que as barras em aço inoxidável fossem posicionadas e guiadas nas quatro extremidades da base. Em seguida foi utilizada uma mola em cada parafuso para unir e garantir o contato entre as faces das cerâmicas PZT separadas pelos eletrodos de latão. A Figura 4.13 mostra a vista frontal do sensor. Esta construção garantiu o alinhamento da pilha de cerâmicas além de permitir os ensaios do sensor FBG-PZT em temperaturas elevadas, já que eliminamos o adesivo epóxi, usado na montagem inicial para formar o a pilha de cerâmicas PZT.

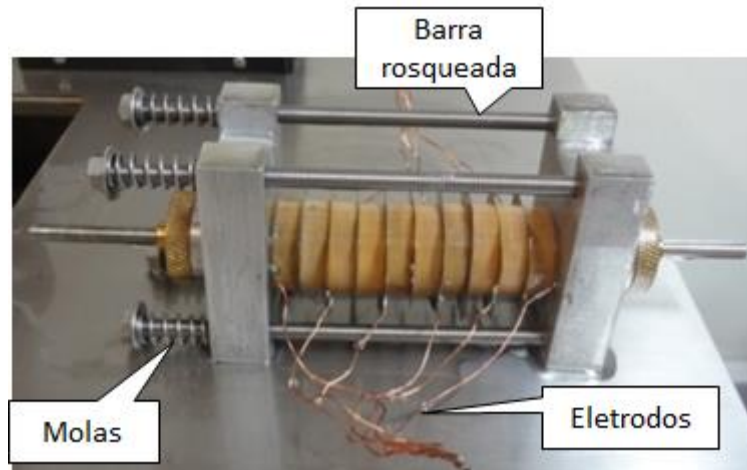


Figura 4.13: Vista frontal do sensor FBG-PZT com as molas e as barras rosqueadas.

4.3.4 Mecanismo de sintonia mecânica através do ajuste do λ_B

Uma estrutura em forma de disco, usinada em alumínio, foi construída para guiar o parafuso de latão com a FBG já colada. Nesta peça, um pino de fixação em aço foi usado para impedir o movimento giratório do parafuso, além de garantir o alinhamento da FBG. A extremidade do pino foi usinada em formato triangular para evitar que a ponta do pino atinja o groove esmagando ou danificando a fibra. Cabe ressaltar que o pino de fixação é inicialmente posicionado de modo a evitar a torção no parafuso, mas está livre para permitir que o parafuso com a FBG colada possa se deslocar livremente. Uma porca de fixação maciça em latão foi usada para fixar o parafuso sintonizando o λ_B da FBG. Foram feitas seis furações na porca para diminuir o peso da peça. Com o pino de fixação parcialmente posicionado ideal, é feita a sintonia do λ_B , simplesmente girando a porca até o ajuste na posição desejada. O esquemático final do sensor é ilustrado na Figura 4.14.

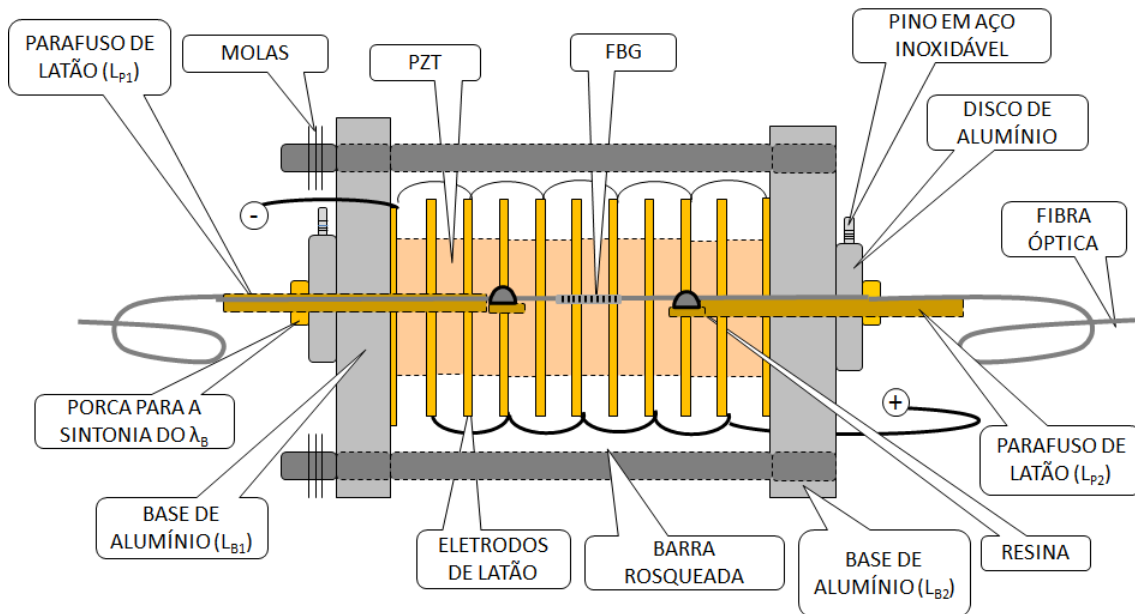


Figura 4.14: Projeto do sensor FBG-PZT.

Uma característica importante nesta proposta de construção é a sua versatilidade, já que é possível esticar e sintonizar o λ_B da FBG após a sua fixação no parafuso, evitando esticar previamente a FBG usando um micrômetro, por exemplo. Na configuração inicial do sensor, ilustrada na Figura 4.2, uma extremidade da FBG foi colada, enquanto a outra extremidade antes de ser colada na estrutura em alumínio foi esticada usando um micrômetro. Em seguida, a outra extremidade é colada na estrutura de alumínio. Este método de sintonia, também permite a flexibilidade na utilização de redes de Bragg no esquema de demodulação por redes gêmeas, já que é possível a escolha de uma FBG filtro de acordo com a escolha no ajuste no λ_B da FBG sensora e vice-versa. A Figura 4.15 mostra a fotografia com a visão lateral do sensor FBG-PZT com o pino de fixação, a porca, o parafuso, a base e o disco em alumínio.

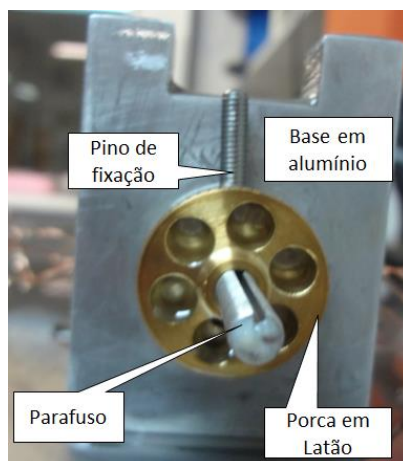


Figura 4.15: Vista lateral do sensor FBG-PZT construído.

Quando aplicamos um campo elétrico alternado em uma cerâmica piezoelétrica ocorre a dissipação de energia na forma de calor devido às perdas mecânicas e dielétricas (ATCP, 2004). Esta propriedade está relacionada ao fator de dissipação das cerâmicas, que neste caso, para uma cerâmica PZT-5H, seu valor é 0.004 conforme apresentado na Tabela II. O aquecimento das cerâmicas irá influenciar nas respostas do sensor FBG-PZT já que as variações térmicas sofridas pelo sensor em alta tensão irá provocar o deslocamento do λ_B da FBG colada no parafuso.

Deste modo, a partir do projeto de construção do sensor FBG-PZT desenvolvido, o próximo capítulo apresenta uma proposta de compensação térmica do sensor usando a mecânica do protótipo. Combinando parafusos de materiais que apresentem diferentes valores de coeficientes de dilatação térmica e variando seus comprimentos até alcançar um posicionamento ideal, é possível controlar e estabilizar o λ_B , isto é, a insensibilidade do sensor à temperatura.

Capítulo 5

5. Proposta de compensação térmica mecânica

Enquanto no capítulo anterior foi apresentada a construção do sensor FBG-PZT, este capítulo é dedicado à primeira proposta de compensação térmica sugerida neste trabalho, usando as partes mecânicas da construção. A proposta sugere uma compensação passiva do sensor FBG-PZT, combinando parafusos feitos com materiais de diferentes coeficientes de dilatação térmica e variando o comprimento de cada parte. A estrutura mecanicamente compensada está baseada no conceito de se promover expansões positivas e negativas do conjunto sensor, combinando as partes da construção, de modo a compensar a dilatação térmica sofrida pelo sensor e conseqüentemente mantendo constante seu comprimento de onda de Bragg (λ_B). Esta implementação apresenta como vantagem o fato de ser uma proposta simples, podendo ser desenvolvida em uma estrutura apropriada usando materiais de baixo custo e de fácil aquisição no mercado.

5.1 Sensibilidade térmica do sensor FBG-PZT

Para compensar mecanicamente as variações térmicas sofridas pelo sensor FBG-PZT, é necessário prever teoricamente sua sensibilidade térmica considerando as dimensões e os coeficientes de dilatação térmica dos materiais envolvidos na construção, conforme mostra o esquemático da Figura 5.1.

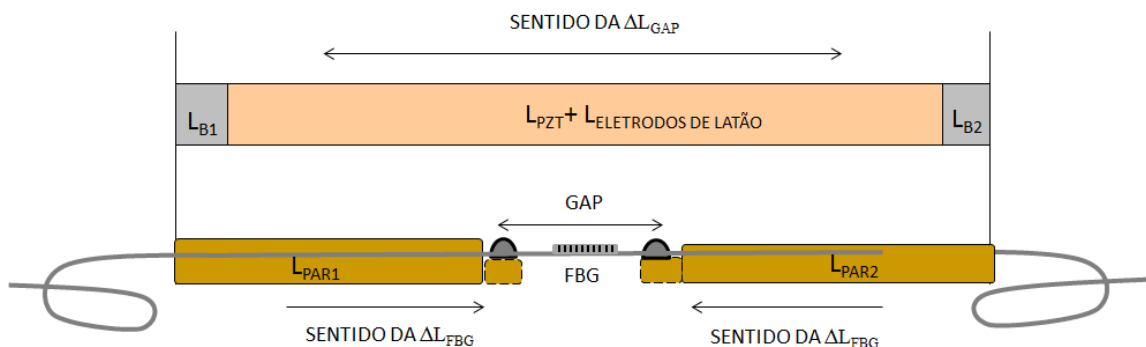


Figura 5.1: Partes da mecânica de construção do sensor FBG-PZT.

Para calcular a sensibilidade térmica teórica do sensor partimos da Eq. (5.1) que representa a variação no comprimento do GAP (L_{FBG}), ou seja, a deformação sofrida pela FBG (ΔL_{FBG}) durante as variações de temperatura. De acordo com a Figura 5.1, temos que:

$$\Delta L_{FBG} = \{[(L_{B1}\alpha_{B1}) + (L_{B2}\alpha_{B2})] + [(L_{PZT}\alpha_{PZT})] + [(L_{LATÃO}\alpha_{LATÃO})] - [(L_{PAR1}\alpha_{PAR1}) + (L_{PAR2}\alpha_{PAR2})]\} \Delta T \quad (5.1)$$

Onde:

- L_{B1} α_{B1} : são o comprimento e o coeficiente de dilatação térmica da base 1 em alumínio, que serve como suporte para acomodar o stack PZT e o parafuso com a FBG colada, conforme os detalhes da construção demonstrados no Capítulo 4;
- L_{B2} α_{B2} : são o comprimento e o coeficiente de dilatação térmica da base 2 em alumínio, que serve como suporte para acomodar o stack PZT e o parafuso com a FBG colada, conforme apresentado no Capítulo 4;
- L_{PZT} e α_{PZT} : são o comprimento e o coeficiente de dilatação térmica do stack de cerâmicas PZT, ou seja, a pilha composta por 10 cerâmicas PZT-5H.
- $L_{LATÃO}$ e $\alpha_{LATÃO}$: são o comprimento e o coeficiente de dilatação térmica dos eletrodos de latão (eletrodos) onde a tensão é aplicada.
- L_{PAR1} e α_{PAR1} : são o comprimento e o coeficiente de dilatação térmica do parafuso 1 de latão, onde uma extremidade da FBG é colada, conforme mostrado na Fig. 4.9.
- L_{PAR2} e α_{PAR2} : são o comprimento e o coeficiente de dilatação térmica do parafuso 2 de latão, onde a outra extremidade da FBG é colada, conforme ilustrado na Fig. 4.9.

Quando o sensor é submetido a uma variação de temperatura, tanto a base em alumínio quanto o stack (PZT+eletrodos) sofrem uma expansão fazendo com que aumente o comprimento da FBG. Neste caso, a fibra também sofre uma expansão aumentando o λ_B . Simultaneamente a variação de temperatura também promoverá a dilatação dos parafusos, só que neste caso, diminuirá o L_{FBG} , pois os parafusos crescem na direção oposta ao PZT, relaxando a FBG e provocando a diminuição no λ_B . Na proposta de compensação mecânica, a ideia é igualar os dois efeitos.

Considerando a deformação da FBG dada pela Eq. (5.1), tem-se o strain da FBG dado por (5.2):

$$\varepsilon_{\text{FBG}} = \frac{(\Delta L_{\text{FBG}})\Delta T}{L_{\text{FBG}}} \quad (5.2)$$

Substituindo as Equações (5.1) e (5.2) na Eq. (2.2), chegamos a Eq. (5.3):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \frac{\{[(L_{B1}\alpha_{B1})+(L_{B2}\alpha_{B2})]+(L_{\text{PZT}}\alpha_{\text{PZT}})]+ [(L_{\text{LATÃO}}\alpha_{\text{LATÃO}})]- [(L_{\text{PAR}}\alpha_{\text{PAR}})]\} \Delta T}{L_{\text{FBG}}(\alpha + \eta)\Delta T} + \quad (5.3)$$

A Eq. (5.3) nos mostra que o λ_B da FBG pode ser compensado para uma variação térmica nula do sensor FBG-PZT, ou seja, um deslocamento zero no λ_B durante as mudanças de temperatura. Assim sendo, para a compensação de temperatura do sensor, tem-se:

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = 0 \quad (5.4)$$

Conforme mencionado anteriormente, para o cálculo da Eq. (5.3) quando o sensor FBG-PZT está sujeito às variações de temperatura, é necessário conhecer o comprimento e o coeficiente de expansão térmica de todos os materiais envolvidos em sua construção, bem como os parâmetros da FBG usada. Como o coeficiente de dilatação da cerâmica PZT não é um parâmetro conhecido, na próxima seção é apresentado um desenvolvimento experimental para calcular o coeficiente de dilatação térmica (α_{PZT}) da cerâmica tipo PZT5H. Em relação aos parâmetros de uma FBG, sua constante fotoelástica (ρ_e) e o coeficiente termo-óptico (η) dependem do índice de refração da fibra óptica usada, neste sentido, na próxima seção também serão apresentados os experimentos para a determinação destas constantes.

5.2 Ensaio experimental para a determinação da constante fotoelástica (ρ_e), do coeficiente termo-óptico (η) da fibra e do coeficiente de dilatação térmica da cerâmica PZT-5H

5.2.1 Determinação da constante fotoelástica (ρ_e) da fibra

Para estudar o deslocamento do λ_B em função de um strain aplicado, é necessário calcular o coeficiente de deformação óptica (ρ_e) ou constante fotoelástica da fibra. De acordo com os valores teóricos nos estudos envolvendo FBG, esse valor é

0.22. Considerando a Eq. (2.4) apresentada anteriormente, é possível calcularmos o ϵ_{FBG} pelo módulo de Young da fibra, que neste caso representa a razão entre a tensão (stress) e a deformação (strain) na fibra. De acordo com a Eq. (5.5) temos:

$$\epsilon_{\text{FBG}} = \frac{\Delta L_{\text{FBG}}}{L_{\text{FBG}}} = \frac{1}{Y} \frac{F}{A} \quad (5.5)$$

Onde F é a força aplicada na fibra, A é a área da seção transversal da fibra e Y é o módulo de Young da sílica. Substituindo a Eq. (5.5) na Eq. (2.2) e considerando $\Delta T=0$, chegamos ao cálculo da variação do λ_B pelo módulo de Young, que pode ser escrita como:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \frac{1}{Y} \frac{F}{A} \quad (5.6)$$

Segundo LAGAKOS *et al.*, (1981) o módulo de Young da cobertura da fibra tem um papel importante na sua sensibilidade. Quando o módulo de Young aumenta, a sensibilidade também aumenta. Revestimentos muito suaves tem pouco efeito na sensibilidade devido ao baixo módulo de Young. No caso de uma FBG, a cobertura polimérica não é considerada já que, antes da gravação da FBG na fibra óptica, a cobertura (buffer) é retirada. Assim, consideramos o módulo de Young da FBG como sendo o módulo para uma fibra de sílica (SiO_2), isto é ≈ 72.45 GPa (LAGAKOS *et al.*, 1981).

Conforme citado anteriormente, a constante (ρ_e) representa a variação do índice de refração com a deformação e foi determinada nesta tese, através de um experimento que consiste de uma fibra óptica com $\lambda_B = 1536.13$ nm @25°C, uma fonte de banda larga (ASE), um circulador óptico e um analisador de espectro óptico (OSA). São aplicados diferentes pesos na fibra, de valores conhecidos, enquanto se mede o deslocamento no λ_B , que é medido como função do deslocamento produzido na FBG. Os deslocamentos no λ_B produzidos pelos diferentes pesos foram registrados usando o OSA. A Figura 5.2 mostra a montagem experimental para a determinação de ρ_e .

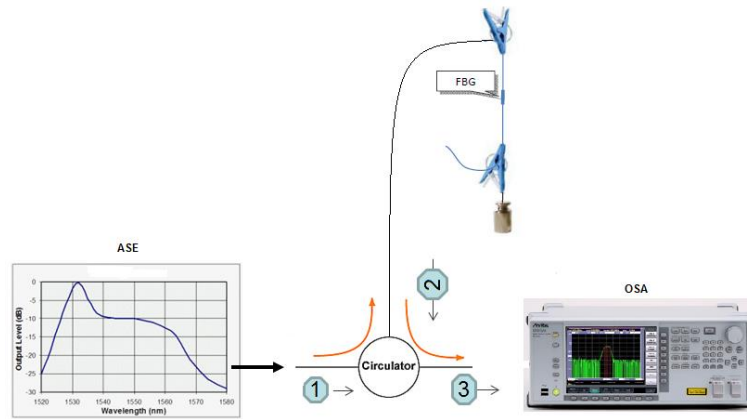


Figura 5.2: Montagem experimental do ensaio para determinação da constante fotoelástica (ρ_e) da fibra.

Considerando os dados da Tabela III e substituindo-os na Eq. (5.6) obtém-se o gráfico da Figura 5.3. Este gráfico representa a relação entre a variação no λ_B e o strain na FBG, isto é, sua sensibilidade à deformação. No gráfico temos no eixo y a variação do λ_B em função de cada peso aplicado à FBG e o eixo x corresponde ao cálculo da deformação da FBG em função do módulo de Young da fibra, conforme apresentado na Eq. (5.6).

TABELA III. PARÂMETROS DA FBG PARA O CÁLCULO DA CONSTANTE FOTOELÁSTICA DA FIBRA

Módulo de Young da sílica	72.45 Gpa
1N	0.102 Kgf
Área da seção reta da fibra	$12.3 \times 10^{-9} \text{ m}^2$

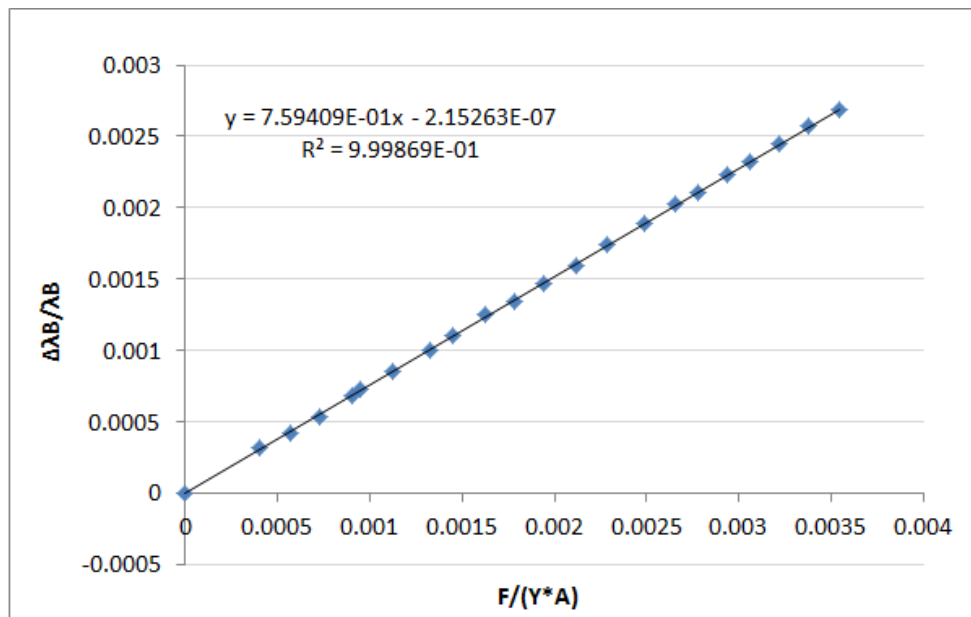


Figura 5.3: Sensibilidade da FBG à deformação.

O valor de 0.75 para a variação $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ encontrado está próximo ao valor teórico de 0.78 para as fibras ópticas de sílica, segundo apresenta os trabalhos de Kersey *et al.*, (1997) e YU-LUNG *et al.*, (1999). O valor da constante fotoelástica é calculado igualando o termo $(1 - \rho_e)$ ao resultado encontrado no gráfico da Figura 5.3, neste caso 0.75. Assim, para a FBG usada nesta tese, o valor de ρ_e é 0.25. Embora sejam variações relativamente pequenas, de acordo com YU-LUNG *et al.*, (1999) e ALAVIE *et al.* (1995), as diferenças nos valores são consequência das variações no índice de refração.

5.2.2 Determinação do coeficiente termo-óptico (η)

Quando a FBG está submetida às variações de temperatura, outro parâmetro que deve ser fornecido é o coeficiente termo-óptico (η) da fibra (FBG) utilizada. Em YU-LUNG *et al.*, (1999), os autores mediram a sensibilidade experimental de uma FBG solta (livre) e encontraram o valor de $6.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Os autores em MELTZ *et al.*, (1991) investigaram a variação no coeficiente termo-óptico (η) de uma fibra de germanosilicato medida em 589.3 nm. Os resultados mostraram uma variação no η de $7.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ em baixas temperaturas e $10.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ em temperaturas elevadas. Esses valores mostram que os valores do coeficiente termo-óptico (η) variam dependendo do tipo de fibra e em função da temperatura em que a fibra está submetida.

Portanto, neste experimento, determinamos o η das FBGs usadas nesta tese e fabricadas no LIF. O ensaio é realizado inicialmente calibrando uma FBG de

referência. A FBG com λ_B de 1536.70 nm @25°C é colocada dentro de um *becker* contendo água e é submetida à uma variação de temperatura entre 25°C e 90°C. As variações na temperatura foram registradas usando o termômetro digital TD-990 (ICEL, Brasil), e as variações no λ_B da FBG foram obtidas usando o interrogador comercial FBG-SCAN 708 (FOS&S, Bélgica). A Figura 5.4 mostra o setup experimental usado.

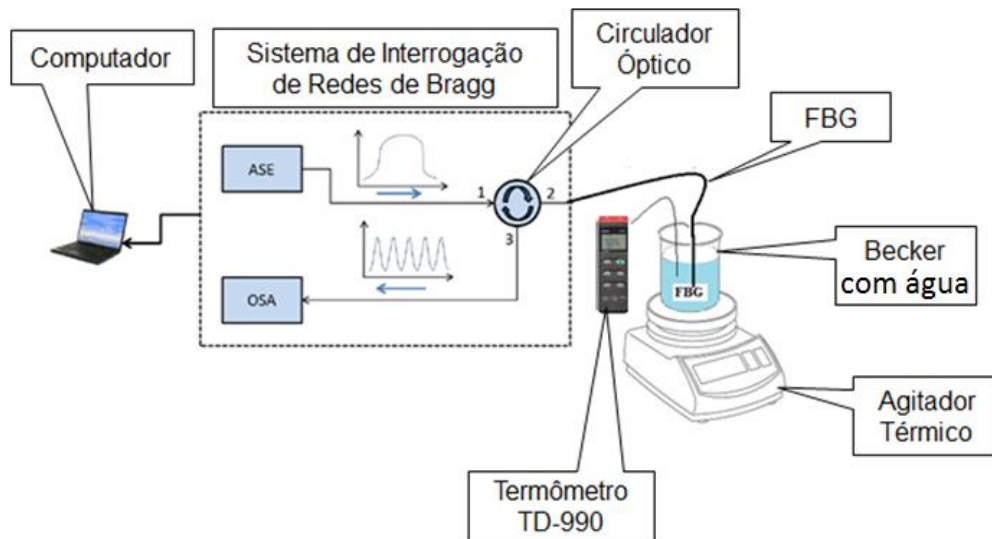


Figura 5.4: Montagem experimental para a determinação do coeficiente termo-óptico (η) da fibra.

A curva experimental da Figura 5.5 mostra o resultado da calibração da FBG e de acordo com o gráfico a sensibilidade experimental da FBG à temperatura é 11.21 pm/°C.

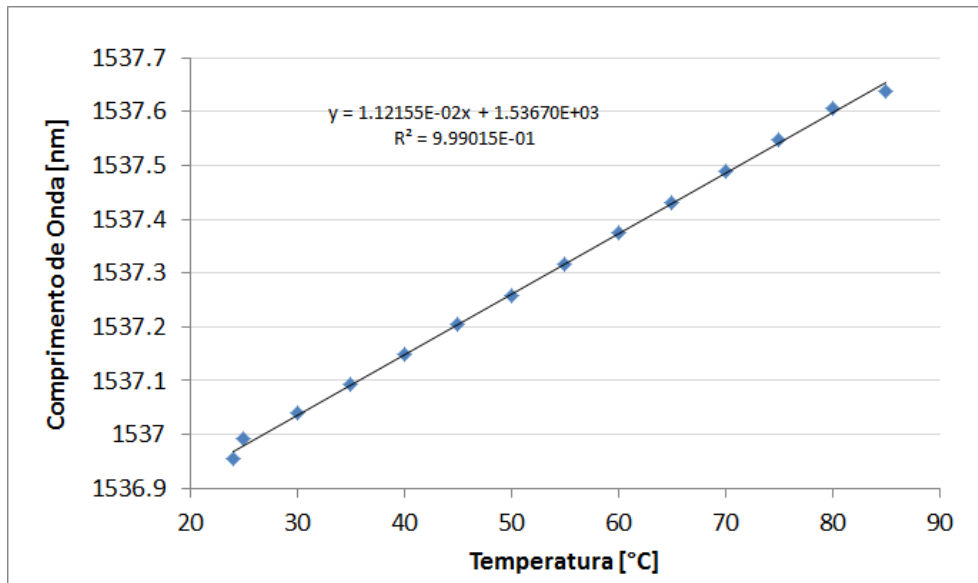


Figura 5.5: Sensibilidade da FBG à temperatura.

Quando a FBG não está colada em nenhuma estrutura, é equivalente a considerar o primeiro termo na Eq. (2.2) nulo, ou seja, temos então a Eq. (2.6). Reescrevendo a Eq. (2.6) para o cálculo do coeficiente termo-óptico (η) da fibra, temos:

$$\eta = \frac{\left(\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T}\right) - (\lambda_B \alpha_{\text{FBG}})}{\lambda_B} \quad (5.7)$$

TABELA IV. PARÂMETROS DOS MATERIAIS ENVOLVIDOS NO ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE TERMO-ÓPTICO

Valores numéricos para o cálculo do coeficiente termo-óptico	
$\Delta\lambda/\Delta T$	11.21 pm/°C
α_{FBG}	$0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
λ_{FBG}	1536.99 nm

Substituindo o valor da sensibilidade da FBG à temperatura dado pelo gráfico (Fig. 5.5) e os valores numéricos da Tabela IV na Eq. (5.7), chegamos ao valor coeficiente termo-óptico (η) da FBG:

$$\eta = 6.74 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \quad (5.8)$$

5.2.3 Determinação do coeficiente de dilatação térmica da cerâmica PZT-5H

O próximo passo é conhecer o coeficiente de dilatação térmica da cerâmica tipo PZT-5H usada nesta tese. Conforme mencionado nos trabalhos de Sabat *et al.*, (2007) e Sherrit *et al.*, (1999), as cerâmicas apresentam histerese térmica durante diferentes ciclos de aquecimento. De acordo com NIEWCZAS *et al.*, (2006), embora sejam limitadas as referências abordando o comportamento térmico de uma cerâmica PZT, alguns estudos demonstram um aumento de 10% na constante de carga piezoelétrica (d_{33}), definida anteriormente na seção 4.1, durante o primeiro ciclo de aquecimento, sendo este efeito reduzido nos ciclos subsequentes.

Alguns fabricantes informam que dependendo dos ciclos de aquecimento aplicados às cerâmicas, estas podem ter diferentes valores de coeficientes de dilatação térmica em função do seu comportamento anisotrópico, como é o caso das cerâmicas PZT4D e PZT5A do fabricante Morgan (Inglaterra).

A folha de dados da cerâmica PSI-5H4E (Piezo Systems, USA) mostra um coeficiente de expansão térmica da cerâmica de $\approx 3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Em Lewis *et al.*, 2004, os autores citam que uma típica cerâmica PZT-5H tem o coeficiente de dilatação térmica de $4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Assim concluímos que a determinação deste parâmetro é importante já que os valores dos coeficientes de dilatação térmica da cerâmica variam entre os fabricantes.

Na primeira etapa do experimento, uma FBG foi calibrada usando o mesmo setup experimental da Figura 5.4. A curva da sensibilidade experimental da FBG na Figura 5.6 mostra o resultado da calibração da FBG. O resultado do gráfico mostra a sensibilidade térmica experimental da FBG de $12.88 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$.

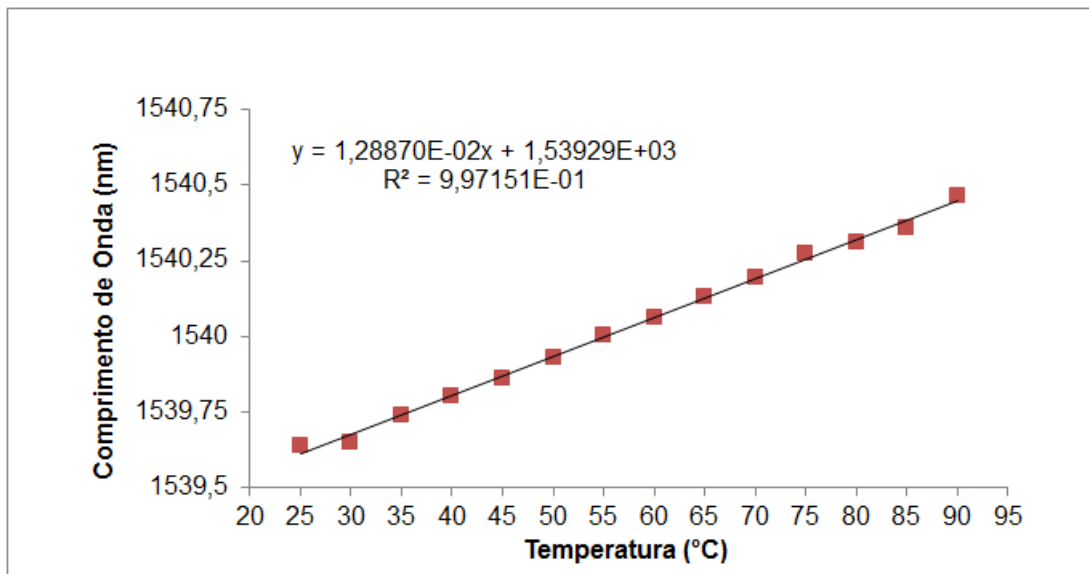


Figura 5.6: Sensibilidade da FBG à temperatura.

Na segunda etapa do experimento, foi construído um arranjo com a cerâmica e duas peças em Invar, coladas junto às faces opostas do PZT, para segurar a FBG. A escolha pelo Invar recaiu sobre o seu baixo coeficiente de dilatação térmica, aproximadamente $1.18 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e da sua proximidade com o valor do coeficiente de dilatação térmica da sílica ($\approx 0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), permitindo que na determinação do coeficiente de dilatação térmica do PZT-5H, os materiais envolvidos na construção do arranjo não interferissem nos resultados das medidas.

O Invar-36 (FeNi36) (National Electronic Alloys Inc, USA) é uma liga metálica composta de Níquel, Cromo, Magnésio, Carbono, Fósforo, Cobalto, Enxofre e Silício. A invariabilidade do material à temperatura e seu baixo coeficiente de expansão térmica designou o nome invariável ao material. O material também é usado na fabricação de instrumentos de precisão como dispositivos óptico-eletrônicos tornando-se muito usado na área militar, na construção de aeronaves, em estruturas espaciais, indústrias de telecomunicações, e para a indústria de painéis solares. O material é encontrado disponível para confecção em barras, chapas, bobinas e placas.

Na segunda etapa do experimento, a FBG calibrada foi inserida na cavidade interna do anel PZT e pré-tensionada antes de ser colada. Um pré-tensionamento da FBG antes de colar evita que durante o aumento na temperatura a fibra afrouxe ao invés de expandir. Em virtude do tamanho reduzido das redes fabricadas no Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) com ≈ 5 mm, foi possível transpassar e colar a FBG com a resina fotopolimerizável, internamente na cavidade sem danificá-la, já que cada cerâmica possui 7 mm e o Invar 6.09 mm de espessura.

O objetivo de esticar a FBG é evitar que ela sofra alguma deformação ou curvatura quando o sensor é submetido às variações de temperatura, entretanto, a fim de evitar danificar a FBG, a fibra não deve ser esticada mais que 3,5 nm. Entretanto, este valor máximo depende do tipo de fibra que se está utilizando. Valores maiores são permitidos quando se toma o cuidado de não danificar a fibra durante a extração do revestimento primário (buffer). Dependendo do método de extração do buffer, o uso de alicates podem provocar trincas na fibra, deixando-a mais frágil. Essas microfissuras na fibra podem provocar o rompimento da FBG no momento da sua deformação.

A Figura 5.7 ilustra o arranjo “PZT+Invar+FBG” construído. Embora a FBG possua um comprimento de 5 mm, a distância entre os pontos de cola na FBG corresponde ao comprimento da cerâmica PZT-5H, isto é, 7 mm.

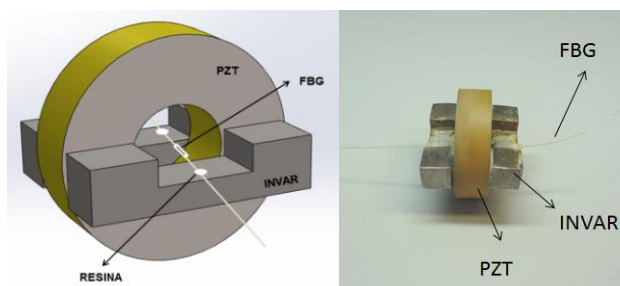


Figura 5.7: Esquemático e fotografia do arranjo “PZT+INVAR+FBG”.

Em seguida, o arranjo foi submetido a uma variação de temperatura entre 30°C e 95°C. A Figura 5.8 apresenta o resultado da variação da FBG antes de ser colada no arranjo e após ter sido colada. É possível observar pelo gráfico a variação no λ_B de 0.00087 entre o resultado experimental da FBG livre e da FBG colada no arranjo. Este pequeno valor pode ser explicado em função dos valores próximos entre os coeficientes de dilatação térmica da fibra e do invar.

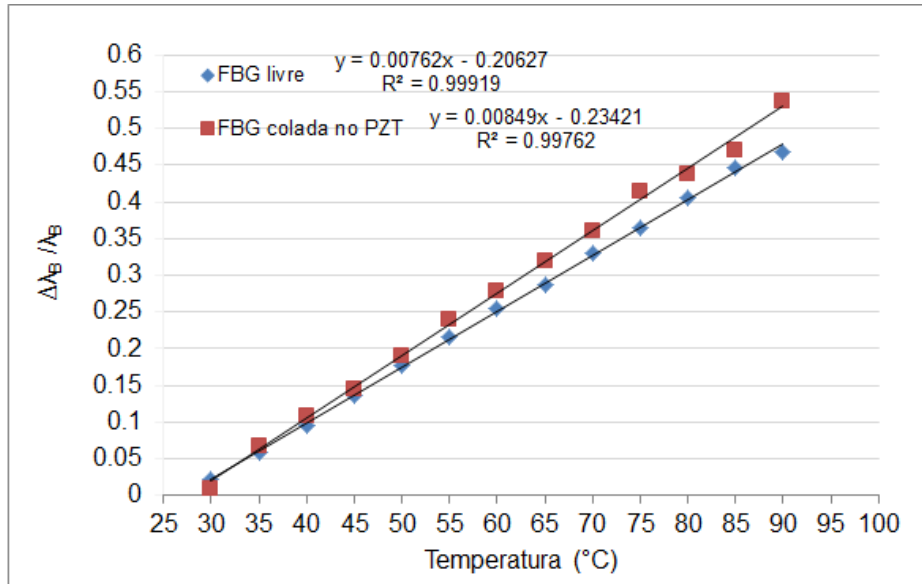


Figura 5.8: Variação no λ_B da FBG em função da temperatura antes e depois de ser colada no arranjo PZT+Invar.

Na construção do arranjo, a FBG foi colada em cada extremidade da borda interior do Invar, fazendo com que o comprimento da FBG ficasse do mesmo tamanho da cerâmica PZT-5H. Com isso, conclui-se que as duas peças de invar não entram no cálculo do strain sofrido pela FBG sendo utilizada apenas para servir como suporte para segurar a FBG.

Assim, se a temperatura da FBG colada no arranjo e de comprimento L_{FBG} for elevada de uma quantidade ΔT , verifica-se que o seu comprimento aumenta de uma quantidade equivalente a:

$$\Delta L_{FBG} = [(L_{PZT}\alpha_{PZT}) - (L_{FBG}\alpha_{FBG})] \Delta T \quad (5.9)$$

Considerando $L_{PZT} = L_{FBG}$, podemos reescrever a Eq. (5.9):

$$\Delta L_{FBG} = L_{FBG} (\alpha_{PZT} - \alpha_{FBG}) \Delta T \quad (5.10)$$

Substituindo a Eq. (5.10) na Eq. (2.4), chegamos a Eq. (5.11) que representa ao strain sofrido pela FBG:

$$\epsilon_{FBG} = (\alpha_{PZT} - \alpha_{FBG}) \Delta T \quad (5.11)$$

A Eq. (5.11) é substituída na Eq. (2.2), para obtermos a Eq. (5.12):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = (1-\rho_e)[(\alpha_{PZT}-\alpha_{FBG})\Delta T + (\alpha+\eta)\Delta T] \quad (5.12)$$

Substituindo na Eq. (5.12) o valor da sensibilidade experimental da FBG calibrada (11.58 pm/°C), dado pelo gráfico da Figura 5.3, os coeficientes de dilatação do invar e da FBG e as constantes da FBG (ρ_e e η) determinadas nas seções anteriores, podemos calcular o coeficiente de dilatação térmica da cerâmica PZT5H:

$$\alpha_{PZT} = 1.99 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (5.13)$$

TABELA V. PARÂMETROS DO ARRANJO “FBG+PZT+INVAR”

Material	Comprimento da Peça (L)	Coefficiente de Dilatação Térmica (α)
INVAR	6.09 mm	$1.18 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
FBG	7 mm <small>(distância entre os pontos de cola)</small>	$0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
PZT-5H	7 mm	$1.99 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Com o resultado da Eq. (5.13) temos agora todos os parâmetros necessários para calcularmos a sensibilidade térmica teórica do conjunto sensor e projetarmos um sistema de compensação de temperatura usando a mecânica da construção desenvolvida.

5.3 Sensibilidade térmica teórica e experimental do sensor FBG-PZT

A Tabela VI mostra as dimensões e os coeficientes de dilatação térmica dos materiais envolvidos na construção mecânica do sensor, incluindo o coeficiente de dilatação da cerâmica PZT anteriormente calculado. Na configuração inicial, os parafusos (L_{P1} e L_{P2}) foram feitos em latão, apenas para acomodar a FBG na estrutura do sensor e validar os resultados da construção mecânica, todavia, sem levar em conta a aplicação da proposta de compensação de temperatura. Retornando à seção 5.1 e substituindo os dados da Tabela VI na Eq. (5.3) calcula-se a sensibilidade térmica teórica para o sensor FBG-PZT.

TABELA VI. COMPRIMENTO E COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA DOS MATERIAIS ENVOLVIDOS NA CONSTRUÇÃO DO SENSOR FBG-PZT

Material	Comprimento da Peça (L)	Coefficiente de Dilatação Térmica (α)
Base em alumínio	20.03 mm (lado direito)	$23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
	20.17 mm (lado esquerdo)	
Parafuso de Latão	50.11 mm (lado direito)	$19 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
	51.43 mm (lado esquerdo)	
FBG	13 mm	$0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Eletrodos de Latão	1.1 mm	$19 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
PZT	70.17 mm	$1.99 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Substituindo esses parâmetros e considerando o $\lambda_B = 1542.05 \text{ nm}$ @ 25°C , obtemos na Eq. (5.14) a sensibilidade térmica teórica do sensor FBG-PZT.

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = -63.79 \text{ pm}/^{\circ}\text{C} \quad (5.14)$$

O resultado negativo da Eq. (5.14) indica que os parafusos de latão dilataram mais do que o conjunto “PZT+Eletrodos” fazendo a FBG afrouxar ao invés de esticar. A ideia na proposta de compensação de temperatura, usando o projeto mecânico do sensor, é fazer com que os parafusos compensadores cresçam proporcionalmente à dilatação da FBG, compensando assim as variações no λ_B da FBG.

O próximo passo é avaliar a sensibilidade térmica experimental do sensor. A Figura 5.9 mostra o sensor submerso em óleo isolante e submetido às variações de temperatura. Para determinar a sensibilidade térmica do sistema usamos o setup experimental apresentado na Figura 5.10. O sensor foi mergulhado no banho térmico modelo Q214S2 (Quimis, Brasil), contendo óleo isolante e foi submetido às variações de temperatura. Um termopar Tipo K foi inserido dentro da cavidade interna do sensor FBG-PZT passando pelo interior do stack e colocado o mais próximo possível da FBG para registrar as leituras precisas do λ_B em função das variações na temperatura. Os desvios no λ_B foram registrados usando o interrogador óptico comercial da *Micron Optics* SM125 (Micron Optics, USA) e as variações na temperatura foram monitoradas usando um termômetro digital de 04 canais modelo SDL200 (EXTECH, Brasil).

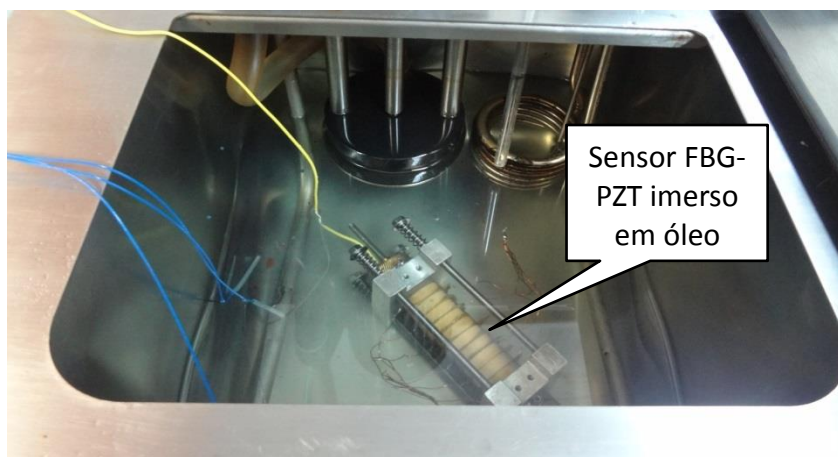


Figura 5.9: Sensor imerso em óleo isolante dentro do banho térmico da *Quimis*.

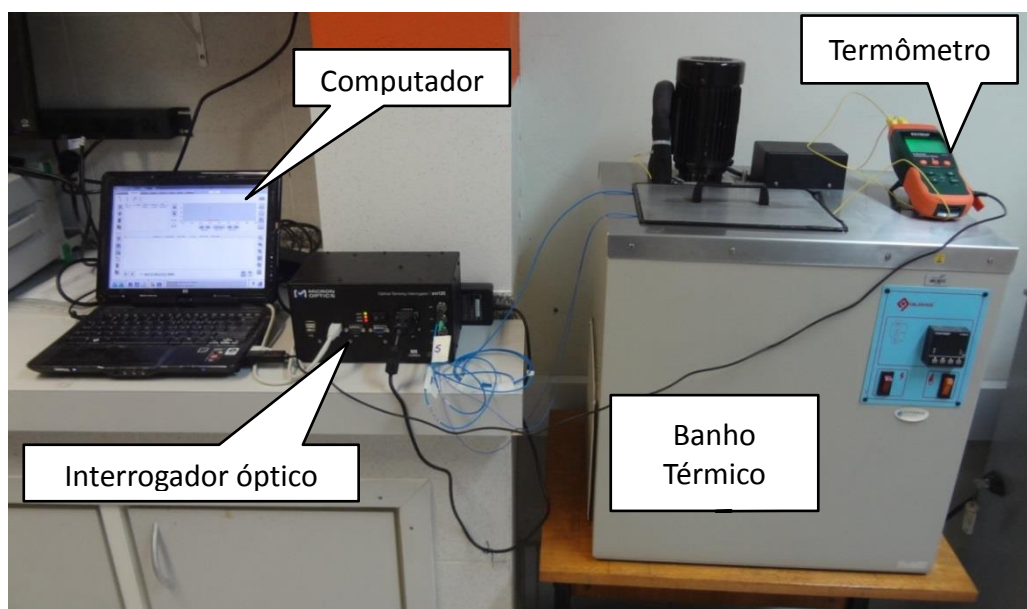


Figura 5.10: Montagem experimental para a determinação da sensibilidade térmica do sensor FBG-PZT.

A curva experimental da sensibilidade térmica do sensor é mostrada no gráfico da Figura 5.11. Como é possível observar pelo resultado do ajuste linear da curva, a sensibilidade experimental do sensor FBG-PZT foi de $-27.89 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.

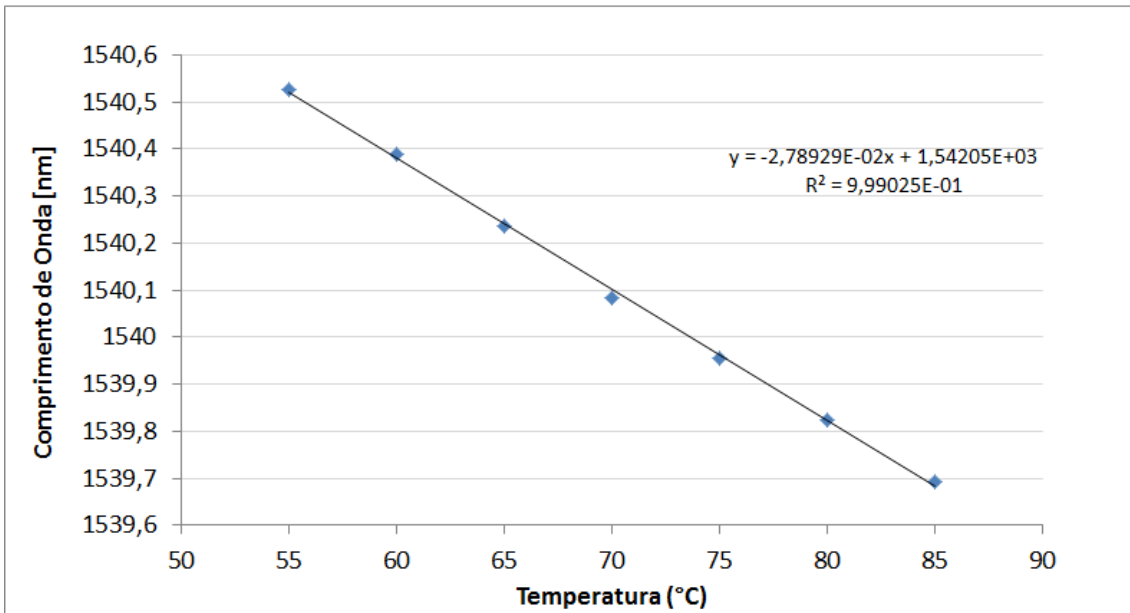


Figura 5.11: Sensibilidade térmica experimental do sensor FBG-PZT sem compensação térmica.

Note que o λ_B decresce à medida que a temperatura aumenta. Conforme discutido na seção 5.1, isso se deve à dilatação do parafuso, ou seja, os parafusos de latão (L_{P1} e L_{P2}) cresceram mais do que todo o conjunto (alumínio+PZT+latão), diminuindo o comprimento da FBG (L_{FBG}).

Na operação do sensor FBG-PZT submetido à tensão, devido ao aquecimento das cerâmicas, o ambiente de medidas estará sujeito a variações de temperatura, sendo necessário compensar o deslocamento no λ_B devido às variações térmicas.

A concordância entre os resultados teórico e experimental confirmam a possibilidade de implementarmos uma proposta mecânica capaz de compensar termicamente o sensor FBG-PZT. Considerando a estrutura mecânica do sensor, podemos mudar o material usado nos parafusos, fazendo a Eq. (5.1) igual a zero, e desta forma, construímos um sensor FBG-PZT insensível à temperatura.

Em uma simulação, a Figura 5.12 mostra o gráfico da sensibilidade teórica do λ_B em função da temperatura, substituindo os parafusos de latão por outros materiais, entretanto sem alterar as suas dimensões. O gráfico foi gerado, substituindo na Eq. (5.3) materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica.

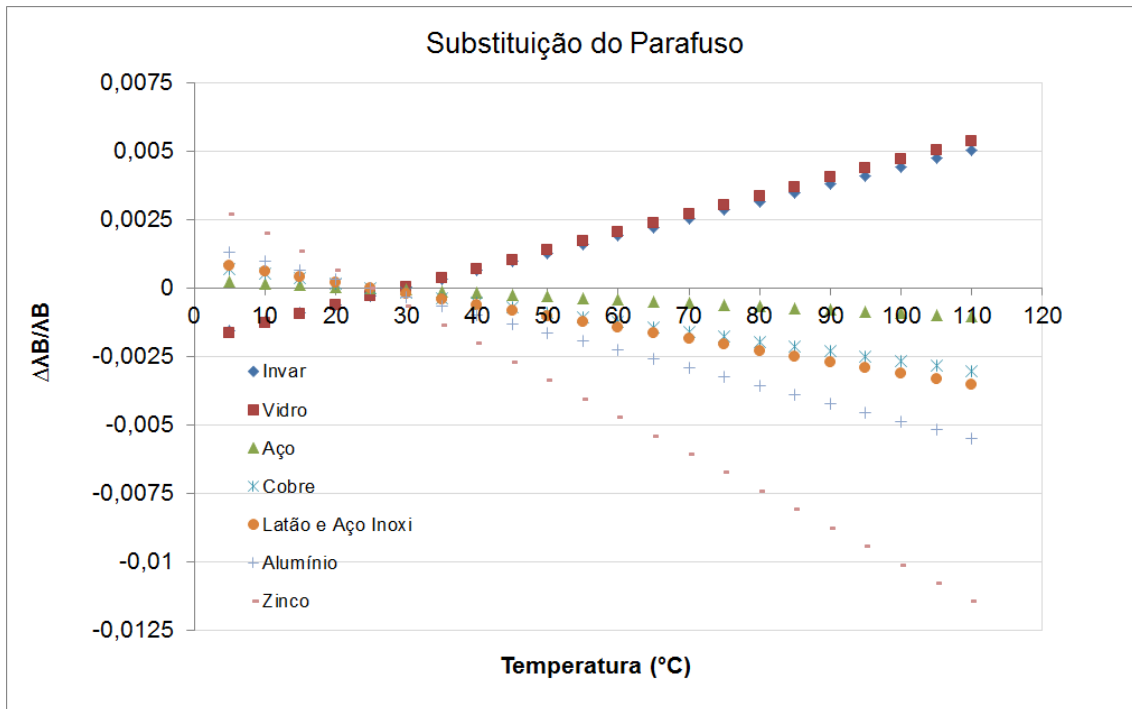


Figura 5.12: Variação do λ_B em função da temperatura substituindo o parafuso em latão por parafusos feitos de materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica.

5.4 Análise teórica da proposta de compensação térmica do sensor FBG-PZT

Para garantir a variação nula no λ_B é necessário fazer uma combinação entre diferentes materiais e garantir que seja possível a usinagem do parafuso no material escolhido. Este método de compensação passiva do sensor FBG-PZT, sugere uma compensação mecânica do arranjo usando parafusos feitos com materiais de diferentes coeficientes de dilatação térmica, que combinados e variando seus comprimentos, garantem um deslocamento nulo no λ_B da FBG. Os parâmetros dos materiais envolvidos na construção do sensor estão relacionados na Tabela VII.

TABELA VII. PARÂMETROS DOS MATERIAIS

L_{PZT}	70.17 mm
$L_{LATÃO}$	1.1×10^{-3} mm
$L_{PZT} + L_{ELETRODOS\ DE\ LATÃO}$	71.27×10^{-3} mm
$L_{GAP} = L_{FBG}$	10×10^{-3} mm
$L_{PAR1} + L_{PAR2} = L_{STACK} - L_{GAP} + (L_{BASE1} + L_{BASE2})$	101.41×10^{-3} mm
$L_{PZT} \alpha_{PZT}$	1.39×10^{-7}
$L_{LATÃO} \alpha_{LATÃO}$	3.13×10^{-8}
$L_{BASE1} \alpha_{BASE1} + L_{BASE2} \alpha_{BASE2}$ = $[(17.50 \times 10^{-6}) \cdot (23 \times 10^{-6})]$ + $[(17.50 \times 10^{-6}) \cdot (23 \times 10^{-6})]$	8.05×10^{-7}
$\alpha + \eta = (0.55 \times 10^{-6} + (6.74 \times 10^{-6}))$	7.29×10^{-6}
$L_{BASE1} + L_{BASE2}$	40.14 mm
$1 - \rho_e$	0.75
λ_B	1537.61 nm

É possível substituir os dados da Tabela VII a fim de encontrarmos o valor do termo ($L_{PAR} \alpha_{PAR}$) que representa o comprimento e o coeficiente de dilatação do material a ser empregado na construção dos parafusos, a fim de compensar mecanicamente o sensor. Considerando a condição de sensibilidade térmica do sensor igual à zero e substituindo os valores da Tabela VII na Eq. (5.3) temos:

$$L_{PAR} \alpha_{PAR} = 1.07 \times 10^{-6} \quad (5.15)$$

O termo ($L_{PAR} \alpha_{PAR}$) corresponde à soma dos parafusos ($L_{P1} \alpha_{P1}$ e $L_{P2} \alpha_{P2}$), então podemos escrever a Eq. (5.15) como sendo:

$$L_{PAR} \alpha_{PAR} = (L_{PAR1} \alpha_{PAR1}) + (L_{PAR2} \alpha_{PAR2}) \quad (5.16)$$

De acordo com a estrutura do sensor, mostrada na Figura 5.1, temos que:

$$L_{PAR1} + L_{PAR2} = L_{PZT} + L_{ELETRODOS\ DE\ LATÃO} - L_{GAP} + (L_{BASE1} + L_{BASE2}) \quad (5.17)$$

Substituindo os dados da Tabela VII na Eq. (5.17) e a Eq. (5.15) em (5.16) e usando forma-se um sistema de equações:

$$\begin{cases} L_{PAR} \alpha_{PAR} = (L_{PAR1} \alpha_{PAR1}) + (L_{PAR2} \alpha_{PAR2}) \\ L_{PAR1} + L_{PAR2} = 101.41 \times 10^{-3} \end{cases} \quad (5.18)$$

Considerando os dados da Tabela VII chegamos à Eq. (5.19):

$$L_{PAR2} (\alpha_{PAR1} - \alpha_{PAR2}) = (101.41 \times 10^{-3} \times \alpha_{PAR1}) - 1.07 \times 10^{-6} \quad (5.19)$$

Colocando em evidência o termo que corresponde ao comprimento de um dos parafusos, pode-se determinar a partir da escolha de materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica e passíveis de usinagem, o comprimento dos parafusos L_{PAR2} e L_{PAR1} a fim garantir a dispersão nula no λ_B do sensor.

$$L_{PAR2} = \frac{(101.41 \cdot 10^{-3} \alpha_{PAR1}) - 1.07 \cdot 10^{-6}}{(\alpha_{PAR1} - \alpha_{PAR2})} \quad (5.20)$$

A Tabela VIII é construída substituindo diferentes coeficientes de dilatação térmica na Eq. (5.20) para encontrar uma combinação de parafusos (L_{PAR2} e L_{PAR1}) que resulte no deslocamento nulo do λ_B , isto é, na compensação de temperatura no sensor FBG-PZT.

TABELA VIII. CÁLCULO DO COMPRIMENTO DOS PARAFUSOS

Cálculo do comprimento dos parafusos (L_{PAR1} e L_{PAR2})			
$\alpha_{PAR1}(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	$\alpha_{PAR2}(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	$L_{PAR1}(10^{-3})\text{m}$	$L_{PAR2}(10^{-3})\text{m}$
1.2x10 ⁻⁶ (invar)	35x10 ⁻⁶ (zinco)	73.3x10 ⁻³	28.1x10 ⁻³
	19x10 ⁻⁶ (latão)	48.1x10 ⁻³	53.3x10 ⁻³
	14x10 ⁻⁶ (aço)	27.3x10 ⁻³	74.13x10 ⁻³
	18x10 ⁻⁶ (cobre)	45x10 ⁻³	56.4x10 ⁻³
	24x10 ⁻⁶ (alumínio)	57.9x10 ⁻³	43.5x10 ⁻³

Na Tabela VIII, possíveis combinações de parafusos foram feitas, usando o invar e outros materiais como: zinco, latão, aço, cobre e alumínio. Importante destacar, que nas combinações temos de um lado, o parafuso compensador de invar com baixo coeficiente de dilatação térmica ($\approx 1.2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) e os parafusos compensadores em materiais com alto coeficiente de dilatação térmica. Em relação ao zinco, embora encontrada uma combinação em que é possível ajustar o comprimento do parafuso na estrutura do sensor e anular a dispersão no λ_B , o material não permite a usinagem do parafuso, por ser dúctil dificultando a usinagem de um parafuso rosqueado no material.

5.5 Resultado experimental do sensor FBG-PZT com compensação de temperatura

De posse da tabela, foram usinados parafusos em latão, aço, cobre e alumínio e o parafuso de invar, conforme mostra a Figura 5.12. Os parafusos foram agora, usinados com passo de 0.5 mm para permitir uma maior precisão na sintonia do λ_B . Os

parafusos foram construídos no mesmo tamanho ≈ 105 mm, exceto o de invar, pois a barra adquirida pelo fabricante, só permitiu a usinagem de um parafuso de até $\approx 74,88$ mm. No entanto isso não comprometeu a proposta, já que de acordo com os resultados das medidas dos comprimentos dos parafusos de invar, mostrados na Tabela VIII, são necessários ajustes no comprimento do parafuso abaixo desta medida.

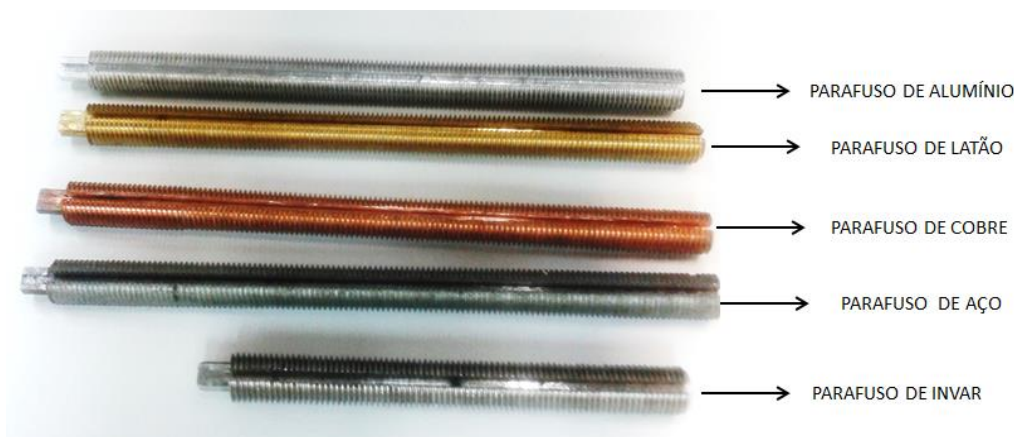


Figura 5.12: Parafusos usinados em alumínio, latão, cobre, aço e invar.

O ensaio com o sensor submetido às variações térmicas foi feito usando uma combinação do parafuso de aço e latão ($L_{AÇO}$ e $L_{LATÃO}$). A FBG foi colada nos parafusos usando o procedimento de fotopolimerização da resina apresentado no Capítulo 4. O comprimento dos parafusos de compensação $L_{AÇO}$ e $L_{LATÃO}$ foram então ajustados manualmente e diretamente no experimento, de acordo com os valores calculados usando a Tabela VIII.

Embora as outras combinações sejam possíveis devido a fácil usinagem dos parafusos, o uso de uma combinação feita de parafusos mais pesados pode causar o desalinhamento da FBG provocando a perda na potência óptica da fibra. À medida que a temperatura aumenta o peso da combinação de parafusos podem resultar na curvatura da FBG e a perda da potência óptica do sensor, provocando erros no sistema de leitura do interrogador óptico. Sendo assim, optou-se por usar uma combinação com parafusos mais leves. A Tabela IX mostra o peso do sensor após a construção final usando as possíveis combinações de parafusos.

TABELA IX. PESO DO SENSOR MONTADO COMBINANDO POSSÍVEIS DE PARAFUSOS.

Material dos Parafusos	Peso dos parafusos (g)	Peso total do sensor FBG-PZT (g)
Invar+Alumínio	12.52	538.03
Invar+Aço	19.70	545.21
Invar+Latão	20.99	546.50
Invar+Cobre	21.59	547.10

Sendo assim, uma combinação foi montada com o parafuso de alumínio e o parafuso de invar (4,31g e 8,21g) respectivamente por corresponder à combinação com menor peso dos parafusos. O comprimento dos parafusos de compensação, L_{INVAR} e $L_{\text{ALUMÍNIO}}$, foram ajustados direto no experimento, de acordo com os comprimentos calculados na Tabela VIII. Esta combinação possibilitou os ensaios, sem desalinhar a FBG e mostrou resultados satisfatórios no ensaio experimental de compensação de temperatura, como veremos a seguir.

O ajuste do parafuso foi feito pela parte externa, descontando do comprimento total do parafuso a parte interna calculada, conforme apresentado na Tabela X. Este ajuste através da “sobra”, ou seja, da parte do parafuso que fica para fora, facilita o ajuste dos parafusos, já que em virtude do diâmetro interno da cerâmica ser reduzido, fica difícil introduzir o paquímetro dentro do sensor e medir o comprimento dos parafusos sem danificar a FBG. É importante destacar que esse ajuste no comprimento dos parafusos é feito com a FBG já colada na estrutura.

Os ensaios experimentais foram realizados ajustando os parafusos (invar e alumínio) posicionando os parafusos (parte interna e externa) no comprimento que garanta que a combinação funcione como compensador do sensor, conforme mostra o gráfico da Figura 5.13. O resultado com os parafusos ajustados em $L_{\text{INVAR}}=43.5$ mm e $L_{\text{ALUMÍNIO}}=57.9$ mm indicam que o comprimento de onda de Bragg variou muito pouco (0.01 nm) no range de temperatura que corresponde ao funcionamento do sensor FBG-PZT em operação, isto é, na faixa entre 25°C e 55°C, o que reduz o desvio térmico da FBG e comprova a eficácia do método de compensação mecânica proposto. Os erros nas medidas nesta proposta de compensação podem ser atribuídos aos diferentes valores do coeficiente de dilatação térmica das partes em alumínio empregadas na construção das bases.

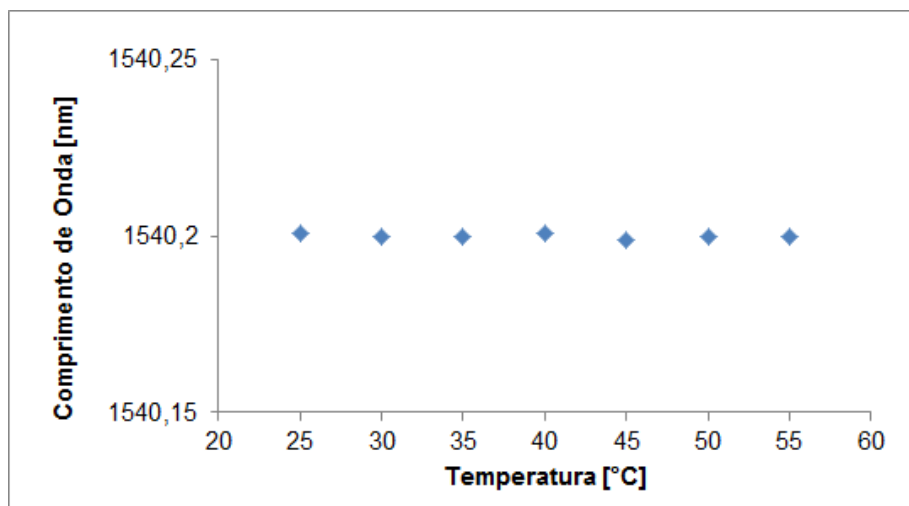


Figura 5.13: Sensibilidade térmica do sensor FBG-PZT com compensação de temperatura usando os parafusos de Invar+Alumínio.

Com os parafusos posicionados o sensor é submetido à alta tensão onde uma tensão de 2 kV é aplicada aos terminais do sensor. Conforme serão apresentados no Capítulo 7, os resultados durante a operação do sensor em alta tensão mostraram que embora as cerâmicas tenham aquecido, não houve deslocamento no λ_B do sensor FBG-PZT devido às variações térmicas, somente devido a aplicação da tensão nos terminais do PZT.

O objetivo desta proposta foi desenvolver um sensor FBG-PZT compensado mecanicamente usando materiais de fácil e rápida usinagem, além da facilidade de aquisição no mercado. Esta proposta de compensação térmica sugere um compensador passivo de dispersão do λ_B na própria estrutura do sensor. Combinando na construção, parafusos de diferentes coeficientes de dilatação térmica, promovemos uma expansão positiva ou negativa do conjunto sensor, de acordo com os cálculos teóricos realizados.

A proposta de compensação sugerida torna-se vantajosa e permite a aplicação em projetos práticos, pois os materiais escolhidos para a usinagem dos parafusos são de baixo custo no mercado, aliado a isto, o procedimento desenvolvido para colar a FBG no parafuso assegura a confiabilidade ao projeto. Desta maneira, pela primeira vez é apresentada uma proposta de compensação térmica mecânica e passiva de um sensor eletro-óptico para medidas de tensão, usando a tecnologia FBG em conjunto com as características de uma cerâmica piezoelétrica.

No capítulo seguinte, sugerimos uma proposta de um compensador dinâmico usando um filtro FBG sintonizável, que funciona como um compensador térmico sintonizável do λ_B do sensor FBG-PZT. Esta proposta pode ser usada em conjunto

com a proposta atual de compensação mecânica, para corrigir pequenos desvios no cálculo do compensador mecânico, como também pode ser usado para sintonizar uma FBG filtro no processo de demodulação usando redes gêmeas.

Capítulo 6

6 Proposta de compensação térmica por meio da sintonia de uma FBG filtro

Enquanto no capítulo anterior foi apresentada a proposta de compensação passiva do sensor FBG-PZT, neste capítulo sugerimos e discutimos a proposta de um compensador dinâmico usando um filtro FBG sintonizável, controlado por temperatura, para a correção e sintonia nos desvios do λ_B do sensor. A motivação para o desenvolvimento de uma proposta dinâmica resulta da necessidade de compensar pequenos desvios no cálculo da proposta mecânica. O filtro denominado FBG-F utiliza uma FBG que funciona como um filtro espectral para a demodulação de uma FBG sensora (FBG-S). Considerando este objetivo, o capítulo aborda a técnica de demodulação conhecida como redes gêmeas, além dos aspectos do projeto de construção do arranjo mecânico, do filtro FBG-F, do circuito de potência e do controlador implementado. Os resultados da operação e sintonia do filtro FBG-F são apresentados no final deste capítulo.

Uma compensação total do sistema sensor pode ser realizada usando os dois sistemas desenvolvidos: o compensador mecânico apresentado no capítulo anterior junto com o FBG-F sintonizável, que promove pequenos ajustes na sintonia do λ_B do sensor FBG-PZT.

6.1 Filtros Ópticos Sintonizáveis

Nas últimas décadas, devido às vantagens da tecnologia óptica, os sensores FBG têm sido empregados no desenvolvimento de dispositivos de sensoriamento, sistemas de telecomunicações e filtros ópticos sintonizáveis. O emprego do filtro sintonizável como técnica de interrogação das redes de Bragg é um dos métodos mais usados e vêm sendo, há muito tempo disseminada na literatura.

Essa técnica, baseada em um filtro de banda passante sintonizável, consiste de duas superfícies refletoras parcialmente separadas. Quando a luz incide na cavidade, devido a múltiplas reflexões e devido à interferência da luz refletida, a transmitância da luz através da cavidade tem uma característica periódica com a variação da frequência óptica ou o espaçamento entre as duas superfícies refletoras.

Várias implementações usando filtros sintonizáveis têm sido propostas na demodulação de uma FBG, entre estas, podemos citar o uso do filtro sintonizável de *Fabry Perot* (FFP) (KERSEY *et al.*, 1993 e TIAN e CHENG, 2008). As variações no λ_B são detectadas através da potência óptica de saída, gerada a partir da interseção entre os espectros do filtro e da FBG. O filtro interferométrico de FFP usa um processo de interferência de múltiplos feixes para obter a seletividade no comprimento de onda. A luz passa através de uma cavidade que consiste de dois espelhos reflexivos colocados em paralelo e separados por uma pequena distância (YIN *et al.*, 2008)

A Figura 6.1 mostra a estrutura básica do FFP. A sintonia do filtro FFP pode ser feita por meio de um cristal piezoelétrico. Quando a tensão sobre o cristal piezoelétrico é alterada, a distância entre os espelhos é proporcionalmente alterada. A sintonia do filtro e a seleção do comprimento de onda desejado são feitos através do ajuste dos espelhos e variando a cavidade interna do cristal.

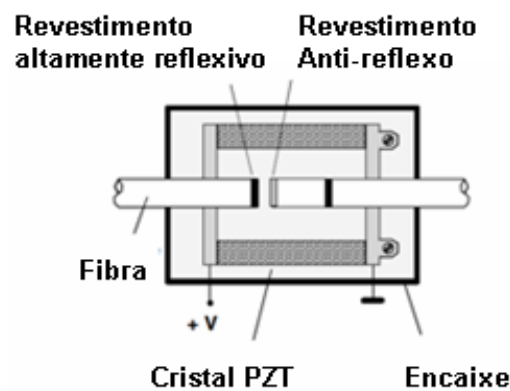


Figura 6.1: Estrutura básica de um filtro sintonizável de *Fabry-Perot*. (adaptado de KOONEN, 2006).

Como os interrogadores ópticos são lentos para respostas em frequência de 60 Hz, foi usado o esquema de interrogação mostrado na Figura 6.2. O esquema de demodulação emprega uma fonte de banda larga (ASE) que é usada para iluminar o sensor através da porta 1 do circulador óptico 1. O espectro refletido pela FBG-S entra no circulador óptico 1 através da porta (2). O espectro refletido da FBG-S é enviado pela porta (3) e atinge o filtro FFP. Somente a parcela de intensidade luminosa que corresponde à interseção entre os dois espectros refletidos, alcança o fotodetector. A intensidade luminosa que atinge o fotodetector varia de acordo com as variações no λ_B da rede em função das variações dos parâmetros sendo medidos: tensão, deformação, corrente, temperatura, etc. Essa intensidade de luz refletida pelo filtro FFP é máxima quando seu espectro e o espectro da FBG-S coincidem.

Normalmente a largura de banda do filtro FFP é menor que a largura de banda da FBG-S, mas sua FSR (Free Spectral Range), isto é, o espaçamento entre dois picos de ressonância adjacentes, deve ser maior do que a faixa de operação da FBG-S para evitar ambiguidade (YIN *et al.*, 2008). O método de sintonia pode ser utilizado na demodulação de um único sensor ou de vários sensores, embora o seu uso não seja adequado em aplicações práticas devido ao preço elevado deste componente.

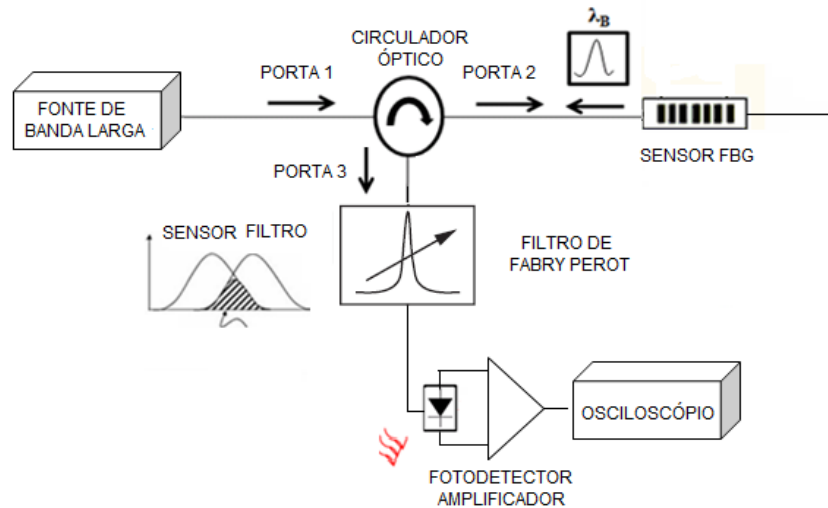


Figura 6.2: Diagrama esquemático da demodulação de uma única FBG usando o filtro sintonizável de *Fabry-Perot*.

Com o inconveniente do custo elevado dos filtros ópticos, a técnica de interferometria usando o FFP é substituída por uma técnica chamada filtro-fixo ou demodulação por redes gêmeas. Assim utilizamos também neste trabalho a técnica de demodulação por redes gêmeas, que também aparecem nos trabalhos de ZHAN *et al.*, (2010), HU *et al.*, (2009), RIBEIRO *et al.*, (2013).

6.2 Implementação usando Redes Gêmeas

Para minimizar o custo com a implementação dos filtros FFP em aplicações práticas, filtros sintonizáveis baseados em redes de Bragg têm sido empregados. A técnica usando rede gêmea ainda apresenta custo razoável quando comparada à implementação usando o FFP. Neste esquema, conhecido por técnica de demodulação por redes gêmeas, uma segunda FBG, chamada de FBG filtro (FBG-F), é usada no lugar de um filtro FFP convencional. A FBG-F funciona como um filtro espectral para a demodulação de uma FBG sensora (FBG-S) que é a correspondência

entre o sensor e o filtro. O conceito básico na técnica de demodulação por redes gêmeas baseia-se no FBG-F filtrando a luz refletida da FBG-S, ambas com λ_B quase idênticos (YIN *et al.*, 2008). Geralmente, duas redes de Bragg com λ_B próximos são usadas em sistemas de medidas que empregam a técnica do filtro fixo. Enquanto o λ_B de uma das redes sofre as variações dos parâmetros sob medida (térmica, deformação, vibração, etc.), o outro se mantém fixo permitindo a demodulação do sensor.

O esquema de demodulação usando redes gêmeas é apresentado na Figura 6.3. A fonte ASE é usada para iluminar o sensor através da porta 1 do circulador óptico 1. O espectro refletido pela FBG-S entra no circulador óptico 1 através da porta (2). O espectro refletido da FBG-S é enviado pela porta (3) do circulador óptico 1 e é então, encaminhado para a porta (1) do circulador óptico 2. O circulador óptico 2 envia o sinal para o filtro FBG-F, através da porta (2). Somente a parcela que corresponde a interseção entre os dois espectros refletidos, atinge o fotodetector pela porta (3) do circulador óptico 2.

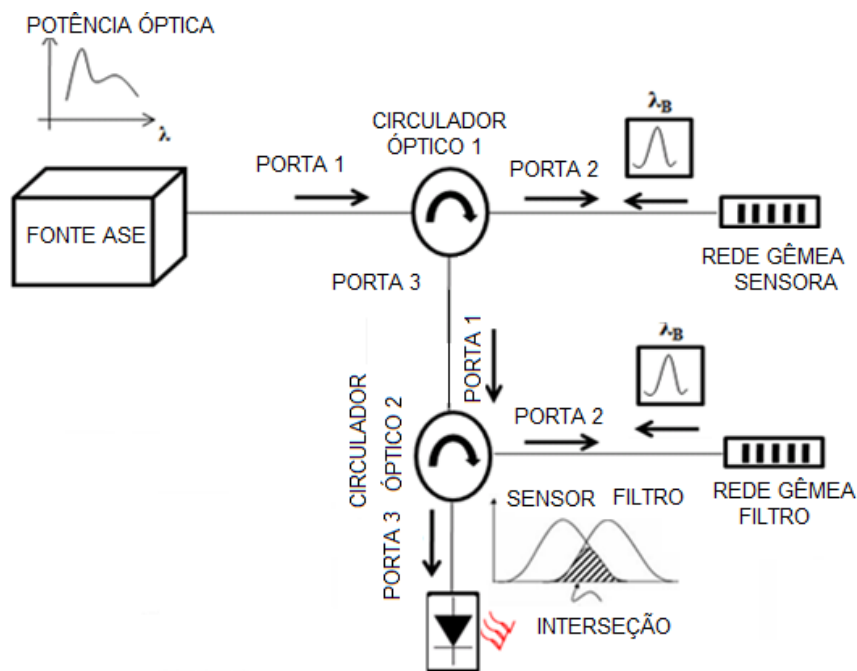


Figura 6.3: Diagrama esquemático da técnica de demodulação por redes gêmeas.

Embora o esquema de demodulação usando redes gêmeas seja simples, as redes de Bragg precisam ser fabricadas no λ_B específico, para sintonizar, ou o λ_B da FBG-S, ou da FBG-F em um ponto ótimo de demodulação, que permita a otimização no processo de demodulação. Quando a condição de correspondência entre os λ_B da

FBG-S e da FBG-F não é satisfeita, é possível criar condições para promover a sintonia λ_B entre os espectros, usando métodos adequados, por exemplo, usando a sintonia do λ_B através de um cristal piezoelétrico (YIN *et al.*, 2008) ou usando a sintonia térmica para deslocar o λ_B da FBG, conforme será discutido nesta tese.

6.3 Projeto de compensação térmica aplicando a técnica de redes gêmeas

Alguns métodos têm sido empregados usando um filtro sintonizável de FBG-F para a sintonia do λ_B através de uma deformação longitudinal na FBG. Este tipo de sintonia, impondo uma deformação na FBG, é usada em sistemas que requerem uma faixa ampla de sintonia, como nos sistemas WDM, entretanto, em aplicações envolvendo sensores, a faixa de sintonia pode ser menor. Outra possibilidade de sintonia é usar a sensibilidade térmica da FBG para sintonizar o λ_B de acordo com as variações na temperatura. Nesta tese, é proposto um método de sintonia térmica usando um filtro FBG-F. O método é desenvolvido e implementado, por meio de um sistema de controle manual de temperatura e a sintonia do λ_B da FBG-F é realizada impondo as variações na temperatura por meio de um Módulo Termo Elétrico (MTE).

Um aumento na faixa de sintonia térmica pode ser obtido, usando uma implementação de baixo custo, impondo uma deformação na FBG, através da contração e da expansão do material onde a FBG está colada, conforme discutido no Capítulo 2. Posteriormente, o sistema funcionará como um controle automático para sintonizar o λ_B do sensor FBG-PZT no ponto ótimo de operação para a demodulação do sistema. A proposta funciona como um compensador dinâmico do deslocamento no λ_B do sensor FBG-PZT devido às variações térmicas, através da sintonia do filtro FBG-F. A compensação da temperatura do sensor para corrigir os desvios no λ_B em função das variações térmicas no ambiente de medição, funciona com o sensor em operação submetido a uma tensão de $2 \text{ kV}_{\text{RMS}}$.

Um arranjo mecânico foi construído para atuar sobre a FBG-F colada sobre o TEM, usando um material com alto coeficiente de dilatação térmica, neste caso, o alumínio. O arranjo mecânico “FBG+Substrato+MTE” é aquecido/resfriado, e a variação no λ_B é influenciada pela sensibilidade simultânea ao strain e a temperatura. Um MTE alimentado por uma fonte de corrente contínua (CC) é empregado para promover as variações de temperatura necessárias para deslocar termicamente o λ_B do filtro FBG-F. Um controlador do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) é implementado em um Processador de Sinais Digitais (DSP), controlando o ciclo de

trabalho a ser aplicado ao circuito de potência. A configuração é empregada com a FBG-F acoplada ao MTE. O arranjo mecânico desenvolvido permite aumentar a sensibilidade térmica da rede e dessa forma estender a faixa de sintonia alcançável pelo filtro.

Neste capítulo, são descritos o processo de usinagem e fabricação do arranjo experimental do filtro FBG-F. Também é demonstrado o circuito de potência e o projeto do controlador desenvolvido para atuar sobre o controle de temperatura do filtro FBG-F. Nas próximas seções serão apresentados o funcionamento do sistema de controle desenvolvido e os resultados experimentais para validação do arranjo “FBG+MTE” e do sistema de controle de temperatura.

Assim, é proposto um sistema de compensação do efeito da temperatura baseado na atuação do MTE sobre o filtro FBG-F. No início, a resposta espectral de uma rede de Bragg para uma faixa de temperatura é investigada, de acordo com os níveis de tensão que devem ser aplicados à célula termoelétrica. Em seguida é descrito o sistema de controle desenvolvido para atuar sobre o controle de temperatura do filtro FBG-F.

6.3.1 As células termoelétricas

Um módulo MTE, ou Peltier, é um pequeno dispositivo de estado sólido que pode operar como uma bomba de calor ou como um gerador de energia elétrica. Quando empregado como uma bomba, o módulo utiliza o efeito Peltier para deslocamento do calor e é conhecido como refrigerador termoelétrico. Utilizado para a refrigeração de objetos sólidos ou fluidos, pode ser empregado em refrigeradores portáteis.

Bombas de calor de estado sólido são conhecidas desde o descobrimento do efeito Peltier em 1834. Quando uma corrente elétrica atravessa uma junção de dois diferentes tipos de condutor, o resultado é uma mudança de temperatura. Contudo, a aplicação prática deste conceito tornou-se viável com o desenvolvimento dos dispositivos semicondutores, os quais são bons condutores de eletricidade e atuam como isolantes térmicos.

O telureto de bismuto (uma liga quaternária de bismuto, telúrio, selênio e antimônio) é o material semicondutor empregado na fabricação dos MTEs, o composto é dopado para criar tanto um excesso (tipo-n) quanto uma deficiência (tipo-p) de elétrons.

O módulo termoelétrico (MTE) opera com base no efeito Peltier que é a

produção de um gradiente de temperatura, quando uma corrente elétrica atravessa dois condutores. A tensão aplicada aos pólos de dois materiais distintos cria um gradiente de temperatura desenvolvendo um lado quente e um lado frio no MTE. Uma típica pastilha Peltier é um dispositivo de estado sólido que contém uma série de junções tipo-p e tipo-n, integradas em módulos. As junções são conectadas eletricamente em série e termicamente em paralelo, que agirão como condutores dissimilares, conforme o desenho da Figura 6.4 (SALERNO, 2010):

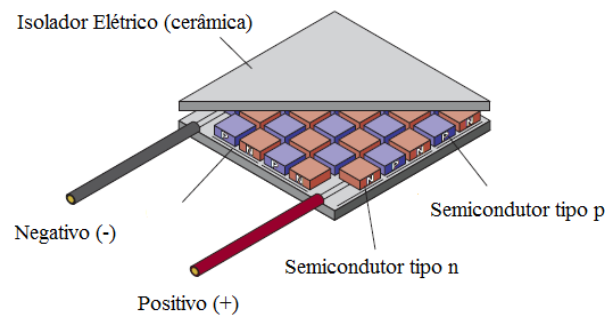


Figura 6.4: Esquema físico de uma célula peltier. (Adaptado de Salerno, 2010).

Os módulos são empacotados entre placas de cerâmicas metalizadas e, ao ser fornecida uma corrente elétrica (CC) ao MTE, causa o transporte do calor de uma face à outra do módulo. Ou seja, este processo desenvolve um lado quente e um lado frio no MTE aquecendo uma superfície enquanto a superfície oposta é resfriada. Quando a direção da corrente é invertida, as superfícies trocam o seu estado. Assim, na junção fria, a energia (calor) é absorvida pelos elétrons à medida que eles passam de um nível de baixa energia no semicondutor tipo-p para um nível de maior energia no semicondutor tipo-n.

A fonte de alimentação provê a energia necessária para a movimentação dos portadores de carga através do sistema, já na junção quente, a energia é expulsa para um dissipador de calor conforme os elétrons se movem do nível de alta energia (tipo-n) para o nível de baixa energia (tipo-p). A Figura 6.5 mostra o módulo termoelétrico utilizado na implementação do filtro FBG-F. A célula peltier usada é a HTC-30-10-08.5 (DANVIC, Brasil), com dimensões 30 mm x 30 mm x 5 mm cujos valores de tensão ($V_{máx}$) e corrente máxima ($I_{máx}$) são de 8.5 volts em 10 A, respectivamente.

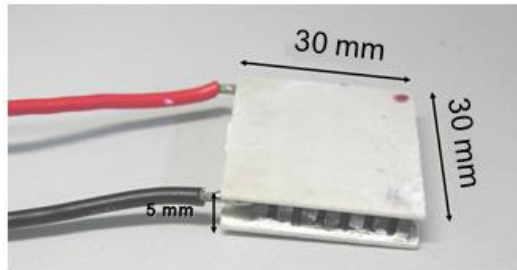


Figura 6.5: Peltier HTC-30-10-08.5 (Danvic).

As pequenas dimensões e o peso reduzido são adequados ao arranjo mecânico proposto, já que o MTE pode ser empregado em conjunto com um sistema de dissipação de calor simples além de permitir a acomodação da FBG, conforme veremos adiante.

Para que o MTE utilizado seja capaz de fornecer uma excursão de temperatura para o controle, é necessário que o módulo seja alimentado através de uma corrente ou através de uma tensão aplicada aos seus terminais. A Figura 6.8 e a Figura 6.9 mostram a caracterização do MTE usado nos experimentos e a faixa de temperatura atingida para uma determinada tensão ou corrente aplicadas. A tensão e a corrente foram fornecidas por uma fonte de alimentação DC programável PWS4205 (TEKTRONIX, USA). Pelos gráficos das Figuras 6.6 e 6.7 observa-se o comportamento não linear da curva de resposta do MTE.

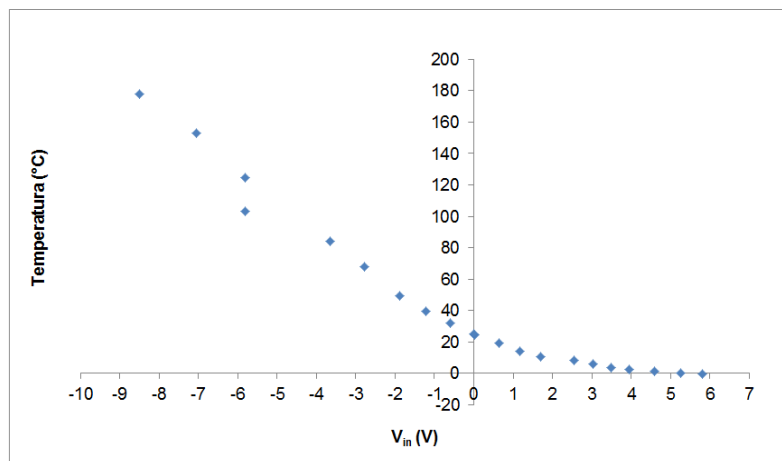


Figura 6.6: Caracterização Temperatura x Tensão do MTE para o processo de resfriamento e aquecimento.

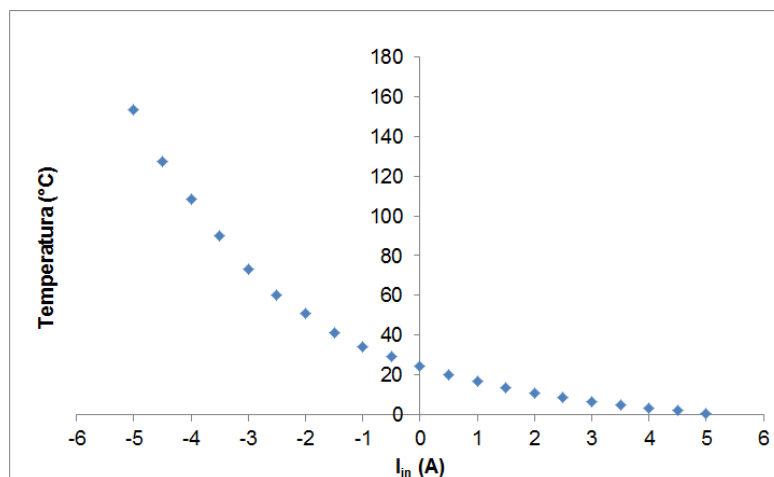


Figura 6.7: Caracterização Temperatura x Corrente do MTE para o processo de resfriamento e aquecimento.

Em aplicações que requerem o controle da temperatura do corpo ao qual o MTE está fixado, e não apenas o seu simples resfriamento, requisitos de projeto da fonte de alimentação mais elaborados são necessários, uma vez que se o sentido da corrente de alimentação é invertido, o sentido de movimentação da energia térmica também é invertido. Em outras palavras, o lado que era o “lado quente” torna-se o “lado frio” e vice-versa. Para aplicar um gradiente de temperatura na FBG, foi implementado um circuito eletrônico de potência, alimentado por uma fonte CC, para o controle do peltier.

6.3.2 Arranjo mecânico FBG+MTE+Substrato

Esta seção irá demonstrar o desenvolvimento do arranjo mecânico usado para acomodar o conjunto FBG+MTE e o sensor de temperatura LM35. Para aumentar a interação térmica entre o MTE e a FBG, foi usada uma estrutura em alumínio.

Com o objetivo de aplicar as variações de temperatura e aumentar a sensibilidade térmica da FBG, alguns materiais foram investigados para uma possível implementação. Entre os materiais selecionados, o alumínio, o cobre e o zinco foram os três que apresentam os maiores coeficientes de dilatação. Entretanto, a nossa escolha recaiu sobre o alumínio em função do seu alto coeficiente de dilatação térmica ($23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) e de outros fatores, entre eles podemos citar o fato do material ser um bom condutor térmico, a facilidade na aquisição do material no mercado e na usinagem da peça e por ser um material leve.

A FBG é transpassada através de um orifício feito na estrutura confeccionada

em alumínio, que será acomodada sobre o MTE. Conforme mostra a Figura 6.8, a estrutura possui também um orifício para a entrada do sensor de temperatura LM35, que será responsável pela realimentação de temperatura no sistema.

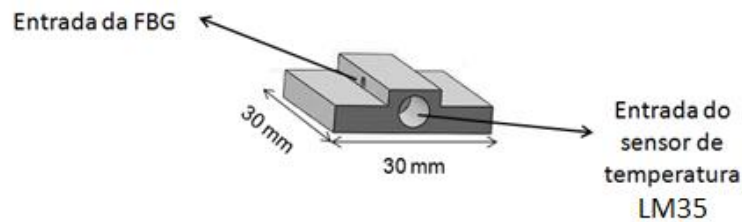


Figura 6.8: Arranjo mecânico: “MTE+FBG”.

A FBG colada sobre a estrutura de alumínio irá expandir ou contrair de acordo com as variações de temperatura impostas pelo controle e promoverão o deslocamento no λ_B permitindo a sintonia no filtro FBG-F no λ_B desejado. O sensor de temperatura LM35 responsável pela realimentação de temperatura é um circuito integrado de precisão, cuja tensão de saída é proporcional à temperatura. Na implementação do controle, o sensor LM35 mostrado na Figura 6.9, foi configurado para obter uma variação de temperatura entre +2°C e 100°C.



Figura 6.9: Sensor de temperatura LM35.

Tanto a cavidade para a entrada do sensor LM35 quanto a cavidade para a entrada da FBG foram construídas próximas uma da outra, para que ambas estivessem submetidos à mesma variação de temperatura. A Figura 6.10 mostra o arranjo “MTE+FBG” construído. O arranjo apresenta ainda duas placas, confeccionadas em alumínio para permitir a fixação do arranjo no suporte.

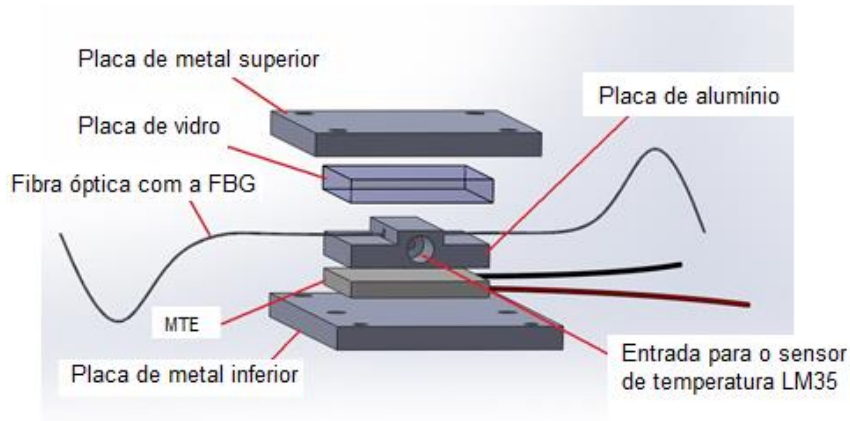


Figura 6.10: Arranjo mecânico: “MTE+FBG”.

Para isolar termicamente o conjunto “FBG+metal”, uma placa de vidro é utilizada e um dissipador é acoplado à placa de alumínio inferior (na figura), com o intuito de facilitar a dissipação de calor no momento em que o MTE estiver resfriando, conforme mostra a Figura 6.11:

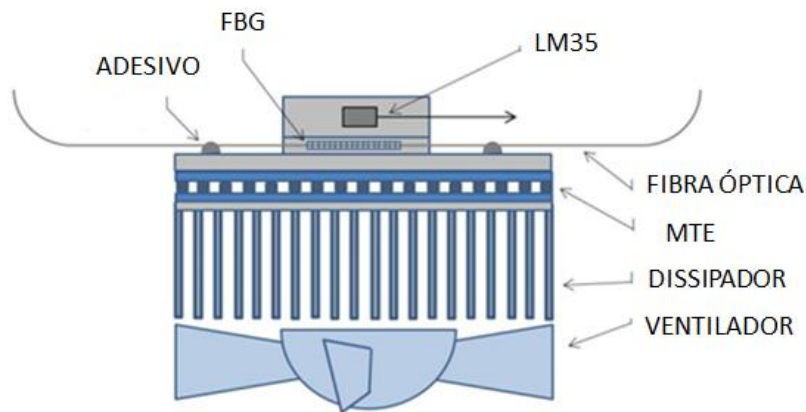


Figura 6.11: Desenho e fotografia do arranjo mecânico da implementação do filtro FBG-F.

Para a fixação da FBG na estrutura de alumínio, diversos adesivos comerciais foram utilizados na tentativa de suportar o intervalo de temperatura entre 5°C e temperaturas superiores a 100°C. Entretanto, tanto os adesivos epóxies quanto as colas à base de cianoacrilato não foram suficientes para suportar temperaturas acima de 90°C. Acima desta faixa de temperatura, a fita adesiva usada em conjunto com cola para prender a FBG não suportava, fazendo com que a FBG desprendesse da estrutura metálica.

A solução encontrada para permitir a excursão da temperatura acima de 100°C, além de melhorar a transferência de strain da FBG, foi o uso da composição de resina fotopolimerizável. Os resultados com o uso da resina se mostraram satisfatórios para o projeto, e permitiram em todos os ensaios realizados com a FBG colada na estrutura, atingir temperaturas acima de 120°C sem soltá-la. O tensionamento da FBG é feito antes de sua fixação na superfície metálica, para que durante a excursão da temperatura, a fibra não sofra curvatura. Em seguida, é feito o preenchimento com a mistura resinosa por cima da FBG e sua fotopolimerização.

Considerando perfeita a aderência entre a FBG e o placa de alumínio, presume-se que o deslocamento provocado na rede durante o experimento é devido somente à expansão térmica do metal. A Tabela X resume os principais parâmetros do projeto do filtro FBG-F.

TABELA X. PARÂMETROS DA FBG E DA PEÇA EM ALUMÍNIO

Parâmetro	Valor
$\lambda_B(\Delta T=0) @ 25^\circ\text{C}$	1535.54 nm
Coefficiente termo-óptico (η) da FBG	$6,74 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Coefficiente de expansão térmica da sílica (α)	$0,55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Comprimento da FBG (<i>distância entre os dois pontos de cola</i>)	30 mm
Comprimento da placa de alumínio (L_A)	30 mm
Coefficiente foto-elástico (ρ_e) da FBG	0,22
Coefficiente de expansão térmica (α) do alumínio	$24 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

Como a FBG está colada entre dois pontos na superfície do alumínio, podemos escrever:

$$L_{\text{FBG}} = L_{\text{AL}} \quad (6.1)$$

onde L_{FBG} é o comprimento da FBG, (isto é, a distância entre os pontos de cola contendo a FBG) e L_{AL} é o comprimento da peça de alumínio. Como na Eq. (2.4) o ε_{FBG} é a deformação mecânica à que a fibra está submetida, ΔL_{FBG} será a extensão mecânica da FBG. Mas neste caso, é importante notar que a fibra óptica sofre ao mesmo tempo uma expansão/contração térmica quando submetida às variações de temperatura, portanto temos:

$$\Delta L_{\text{FBG}} = L_{\text{AL}} \alpha_{\text{AL}} \Delta T - L_{\text{FBG}} \alpha_{\text{FBG}} \Delta T \quad (6.2)$$

Onde α_{AL} é o coeficiente de dilatação térmica do alumínio. Substituindo as Equações (2.4) e (6.1) em (6.2), temos:

$$\varepsilon_{\text{FBG}} = (\alpha_{\text{AL}} - \alpha_{\text{FBG}}) \Delta T \quad (6.3)$$

Substituindo a Eq. (6.3) na Eq. (2.2) e usando as constantes da Tabela XI obtemos a sensibilidade térmica teórica para a FBG colada sobre a estrutura mecânica do filtro FBG-F:

$$\frac{\Delta \lambda_{\text{B}}}{\lambda_{\text{B}}} = (1 - \rho_{\text{e}}) (\alpha_{\text{AL}} - \alpha_{\text{FBG}}) \Delta T + (\alpha_{\text{FBG}} + \eta) \cdot \Delta T \quad (6.4)$$

$$\frac{\Delta \lambda_{\text{B}}}{\Delta T} = 42.15 \text{ pm}/^{\circ}\text{C} \quad (6.5)$$

Segundo o resultado da Eq. (6.4) obtido em (6.5), a resposta do λ_{B} do filtro em função das variações de temperatura é $\approx 42 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, ao invés do valor teórico da sensibilidade térmica que é $\approx 14 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ para uma FBG livre, conforme discutido na seção 2.2.

6.3.3 Circuito de Potência

Para variar o sentido da corrente elétrica que passa pelo MTE, aquecendo-o ou resfriando-o quando necessário, é utilizado um conversor CC-CC em ponte completa, conforme mostra a Figura 6.12. A estratégia de chaveamento adotada é a Modulação por Largura de Pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) bipolar. O conversor é

alimentado por uma fonte CC de 15,0 V/5,0 A.

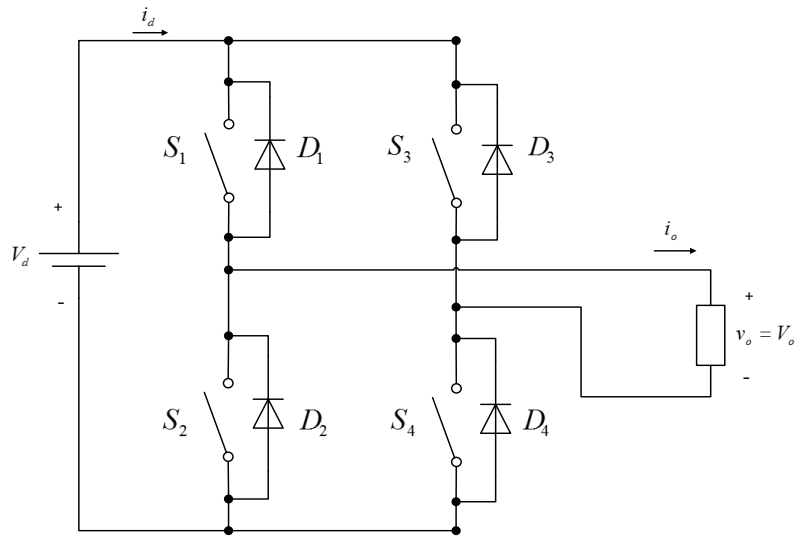


Figura 6.12: Conversor CC-CC em ponte completa.

Um DSP é utilizado para gerar os sinais PWM necessários para controle do conversor. O sinal de saída do conversor é uma tensão CC chaveada com valor médio proporcional ao ciclo de trabalho das chaves. No entanto, tensões chaveadas aplicadas ao MTE podem reduzir sua vida útil (Tellurex Corporation, 2010). Assim, o filtro LC mostrado na Figura 6.13 é utilizado na saída do conversor, no intuito de manter apenas a componente contínua da tensão sobre o TEM

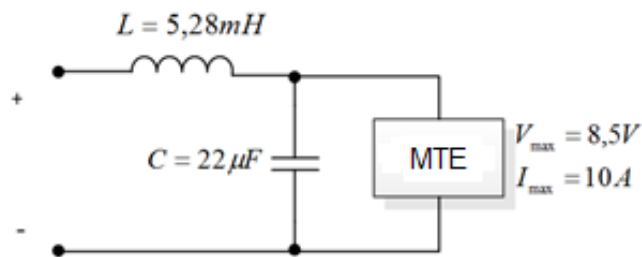


Figura 6.13: Carga do conversor CC-CC: filtro LC+MTE.

6.3.4 Projeto do Controlador

Uma temperatura de referência é comparada com a temperatura do conjunto módulo “MTE+FBG”, medida através do sensor de temperatura LM35. Este é um sensor de precisão, capaz de medir temperaturas de -50°C a 150°C. O conversor

análogo-digital (A/D) do DSP é utilizado para aquisição do sinal de temperatura. A diferença entre as temperaturas é um sinal de erro, que pode ser positivo ou negativo.

Um controlador do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) foi implementado no DSP. A parcela derivativa é fundamental para o aumento da estabilidade relativa do sistema, em referências de temperatura elevadas (próximas a 100°C), devido ao comportamento não linear do MTE, conforme mostrado nas Figuras 6.6 e 6.7. O Anexo A apresenta o fluxograma do programa desenvolvido implementado no programa *Code Composer*. A entrada do controlador é o sinal de erro e a saída é o ciclo de trabalho do sinal PWM a ser aplicado às chaves do conversor CC-CC, que é proporcional à tensão a ser aplicada ao MTE, conforme o diagrama da Figura 6.14.

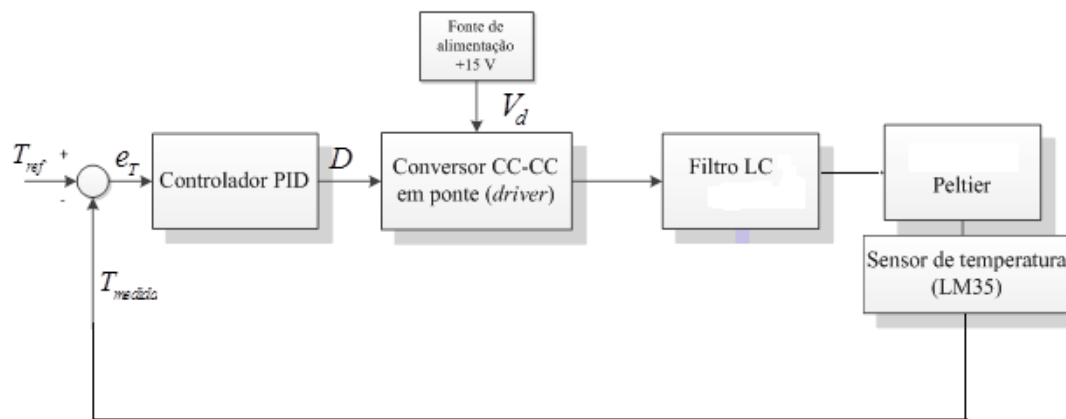


Figura 6.14: Diagrama de blocos do controle de temperatura.

A função de transferência do controlador PID é descrita na Equação (6.6).

$$\frac{D(s)}{e_t(s)} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + sT_d \right) \quad (6.6)$$

Onde, $e_t(s) = T_{ref}(s) - T_{medida}(s)$ é o erro de temperatura, $D(s)$ é o ciclo de trabalho a ser aplicado ao conversor, K_p e K_i são os ganhos proporcional e integral do controlador, respectivamente, e T_d a constante de tempo derivativa.

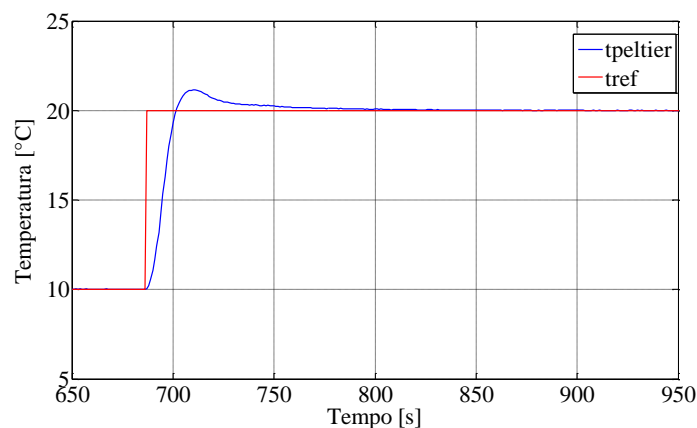
A Equação (6.6) deve ser discretizada para ser implementada no DSP. Diversos métodos de discretização podem ser utilizados para converter um controlador analógico em um digital (Al-Alaoui, 2009) e a escolha do melhor método, depende de cada aplicação. Utilizando método de Forward Euler, a saída do controlador PID pode ser escrita no formato da equação abaixo:

$$D(k) = D(k-1) + K_p e(k) + K_p K_i T_s e(k) + \frac{K_p T_d}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \quad (6.7)$$

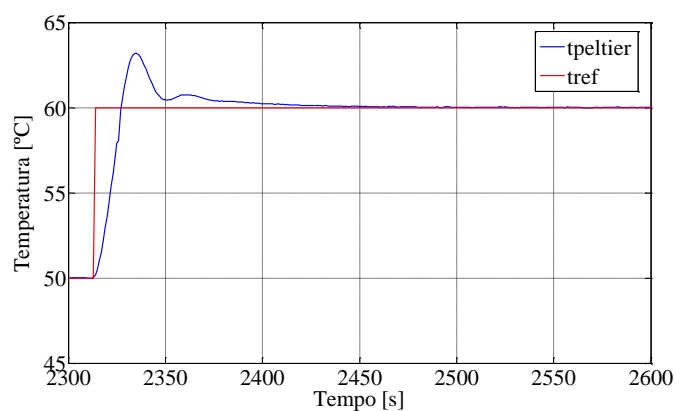
na qual T_s é o período de amostragem.

Os ganhos do controlador foram ajustados através do método de Ziegler-Nichols (ASTROM, *et al.*,1997). Para isso, foi aplicado um degrau de tensão no módulo Peltier e observado sua resposta no tempo em malha aberta. O objetivo do controlador é rastrear a temperatura de referência com um erro em regime permanente menor ou igual a $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Um ajuste fino dos ganhos K_p , K_i e da constante de tempo T_d foi necessário, de modo a tornar a resposta do sistema mais rápida e manter o erro em regime dentro da faixa estabelecida.

Referências de temperatura no intervalo de 10°C a 100°C foram fornecidas ao programa, em passos de 10°C . A Figura 6.15 (a) e (b) mostram o tempo de subida da temperatura da MTE (T_{peltier}) com um passo de 10°C para temperaturas de referência de 20°C e 60°C , respectivamente. Pela Figura 6.15 (a) o valor máximo é 21.16°C , com overshoot de 5.8% e o tempo de subida de 16 s. Na Figura 6.15 (b) o valor máximo é 63.19°C , o overshoot é 5.3% e o tempo de subida é 14 s.



(a)



(b)

Figura 6.15: Resposta do controle de temperatura para (a) 20°C e (b) 60°C .

6.3.5 Resposta Experimental do funcionamento do Filtro Sintonizável de FBG

O acionamento do MTE através do circuito de potência e seu controle através do DSP é responsável por promover as variações de temperatura necessárias para permitir o deslocamento no λ_B do filtro FBG-F. No primeiro ensaio, uma FBG com λ_B em 1532.55 nm foi posicionada dentro da cavidade da placa de alumínio, sem que as extremidades estivessem coladas. Neste ensaio inicial, deseja-se obter a variação do λ_B , quando a fibra é aquecida ou resfriada, deixando ela livre sobre a estrutura metálica. A FBG livre, ou seja, apenas posicionada na cavidade interna da peça de alumínio é submetida à uma variação de temperatura entre 10°C e 100°C. Esse resultado permitirá comparar a sensibilidade térmica da rede livre após ser colada no material.

Um segundo experimento foi realizado esticando a FBG e, em seguida, colando-a sobre a placa de alumínio. Durante o processo de colagem, a FBG é esticada 3 nm para evitar que sofra algum strain ou curvatura, quando o conjunto FBG+alumínio é resfriado. Ou seja, existe uma diferença de, aproximadamente 3 nm entre o comprimento de onda de Bragg da FBG livre ($\lambda_B=1532,553$ nm @25 °C) e o comprimento de onda de Bragg da FBG fixa ($\lambda_B=1535.517$ nm @25 °C).

A FBG colada sobre o alumínio é então submetida à mesma variação de temperatura do experimento anterior. O deslocamento do λ_B para a FBG livre e para a FBG colada sobre o alumínio é mostrado na Figura 6.16. Conforme mostra o gráfico e de acordo com os resultados teóricos apresentados no Capítulo 2, a variação no λ_B em função da temperatura mostra um aumento de três vezes na variação do λ_B quando a FBG é colada sobre o alumínio. A equação do ajuste linear e o seu coeficiente de determinação R^2 são apresentados na Tabela XI.

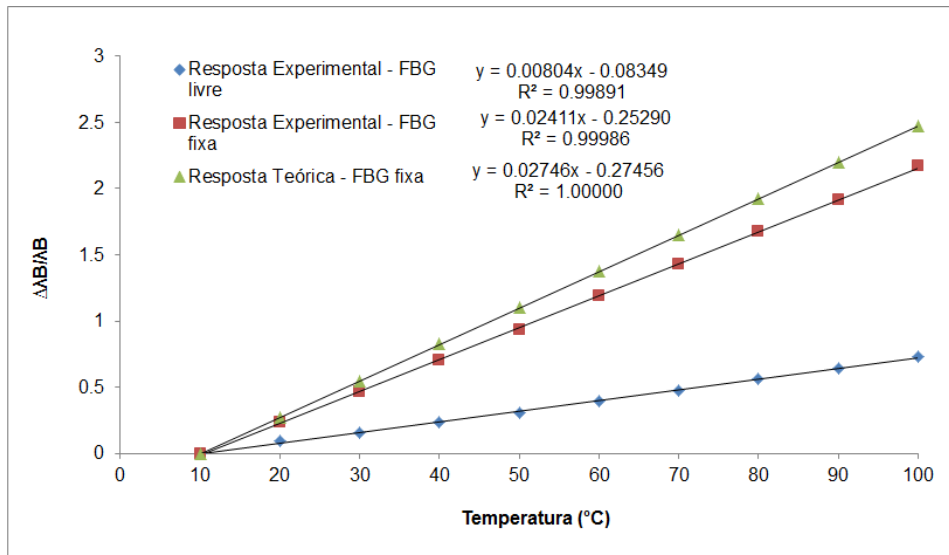


Figura 6.16: Resposta teórica e experimental da variação do λ_B do filtro FBG-F em função temperatura.

A partir da análise da equação do ajuste linear, podemos notar que a sensibilidade térmica da FBG aumentou de 12.31 pm/°C (FBG livre), para 37.02 pm/°C (FBG fixa), durante o incremento da temperatura de 10°C até 100°C, o que permite um intervalo de sintonia térmica no λ_B do filtro FBG-F maior, em concordância com a análise teórica da variação no λ_B apresentada na seção 2.5.

TABELA XI. RESPOSTAS DO AJUSTE LINEAR PARA AS CURVAS DE SENSIBILIDADE TÉRMICA DO FILTRO FBG-F

	Equação Ajuste Linear	R ²
Resposta Experimental – FBG livre	$y = 0.01231x + 1532.553$	0.99891
Resposta Experimental – FBG fixa	$y = 0.03702x + 1536.044$	0.99986
Resposta Teórica – FBG fixa	$y = 0.04215x + 1535.517$	1.00000

O resultado experimental da sensibilidade térmica para a FBG fixa na placa de alumínio mostra a coerência com o resultado teórico (42.15 pm/°C) calculado na Eq. (6.5). Para investigar a histerese da resposta com o aumento e o decréscimo na temperatura, as variações no λ_B são monitoradas, na subida e na descida, entre 5 °C até 100 °C, conforme mostra o gráfico da Figura 6.17.

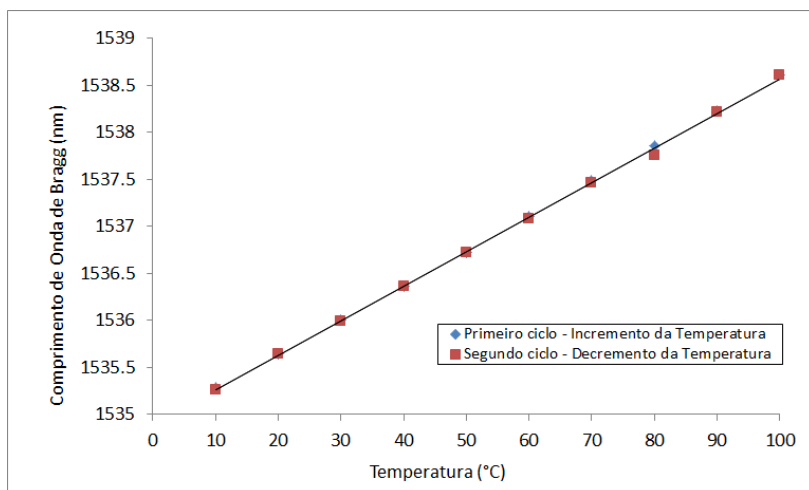


Figura 6.17: Curva de histerese para o filtro FBG-F.

No comportamento da curva da sensibilidade térmica, é possível observar, que o filtro FBG-F não apresentou histerese neste intervalo de temperatura e o R^2 , nas equações de ajuste linear é, praticamente 1. A Tabela XII mostra as equações de ajuste linear para cada ciclo, mostrando que os valores da sensibilidade térmica levantados estão próximos.

TABELA XII. RESPOSTA DA CURVA DE HISTERESE DO FFBG

	Equação Ajuste Linear	R^2
1 st Ciclo – Incremento da Temperatura	$y = 0.03702x + 1534.894$	0.99986
2 st Ciclo – Decremento da Temperatura	$y = 0.03676x + 1534.890$	0.99928

6.4 Resposta experimental do funcionamento do filtro com rede gêmea

Para comprovar o princípio de funcionamento do sistema de sintonia usando o filtro FBG-F desenvolvido, o λ_B do filtro FBG-F foi alterado impondo uma variação térmica através do MTE. Considerando o esquema experimental da Figura 6.18 é possível estudar a variação na potência óptica resultante do esquema de demodulação, usando uma FBG-S e o filtro FBG-F, em função das variações na temperatura impostas pelo controle ao MTE.

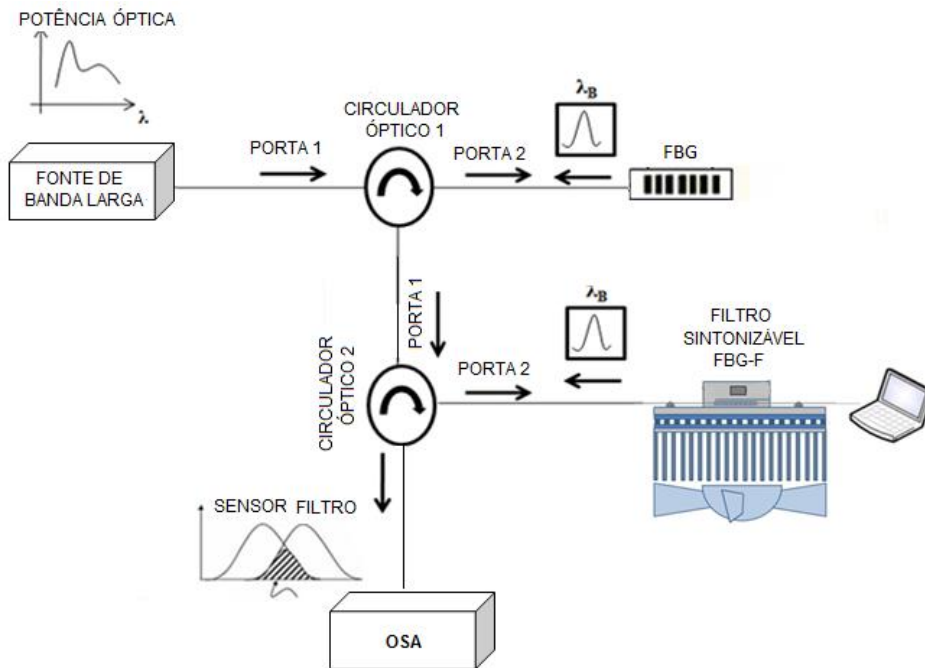


Figura 6.18: Diagrama esquemático do *setup* para os ensaios com o filtro sintonizável FBG-F.

A área sombreada do espectro ilustrado dentro da Figura 6.18, é a interseção entre o espectro do sinal refletido pela FBG-S e o espectro de transmitância do filtro FBG-F mostradas na Figura 6.19, onde o sensor está em estado de repouso. O eixo vertical mostra a reflectância em watts do filtro FBG-F e da FBG-S. A integral desta área representa a intensidade luminosa (potência refletida) total em watts que atinge o fotodetector. Esta potência refletida, devido à interseção entre o espectro das duas FBGs, é monitorada através de um analisador de espectro óptico (OSA). Para a demodulação eficiente entres os dois sensores, o espectro do filtro deve interceptar o espectro do sensor em um ponto específico para alcançar a máxima sensibilidade. Isto é feito variando a temperatura do filtro usando o sistema de controle.

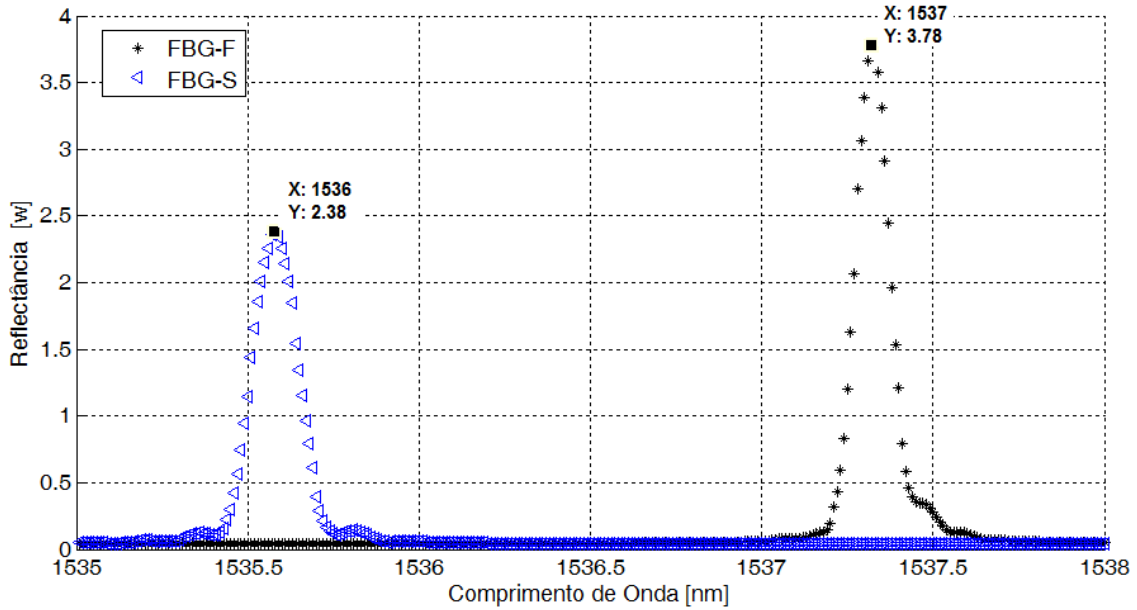


Figura 6.19: Curva espectral da FBG-S e a FBG-F.

Neste ensaio, o sistema de controle desenvolvido atua sintonizando o filtro FBG-F no ponto ótimo de operação, onde a sensibilidade entre os espectros da FBG e do FFP-F é máxima. O ponto de máxima sensibilidade ou ponto ótimo será determinado pelo algoritmo apresentado na próxima seção. Para estudar a variação da área de intercessão mostrada na Figura 6.18, diferentes deslocamentos no λ_B são efetuados no filtro FBG-F, enquanto a FBG-S é mantida à temperatura constante. A posição do filtro FBG-F foi deslocada através do controle de temperatura desenvolvido, impondo um aumento na temperatura do MTE. Como mostra a Figura 6.20, a potência óptica aumenta, até alcançar um máximo, aproximadamente, quando a temperatura é 71°C, onde o λ_B possui o valor de 1537.39 nm.

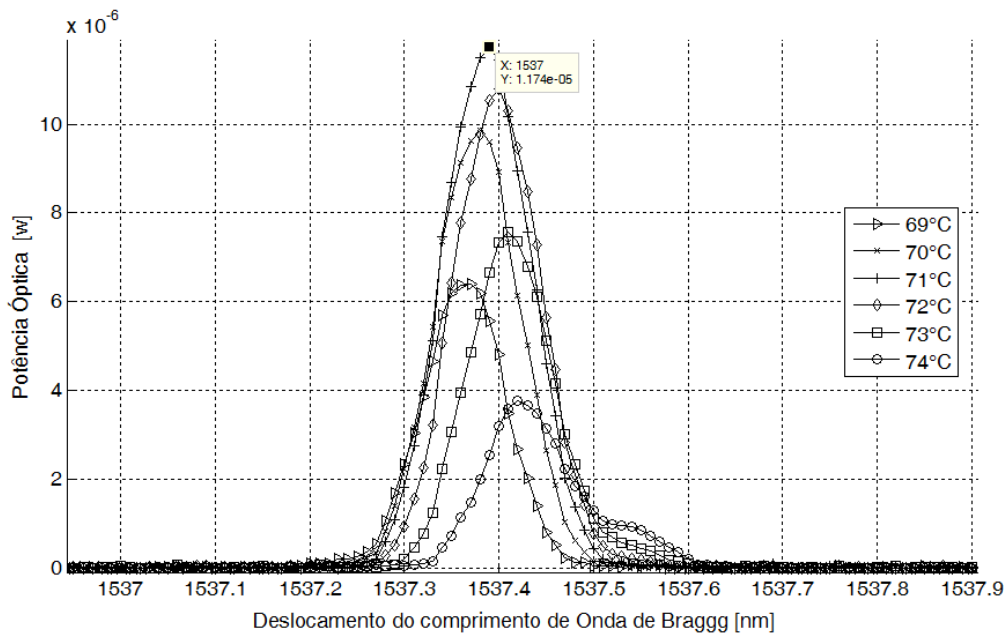


Figura 6.20: Curva de interseção entre os espectros de uma FBG-S e do filtro FBG-F, monitorado pelo OSA. A reflexão máxima ocorre quando o λ_B é de 1537.39 nm.

Na Figura 6.21, a potência óptica é mostrada como função da temperatura no filtro FBG-F. A potência óptica de saída é máxima quando a temperatura alcança 71°C.

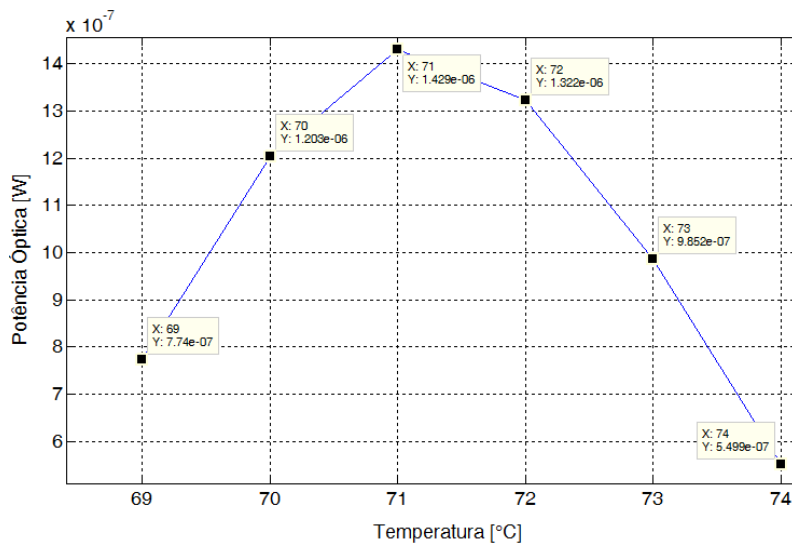


Figura 6.21: Valores da potência óptica de saída em função da temperatura, mostrando o ponto onde a potência é máxima.

Cabe ressaltar que na aplicação da compensação de temperatura do sensor FBG-PZT, usando o filtro FBG-F, o sistema de controle do filtro FBG-F irá acompanhar os deslocamentos no λ_B do sensor FBG-PZT em virtude de variações na temperatura ambiente ou devido ao aquecimento das cerâmicas. Usando uma terceira FBG que

atuará como a temperatura de referência para a entrada dos dados no controlador, os desvios na temperatura serão registrados a partir da sensibilidade desta FBG às variações térmicas, e os dados de leitura serão enviados via fibra óptica para o controle do filtro FBG-F. Através da sintonia do λ_B no ponto ótimo de demodulação, é possível manter o sensor FBG-PZT compensado das variações térmicas sofridas. Trata-se, portanto, de uma compensação ativa e dinâmica.

6.5 Algoritmo de Otimização

A sensibilidade é um aspecto importante em qualquer sistema de medida. Sua determinação é crítica para obter o desempenho pré-definido nas medidas e a capacidade qualitativa de medir o estímulo físico de interesse. Este parâmetro é influenciado pela física inerente do sensor e aos elementos transdutores, bem como pela implementação específica da cadeia de medidas. Considerando o sistema sob estudo, algumas instâncias e parâmetros podem ser modificados;

- O ponto de operação (Q);
- A largura de banda (FWHM - Full Width Half Maximum) do sensor FBG;
- Os parâmetros da cerâmica PZT.

O ponto de operação pode ser alterado por meio de um filtro sintonizável Fabry Perot ou de uma rede gêmea funcionando como um filtro FBG. Portanto, para desenvolver a prova do conceito com o diagrama esquemático mostrado na Figura 6.18, é razoável que os esforços devam inicialmente estar focados na otimização do ponto de operação, considerando a melhoria na sensibilidade através do ajuste no λ_B filtro do FFP ou da FBG-S.

Um procedimento foi utilizado para estabelecer o ponto ótimo de operação, isto é, o ponto de máxima sensibilidade sobre as características espectrais do filtro em repouso. O esquema pode ser realizado usando nos dois métodos demodulação:

- Demodulação usando o filtro de Fabry Perot (FFP) e a FBG sensora (FBG-S)
- Demodulação usando duas redes gêmeas, isto é, a FBG sensora (FBG-S) e a FBG Filtro (FBG-F).

Para uma faixa relativamente pequena de estímulo em torno do ponto de operação, a interação espectral entre o FFP e a FBG-S pode ser otimizada. A curva espectral para o filtro FFP e a FBG são mostradas na Figura 6.22, onde o sensor está

em estado de repouso. O eixo vertical mostra respectivamente, a transmitância relativa do filtro FFP e a reflectância relativa da FBG.

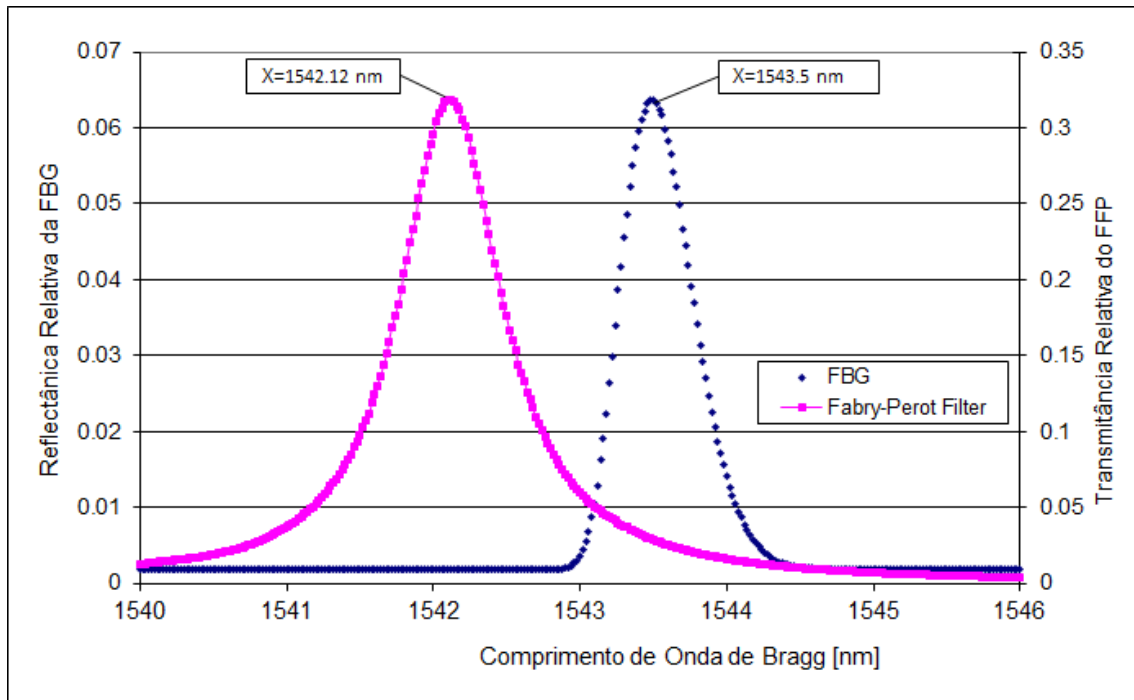


Figura 6.22: Curva espectral para o filtro Fabry-Perot, $F_{FFP}(\lambda)$ e a FBG, $F_{FBG}(\lambda)$.

A convolução numérica entre o FFP e o sensor FBG-S é realizada a fim de se obter a máxima derivada da potência disponível entregue ao fotodetector em função do deslocamento do comprimento de onda. A curva da convolução mostrada na Figura 6.23 apresenta uma resolução de 12 pm; a mesma do analisador de espectro óptico (OSA) utilizado. Dadas duas funções $f_1(t)$ e $f_2(t)$, temos a convolução das funções como sendo:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_2(t - \tau) d\tau \quad (6.8)$$

Onde τ é a variável independente na integral da convolução, $f_1(\tau)$ representa o espectro de reflexão da FBG e $f_2(\tau)$ o espectro de transmissão do filtro. Esta integral define a convolução das funções $f_1(t)$ e $f_2(t)$ (LATHI, 1968). O gráfico da Figura 6.23 apresenta o resultado da convolução como função do λ_B a partir de um ponto de referência.

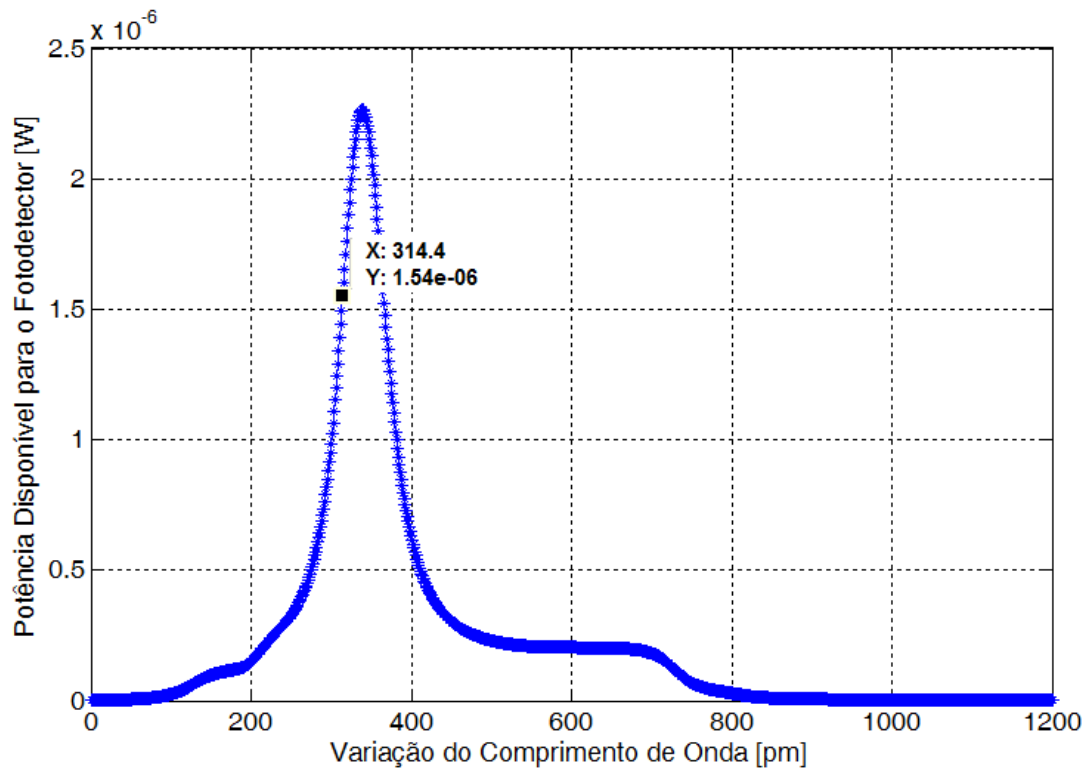


Figura 6.23: Curva da convolução $F_{FFP}(\lambda) \cdot F_{FBG}(\lambda_B)$.

Em seguida, a derivada da curva de convolução é calculada e plotada na Figura 6.24 mostrando o ponto de derivada máxima. O comprimento de onda de Bragg equivalente ao máximo na curva representa a quantidade de deslocamento do comprimento de onda necessária para obter a sensibilidade ótima isto é, o ajuste ideal do filtro no ponto ótimo de demodulação. O FFP é então sintonizado a fim de que a condição de repouso corresponda a quantidade de deslocamento exigido. Na Figura 6.24 a sensibilidade máxima calculada pelo algoritmo é $1.54 \mu\text{W/m}$ em 314.4 pm, significando uma variação de potência de $1.54 \mu\text{W}$ para cada 1 pm de deslocamento na frequência, quando o comprimento de onda central do filtro está localizado em 314.4 pm à direita da frequência central da FBG.

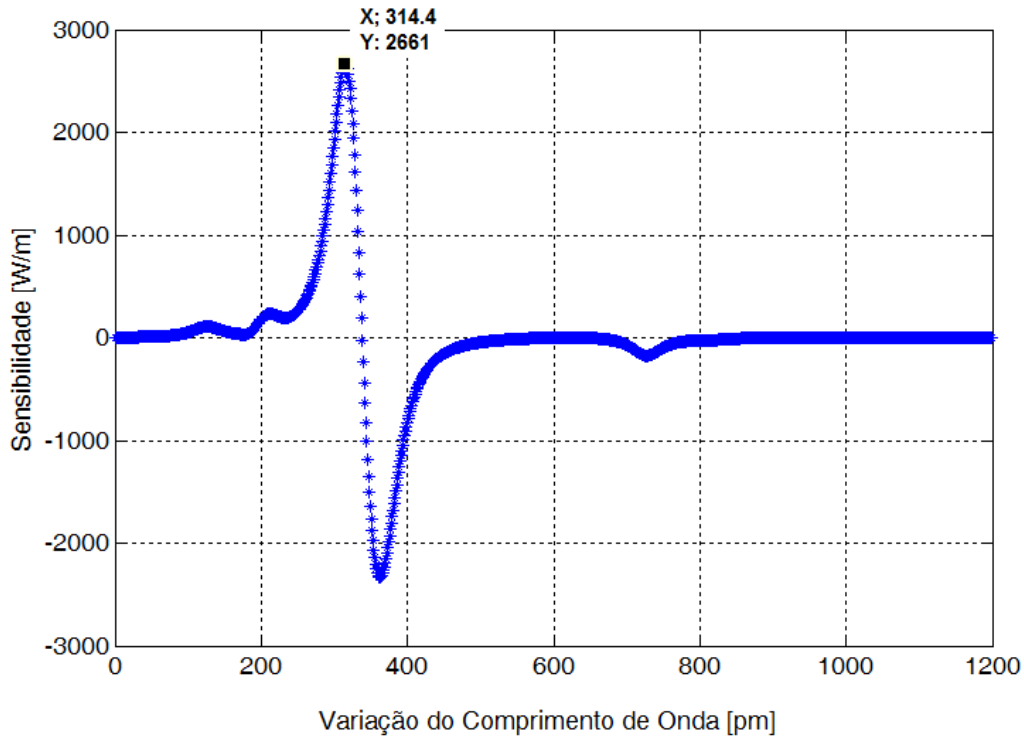


Figura 6.24: A derivada da convolução $F_{FFP}(\lambda) * F_{FBG}(\lambda_B)$.

Quando o sensor está sujeito às variações de temperatura a curva espectral da reflectância da FBG-S desloca-se em direção à curva espectral da transmitância do FFP fazendo com que o ponto de operação mova-se através da curva de convolução. Este movimento do ponto de operação provoca a variação na sensibilidade do sensor.

A estabilização no processo de demodulação usando redes gêmeas, mantendo a FBG-F no ponto ótimo de operação, é uma forma de compensar as variações térmicas sofridas pelo sensor FBG. O processo implica em sintonizarmos o λ_B da FBG-F no ponto ótimo de operação determinado pelo algoritmo de acordo com as variações na temperatura do ambiente de medidas do sensor. O objetivo é manter esse ponto ajustado dinamicamente à medida que o FBG-S desloca-se de acordo com as variações térmicas no ambiente de medidas.

6.6 Sintonia do filtro sintonizável FBG-F em medidas dinâmicas

Para medidas dinâmicas, o ponto de interesse, ou seja, a posição do ajuste ótimo do λ_B do filtro FBG-F é escolhida pelo algoritmo descrito na seção anterior. Usando o algoritmo, partimos do espectro da convolução entre os espectros das FBGs na Figura 6.23. Conforme mostra a derivada da curva de convolução, o máximo,

representa a quantidade de deslocamento no λ_B , neste caso 826.8 pm, a fim de sintonizar o filtro FBG-F na posição ideal, isto é, no ponto ótimo de operação. A curva da derivada está mostrada na Figura 6.25.

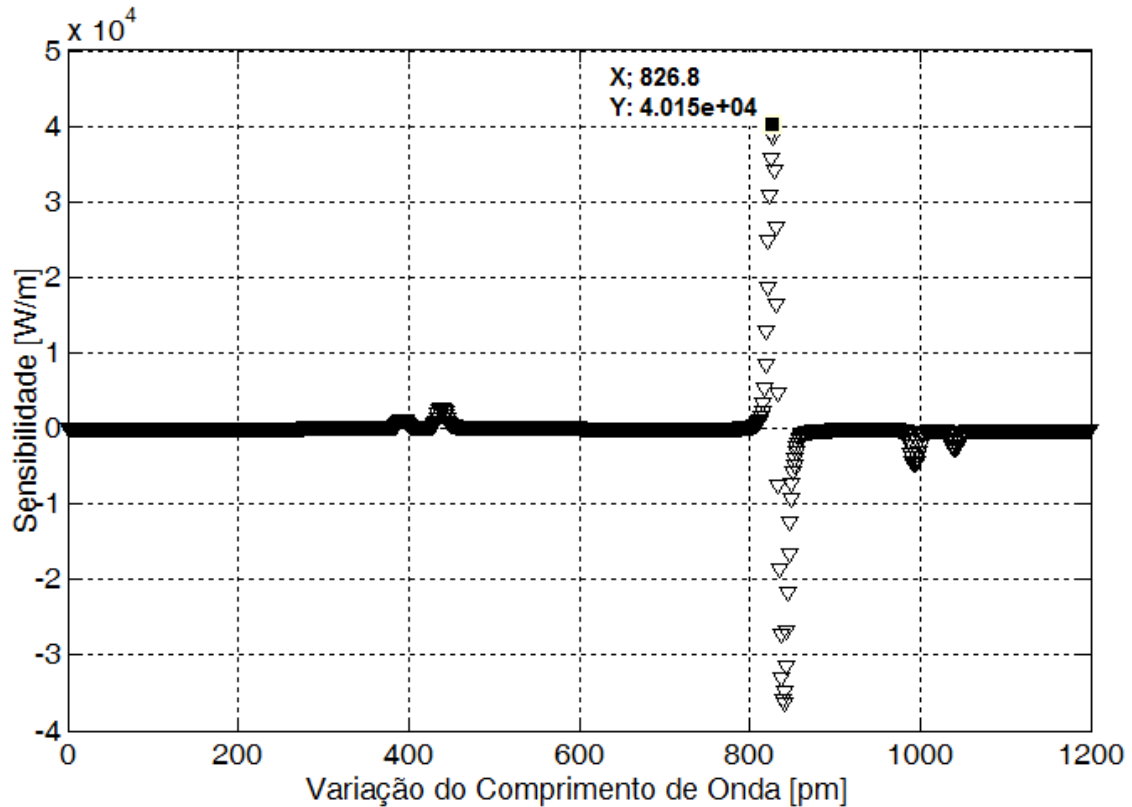


Figura 6.25: Derivada da convolução entre $F_{\text{FBG-F}}(\lambda)*F_{\text{FBG}}(\lambda)$.

O ponto de derivada máxima é sintonizado, entrando manualmente com o valor da temperatura no controle do MTE necessária para promover o deslocamento do λ_B do FBG-F de acordo com a Equação (6.9) oriunda do ajuste linear da curva de resposta experimental do filtro FBG-F do gráfico da Figura 6.16 e da Tabela XII. O valor do deslocamento encontrado pelo algoritmo é substituído na equação de ajuste linear da curva de resposta experimental do filtro FBG-F, assim temos:

$$y = 0.04215x + 1535.517 \quad (6.9)$$

Substituindo o pico máximo no λ_B na Figura 6.20 (1537.39 nm) encontramos o valor de 44.43 °C que fornece o valor da temperatura necessária para deslocar o λ_B do filtro FBG-F e sintonizá-lo no ponto ótimo determinado pelo algoritmo.

Através do sistema de controle apresentado, a sintonia do λ_B do filtro FBG-F é realizada impondo manualmente as variações na temperatura por meio do MTE. Posteriormente, o sistema funcionará como um controle automático de temperatura, para sintonizar o λ_B do filtro FBG-F no ponto ótimo de operação, de acordo com as variações na temperatura sofridas pelo sensor FBG-PZT isto é, fechando a malha de realimentação. No próximo capítulo será apresentada a proposta de compensação térmica usando o filtro FBG-F para a demodulação do sensor em medidas dinâmicas. Os resultados das medidas, mostram o sensor FBG-PZT submetido à uma tensão alternada (CA) de 2 kV e sendo demodulado e controlado usando o filtro FBG-F desenvolvido.

As vantagens da proposta de compensação térmica usando o filtro FBG-F são: a facilidade da implementação e o baixo custo com os materiais envolvidos na construção do sistema. Além disso, é uma construção compacta e uma proposta versátil, já que sua aplicação contempla a compensação térmica em outros projetos usando sensores em redes de Bragg.

6.7 Estudo da resposta de sensibilidade entre os esquemas de demodulação com Filtro de Fabry-Perot e com Redes Gêmeas

A resolução da resposta de saída do sensor é determinada pelo esquema de demodulação utilizado, ou seja, a resolução do sistema de demodulação do λ_B . A melhor resolução pode ser obtida usando o FFP onde o ponto de máxima sensibilidade no espectro da convolução entre a FBG e o FFP, excursiona por uma região mais linear, aumentando a área de interseção entre os dois espectros, já que este espectro é mais fino que o espectro de uma FBG, que é mais largo. Este fato pode ser comprovado através da excursão do ponto ótimo na curva de convolução. Percebe-se uma maior inclinação na excursão do ponto usando o esquema de demodulação com o FFP.

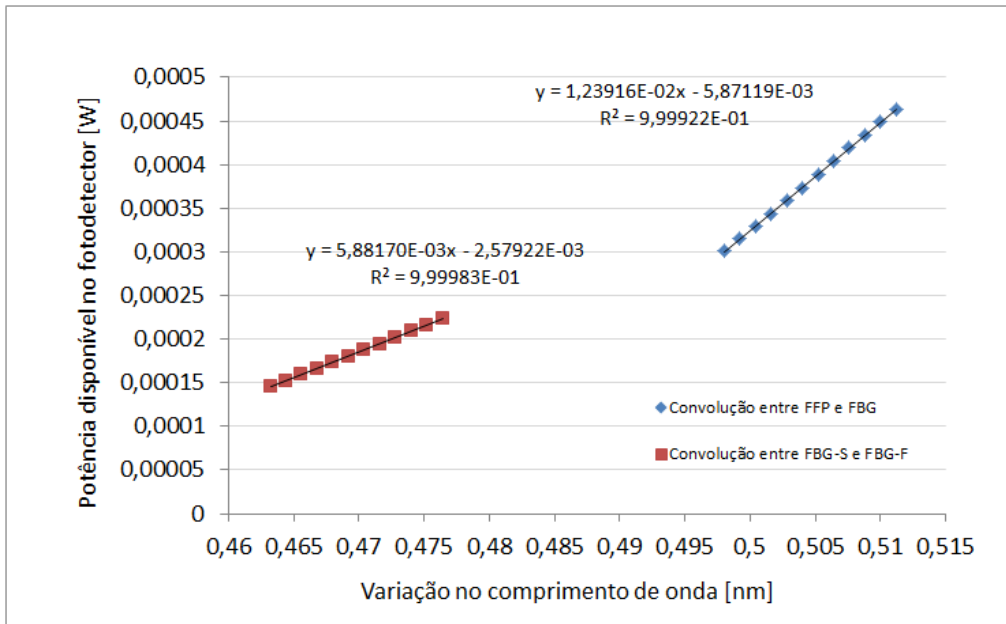


Figura 6.26: Excursão do ponto de máxima sensibilidade na curva espectral da convolução do sensor com o FFP e com o FBG-F.

A Figura 7.21 mostra uma comparação entre os sinais na saída do sensor FBG-PZT demodulado com o FBG-F e com o FFP, mostrando a maior resolução nas respostas do sensor com o FFP. Os resultados das medidas, mostram o sensor FBG-PZT submetido a uma tensão alternada (CA) de 2 kV e sendo demodulado e controlado usando duas técnicas de demodulação, com o FBG-F e com o FFP.

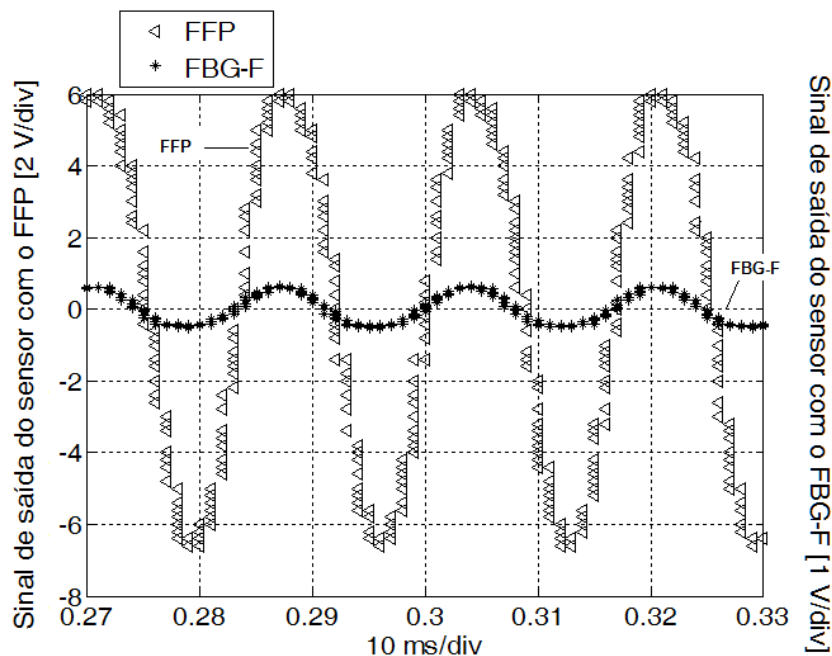


Figura 6.27: Formas de onda na saída do sistema de demodulação do sensor FBG com compensação de temperatura usando o FBG-F e o FFP.

6.8 Cálculo da Distorção Harmônica Total usando o Matlab

Esta etapa compreende a análise da distorção harmônica para os sinais de saída do sensor FBG-PZT quando aplicada uma tensão CA de 2 kV em seus terminais. As formas de onda nas Figuras 7.22 foram analisadas em termos de Distorção Harmônica Total empregando o ambiente de modelagem do Matlab, o Simulink. Os valores da Total Harmonic Distortion (THD) do sinal de saída foram comparados usando os dois métodos de demodulação (rede gêmea e filtro FFP). Usando o diagrama em blocos do simulink para o cálculo da THD, encontramos um valor de 16.19% para a demodulação usando o FFP e 17.33% usando a demodulação com rede gêmea mostrando que a resolução da tensão de saída do sensor FBG-PZT pode ser aumentada usando a técnica de demodulação usando o filtro de Fabry-Perot (FFP).

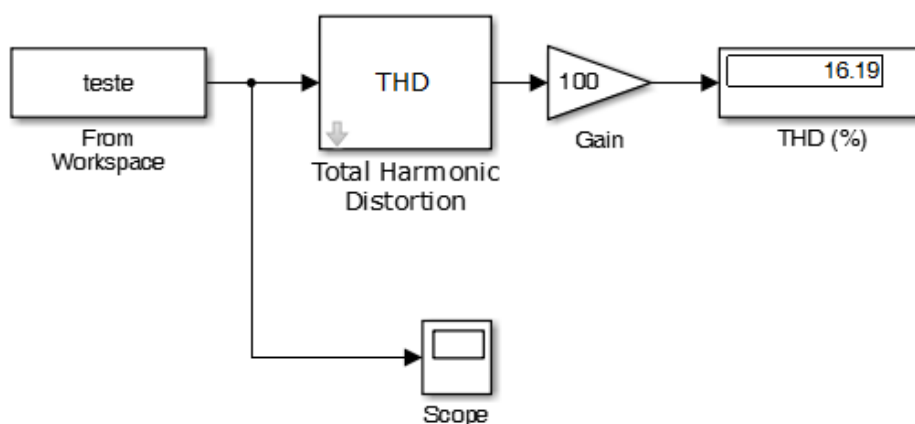


Figura 6.28: Distorção Harmônica Total para os sinais do sensor FBG-PZT.

Os limites para as distorções harmônicas de tensão e corrente estão de acordo com a classe de tensão nominal. Entretanto, há divergências quanto aos limites toleráveis de DTH entre as diferentes normas, já que os órgãos estabelecem diferentes análises e limites toleráveis (KAMIKAWACHI *et al.*, 2013). Além disto, os limites especificados pela norma variam de acordo com o nível de tensão aplicado. As normas apresentam diferentes abordagens referentes às tolerâncias dos distúrbios harmônicos nos sistemas elétricos. O padrão ONS (Operador Nacional do Sistema), responsável pela coordenação e controle da operação das instalações e transmissão de energia do Sistema Interligado nacional, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), fixa em 6% o valor máximo de THD nos barramentos de tensão nominal abaixo de 69 kV. O IEEE (*Institute of Electrical and*

Electronics Engineers) estabelece os limites para distorções harmônicas total para tensão nominal menor ou igual a 69 kV de 5% (KAMIKAWACHI *et al.*, 2013)

Capítulo 7

7 Resultados e discussão do sensor FBG-PZT em alta tensão

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais das propostas de compensação mecânica e com o filtro FBG-F no sensor FBG-PZT em operação e submetido às variações de tensão CC (corrente contínua) e CA (corrente alternada). A evolução da temperatura do sensor e a influência das variações térmicas devido ao aquecimento das cerâmicas PZT quando submetido a uma tensão de 2kV, é analisada.

7.1 Sensibilidade do sensor FBG-PZT submetido à tensão CC sem compensação de temperatura

O objetivo desta seção é demonstrar a relação entre o deslocamento no λ_B , quando uma tensão CC é aplicada aos terminais do sensor FBG-PZT. Os cristais PZT atuam como transdutores de tensão e apresentam uma deformação em suas dimensões, quando um campo elétrico é aplicado em seus eletrodos. As deformações sofridas pelo PZT são convertidas em variações no λ_B da FBG colada ao PZT. Em relação à deformação sofrida pelo PZT, esta se dá através de uma compressão ou uma expansão, dependendo da polaridade da tensão aplicada aos seus terminais. A Tabela XIV mostra os principais parâmetros da cerâmica PZT e da FBG utilizada na construção do sensor FBG-PZT nos ensaios com tensão CC. Para não despolarizar as cerâmicas, o máximo de tensão obedeceu aos níveis de tensão aceitáveis pela cerâmica e especificados pelo fabricante. O cálculo da tensão máxima ($V_{m\acute{a}x}$) é obtido usando a espessura da cerâmica PZT-5H (w) e o máximo campo elétrico reverso ($E_{m\acute{a}x}$) mostrados na tabela XIII. Substituindo temos:

$$V_{m\acute{a}x} = 500 \frac{V}{mm} \times 7 \text{ mm} \quad (7.1)$$

Substituindo temos:

$$V_{m\acute{a}x} = 3500 \text{ V} \quad (7.2)$$

Tabela XIII: Parâmetros da cerâmica PZT e da FBG

PZT	
Propriedades Físicas	Valores
Tipo	PZT-5H
Formato	Anel
Constante Piezoelétrica d_{33}	550 pm/V
Espessura da cerâmica	$w = 7$ mm
Máximo Campo Elétrico Direto	1-2 kV/mm
Máximo Campo Elétrico Reverso	350-500 V/mm
Temperatura de Curie	$T_c = 190^\circ\text{C}$
Número de elementos na pilha	$n=10$
FBG	
Comprimento de Onda de Bragg	$\lambda_B = 1538.10$ nm
Coefficiente Foto-Elastico	$\rho_e = 0.22$
Coefficiente de Expansão Térmica	$\alpha = 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Coefficiente Termo-Óptico (dn/dT)	$\eta = 6.74 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Comprimento da FBG	$L = 20$ mm

Ainda de acordo com a Tabela XIII, substituindo as constantes da cerâmica PZT, na Equação (4.4), que descreve a variação no λ_B da FBG colada ao PZT, calculamos na Eq. (7.2) a sensibilidade teórica do sensor FBG-PZT submetido à alta tensão CC:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta V_{in}} = 329.92 \text{ pm/kV} \quad (7.3)$$

A sensibilidade experimental do sensor foi avaliada através do experimento com o sensor mergulhado em um recipiente contendo óleo isolante e submetido às variações de tensão CC usando uma fonte de alta tensão de 0 a 15 kV_{cc} (Adelco, Brasil)]. A deformação sofrida pelo PZT foi convertida em variações no λ_B da FBG e o espectro refletido da FBG são monitorados usando um interrogador óptico comercial FBG-Scan 708 da FOS&S (Bélgica).

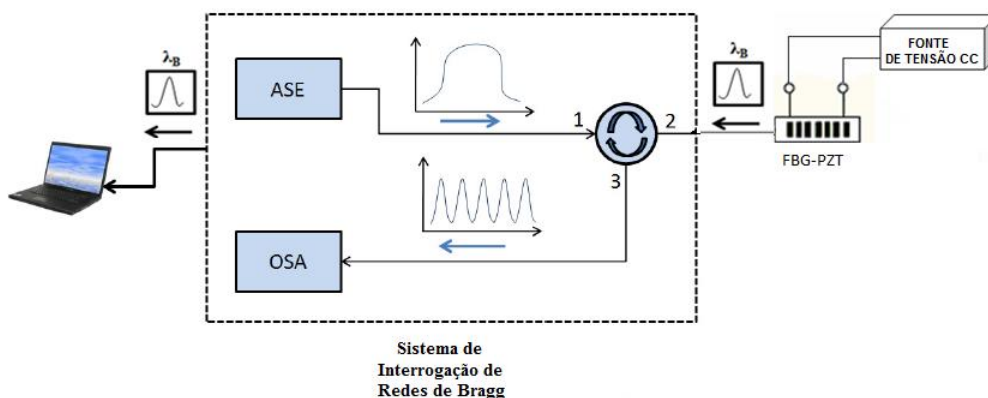


Figura 7.1: Diagrama esquemático com a montagem experimental para as medidas em tensão CC.

A tensão aplicada no PZT variou entre 0 e 2500 V, para não exceder os campos elétricos máximo direto e reverso considerados na Tabela XIV, de acordo com as especificações do fabricante da cerâmica PZT. A figura 7.2 mostra o setup experimental em alta tensão para medir a sensibilidade do sensor FBG-PZT.

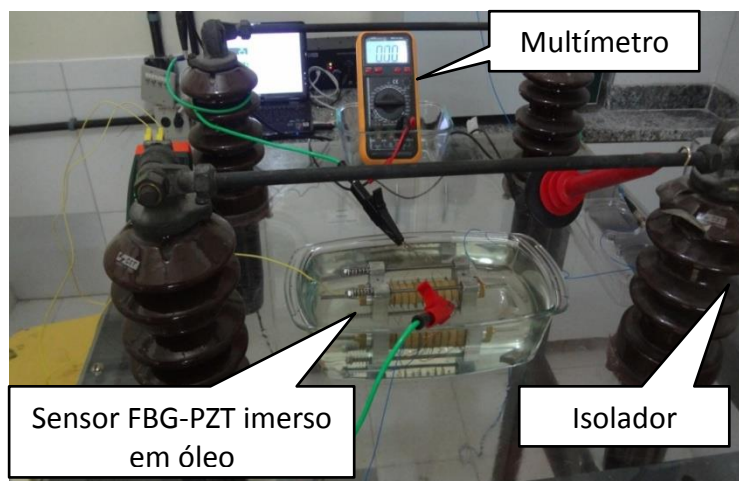


Figura 7.2: Fotografia do setup experimental do sensor imerso em óleo isolante e submetido à alta tensão.

O gráfico do λ_B em função da tensão CC de entrada aplicada aos terminais do sensor fornece sua sensibilidade à tensão, conforme mostra a Figura 7.3. Os ensaios foram realizados com o sensor FBG-PZT antes da compensação de temperatura.

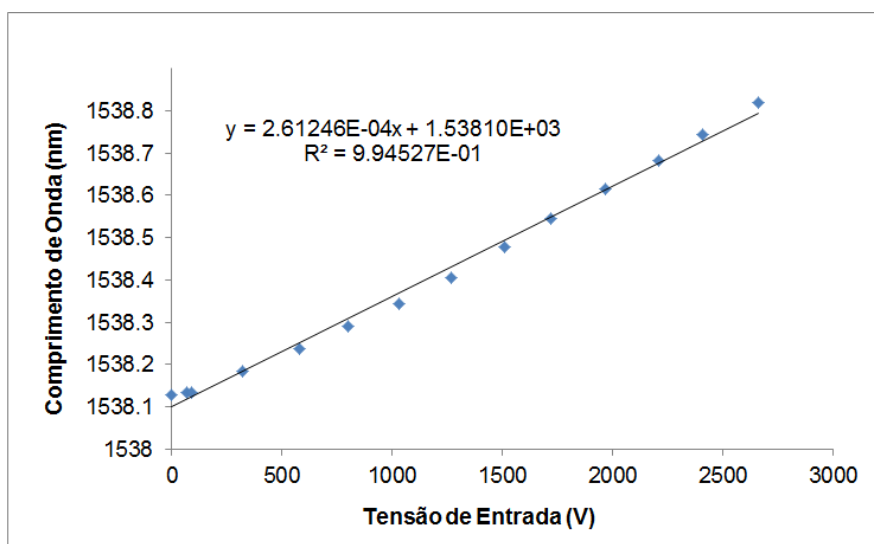


Figura 7.3: Deslocamento do sensor FBG-PZT em função do incremento na tensão CC aplicada aos terminais do sensor.

A sensibilidade experimental do sensor é 261.24 pm/kV e o coeficiente de correlação de 0.994. Este valor significa um deslocamento no λ_B de 261.24 pm para cada 1000 V de tensão CC aplicados aos terminais do PZT. Observe que houve uma diferença entre o valor teórico (392.92 pm/kV) calculado na Eq. (7.2) e o experimental (261.24 pm/kV) apresentado no gráfico da Figura 7.3. Esta diferença entre os resultados se dá devido à elasticidade mecânica das peças, já que todas possuem um módulo de Young finito.

Em seguida foram realizados ensaios consecutivos e para cada ensaio foram modificadas as forças aplicadas às molas, apresentadas no desenho ilustrativo da Figura 4.13 e na fotografia da Figura 4.14. A variação no λ_B do sensor, em função da tensão CC, é tanto maior quanto menor for a compressão na mola, conforme mostra o gráfico da Figura 7.4. Essa compressão deve ser suficiente apenas para manter os anéis PZT juntos aos eletrodos de latão deixando-os livres para corresponder à tensão aplicada aos terminais das cerâmicas.

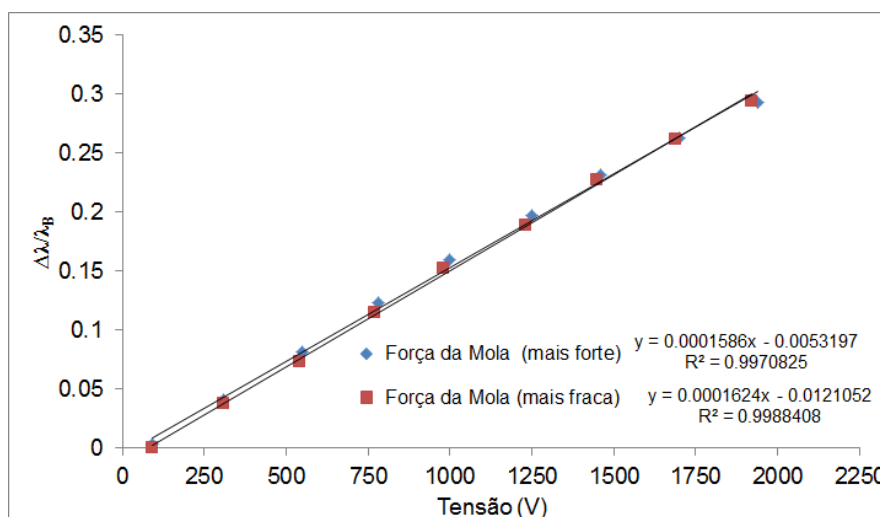


Figura 7.4: Variação no λ_B em função das variações de tensão CC aplicadas, para diferentes pressões nas molas do sensor FBG-PZT.

O gráfico da Figura 7.5 representa os deslocamentos no λ_B para os mesmos dados apresentados no gráfico anterior (7.4). A resposta da sensibilidade à tensão do sensor com a mola mais comprimida é 236.53 pm/kV e com a mola menos comprimida é 242.31 pm/kV. O resultado da sensibilidade do sensor mostra que, uma compressão da mola superior à deformação do stack PZT, provoca o relaxamento da FBG, em consequência, a diminuição em seu comprimento.

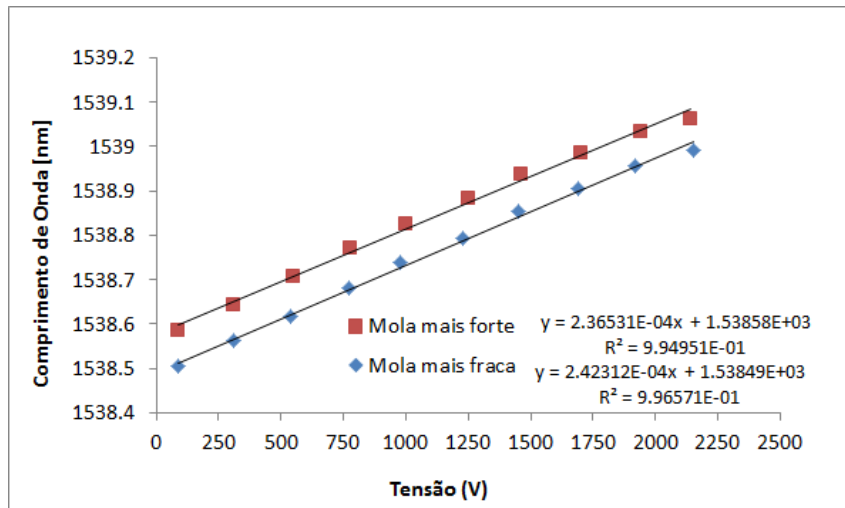


Figura 7.5: Variação do λ_B em função da tensão CC aplicada, para diferentes pressões na mola.

Para avaliar o comportamento térmico do sensor, ele foi submetido à uma tensão fixa de 2 kV. O deslocamento do λ_B é registrado usando o interrogador óptico e um termômetro digital registra o aumento da temperatura ambiente em função do aquecimentos das cerâmicas.

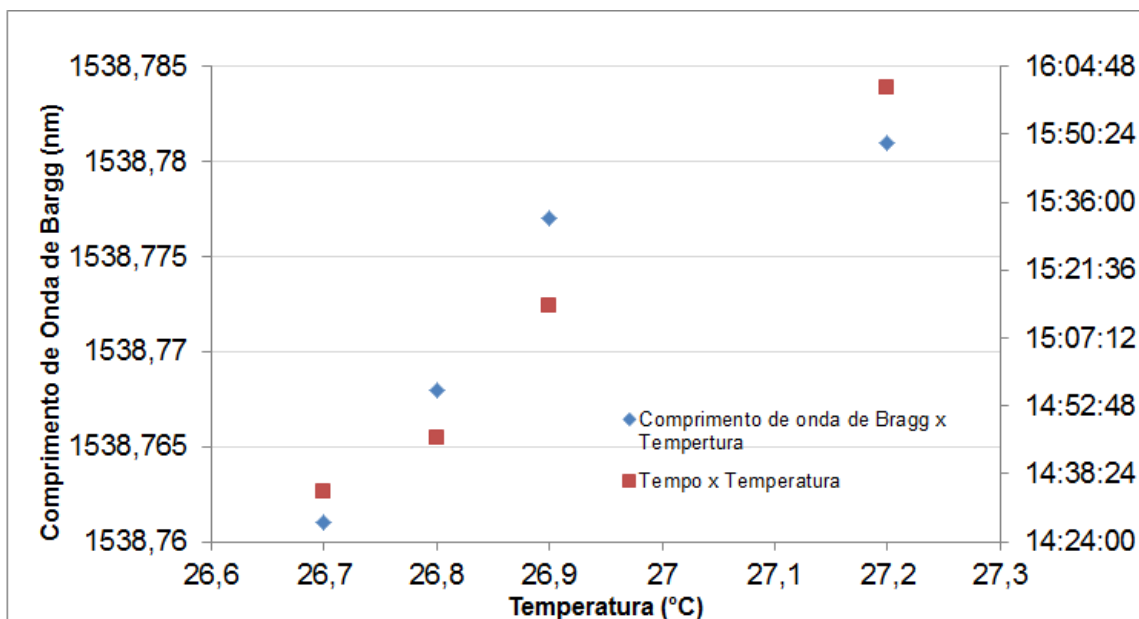


Figura 7.6 Evolução da temperatura em função da tensão CC aplicada aos terminais do sensor FBG-PZT.

Na Figura 7.6, é possível observar que a temperatura no sensor subiu 26.7°C no início do experimento, alcançando 27.2°C após quase 2 horas de operação. O λ_B subiu de 1538.76 nm no início do experimento até 1538.78 nm após duas horas de

operação. Essa variação de apenas 0.01 nm durante aproximadamente 2 horas e meia com o sensor em operação nos mostra que com o sensor em funcionamento sob uma tensão CC aplicada, interfere muito pouco no resultado das medidas, pois uma variação de 0.5°C em 2 horas do sensor em funcionamento, não irá interferir nos resultados das medidas. Conforme será mostrado na próxima seção, o aquecimento das cerâmicas é maior quando o sensor é submetido à uma tensão CA. Assim, nos ensaios com tensão CA será necessário compensar as variações térmicas, já que irão deslocar o λ_B influenciando no resultado das medidas.

7.2 Influência da temperatura na resposta do sensor FBG-PZT submetido à tensão CA sem compensação de temperatura

O esquema da Figura 7.7 mostra o setup desenvolvido para a operação do protótipo com tensão CA aplicada no sensor FBG-PZT. Como os interrogadores ópticos são lentos para respostas em frequência de 60 Hz, foi usado o esquema de interrogação mostrado na Figura 7.7. O setup desenvolvido foi empregado para demodular um sinal de tensão CA de 2 kV produzidos por um transformador.

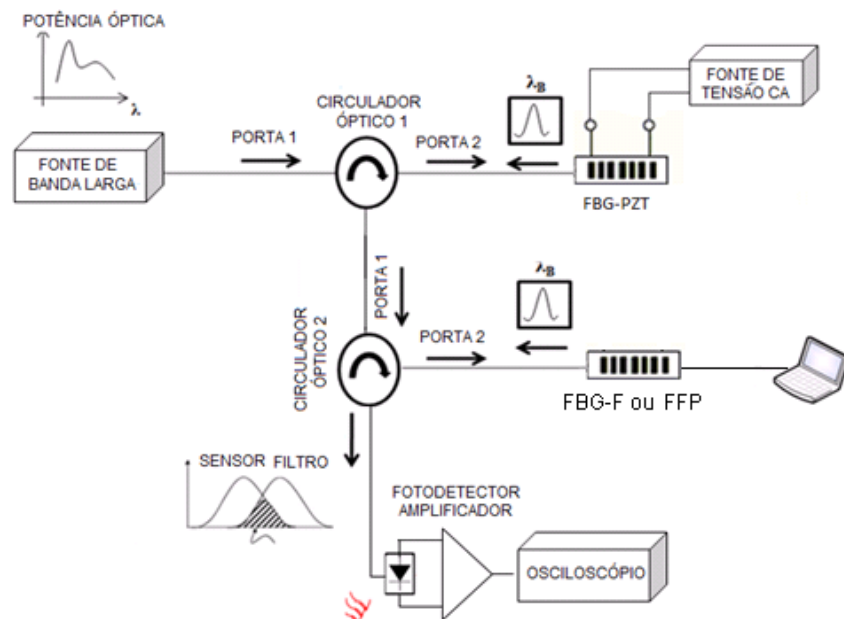


Figura 7.7: Diagrama esquemático do *set up* para os ensaios com tensão CA.

A fonte ASE é usada para iluminar o sensor através da porta 1 do circulador óptico 1. O espectro refletido pelo sensor FBG-PZT entra no circulador óptico 1 através da porta (2). O espectro refletido da FBG-PZT é enviado pela porta (3) do circulador óptico 1 e é então encaminhado para a porta (1) do circulador óptico 2. O

circulador óptico 2 envia o sinal através da porta (2) para um filtro (FBG-F) ou para um filtro FFP, dependendo do esquema de demodulação empregado. Somente a parcela, que corresponde a interseção entre os dois espectros refletidos, atinge o fotodetector pela porta (3) do circulador óptico 2. A fotografia do ensaio experimental é apresentada na Figura 7.8.

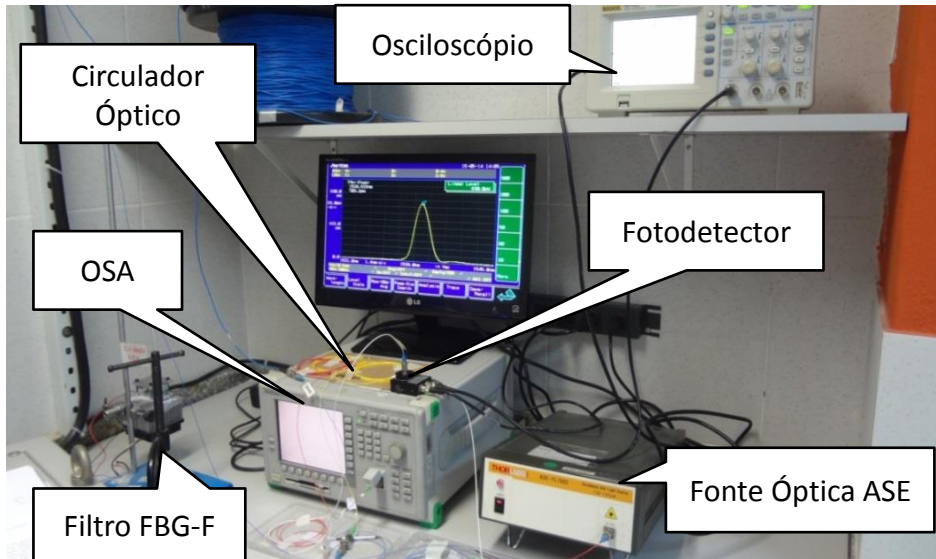


Figura 7.8: Fotografia do setup com os instrumentos usados nos ensaios com tensão CA.

Em um primeiro ensaio, sem compensação de temperatura, o objetivo é analisar a evolução da temperatura do sensor FBG-PZT submetido à uma tensão CA fixa de 2000 volts, durante 4 horas do sensor em operação. Conforme mostra o gráfico da Figura 7.9, a temperatura do sensor FBG-PZT subiu de 27 °C para 37 °C, ou seja, 10 °C. De acordo com a Eq. (2.7), apresentada no Capítulo 2, para uma variação de 1°C, o deslocamento do comprimento de onda de Bragg apresenta uma variação de 14.2 pm.

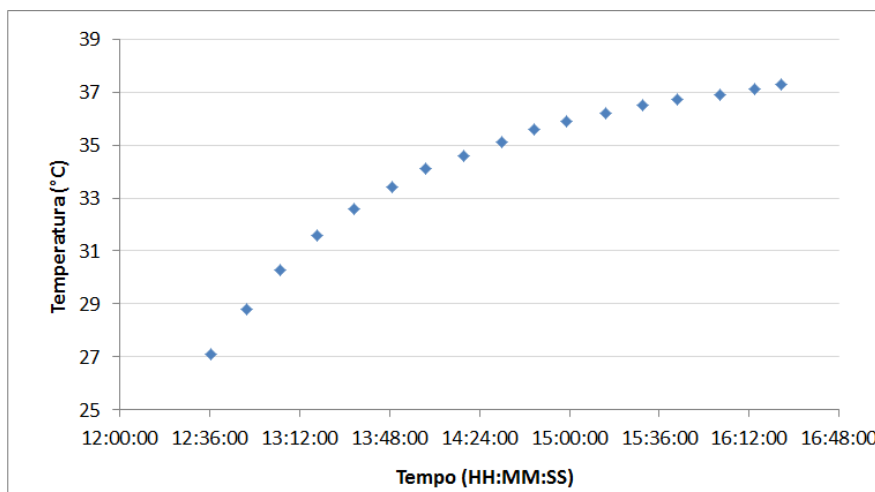


Figura 7.9: Evolução da temperatura em função da tensão CA de 2 kV aplicada aos terminais do sensor FBG-PZT.

No caso do sensor FBG-PZT, essa variação de 10°C promove um deslocamento no λ_B de ≈ 142 pm, suficientes para mascarar os resultados da sensibilidade à tensão do sensor. Por esta razão, torna-se clara a necessidade de compensar as variações de temperatura no sensor.

A Figura 7.10 mostra a resposta experimental do sensor antes da compensação de temperatura para uma tensão CA aplicada. A tensão CA de saída mostrada no osciloscópio corresponde à tensão CA de entrada fornecida pelo transformador, aplicada no sensor FBG-PZT. O sinal no osciloscópio após 05 minutos do sensor em operação mostra as distorções no sinal devido ao aumento da temperatura consequência do aquecimento das cerâmicas. Como é possível observar, a excursão do sinal de entrada atinge uma região não linear da curva da convolução, isto é, o aumento na temperatura acarreta o deslocamento do λ_B do sensor deslocando-o do ponto ótimo determinado pelo algoritmo e distorcendo a senóide, conforme mostra a imagem do sinal na saída do osciloscópio, com o sensor submetido à uma tensão de 2 kV_{RMS}.

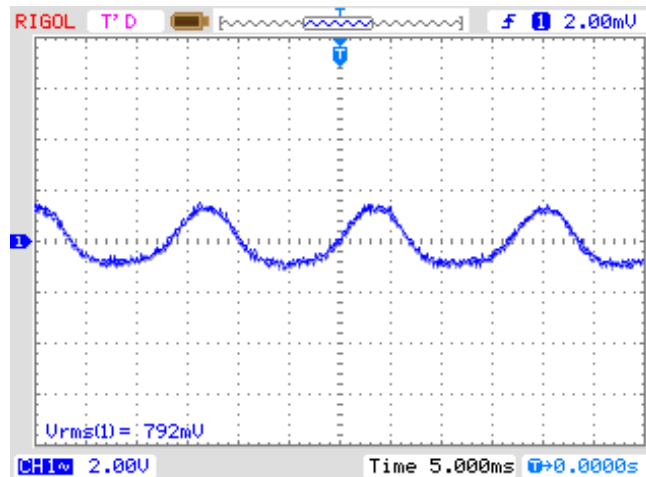


Figura 7.10: Resposta experimental do sensor após 05 minutos em operação, em função de uma tensão CA de 2 kV entrada aplicada aos terminais do sensor FBG-PZT. Eixo vertical: 2 V/div (equivalente a 2.0 kV/div). Eixo horizontal: 5 ms/div.

Conforme discutido, os sensores FBGs são sensíveis simultaneamente à temperatura e ao strain. Dependendo da aplicação é difícil discriminar os desvios λ_B devido à temperatura no mensurando que se está avaliando. Para assegurar a confiabilidade do sensor FBG-PZT é necessário compensar os desvios na temperatura provocados pelo aquecimento das cerâmicas quando o sensor está em operação. Este efeito está evidenciado na Figura 7.10, onde se observa uma distorção na forma de onda. Quando o sensor sofre um aumento na temperatura, desloca o ponto de operação para uma região não linear da curva de convolução mostrada na Figura 6.23.

O movimento do ponto de operação provoca a variação na sensibilidade do sensor. O fotodetector detecta a potência óptica, representada na Figura 7.11 pela área sombreada, onde a área sobreposta entre o sensor e o filtro representa a intensidade de saída. Com o aumento da temperatura, a excursão do sinal de entrada atinge uma região não linear da convolução, conforme mostrado na Figura 7.13.

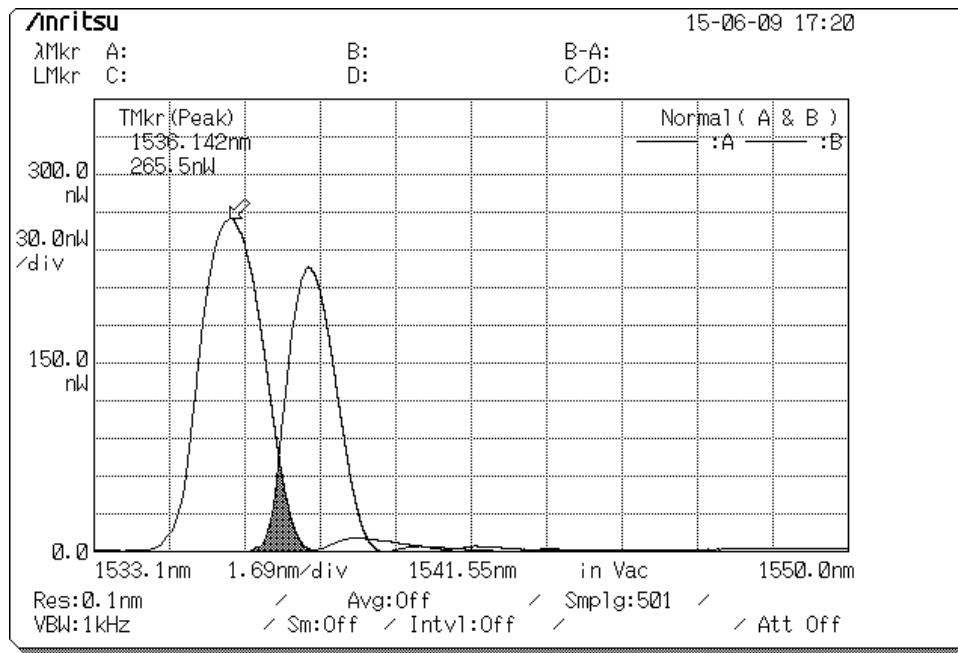


Figura 7.11: Área de interseção entre os espectros de refletância da FBG e do filtro FBG-F.

7.3 Resposta do sensor FBG-PZT com compensação de temperatura e submetido à tensão CA.

A fim de testar a eficiência do método de compensação térmica mecânica proposto no Capítulo 5, após o posicionamento da combinação de parafusos calculados na seção 5.7. Usando o parafuso compensador de invar ($L_{\text{INVAR}}=43.5$ mm) e o parafuso compensador em alumínio ($L_{\text{ALUMÍNIO}}=60.30$ mm), o sensor foi submetido à tensão usando o transformador e a resposta do sensor foi monitorada com o osciloscópio, desta maneira, quando a temperatura do sensor variar, o sensor FBG-PZT agora insensível à temperatura, manterá o λ_B no ponto ótimo de operação, mantendo o ganho e a calibração do sistema.

A montagem experimental usada nos ensaios é a mesma apresentada na Figura 7.7. Nesta tese as respostas de tensão do sensor FBG-PZT foram obtidas usando as duas técnicas de demodulação, com o filtro FBG-F e o filtro FFP.

7.3.1 Resposta da tensão de saída CA do sensor FBG-PZT com compensação de temperatura e demodulado com a rede filtro FBG-F.

A Figura 7.12 mostra a curva espectral da FBG-S (FBG-PZT) e o filtro FBG (FBG-F). O mesmo procedimento usando o algoritmo desenvolvido no Capítulo 6 foi

usado para obtermos o ponto de máxima sensibilidade entre os espectros.

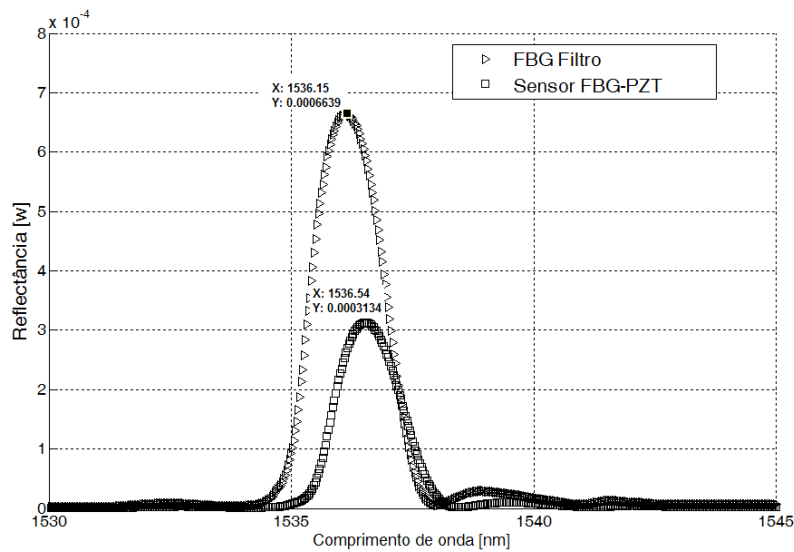


Figura 7.12: Curva espectral do FBG-Filtro [$F_{\text{FBG-F}}(\lambda)$] e da FBG Sensora [$F_{\text{FBG-PZT}}(\lambda)$].

Para uma faixa relativamente pequena de estímulo em torno do ponto de operação, a interação espectral entre a FBG-PZT e o filtro FBG-F pode ser otimizada. As curvas espectrais para a técnica de demodulação usando as redes gêmeas estão mostradas na figura, onde a FBG-S (FBG-PZT) está em estado de repouso. O eixo vertical mostra a reflectância relativa do sensor FBG-PZT e da FBG-F, cujos λ_B são: $\lambda_{B(\text{FBG-PZT})}=1536.54 \text{ nm}$ e $\lambda_{B(\text{FBG-F})}=1536.15 \text{ nm}$, respectivamente. Na curva da convolução numérica entre o sensor FBG-PZT e a FBG-F mostrada na Figura 7.13, o ponto indicado apresenta a máxima sensibilidade possível que é a derivada máxima da convolução, mostrada na Figura 7.14.

A estabilização do ponto ótimo de operação entre os espectros, é uma forma de otimizar o processo de demodulação em redes de Bragg. O processo implica em sintonizarmos o λ_B do sensor FBG-PZT ou do filtro, no ponto ótimo de operação, através da sintonia mecânica ou térmica. Neste ensaio, optou-se por sintonizar o sensor FBG-PZT, usando o sistema de sintonia mecânica, usando os parafusos e a porca de fixação. Esta sintonia é realizada esticando ou afrouxando a FBG sensora (FBG-S) até alcançar o ponto ótimo calculado pelo algoritmo. A sintonia foi realizada antes de aplicar a tensão e foi usado o OSA para monitorar o deslocamento do λ_B conforme apresentado na Figura 7.8, já que usando a implementação com o fotodetector e o osciloscópio, não é possível fazer os registros diretos dos deslocamentos do λ_B usando um osciloscópio.

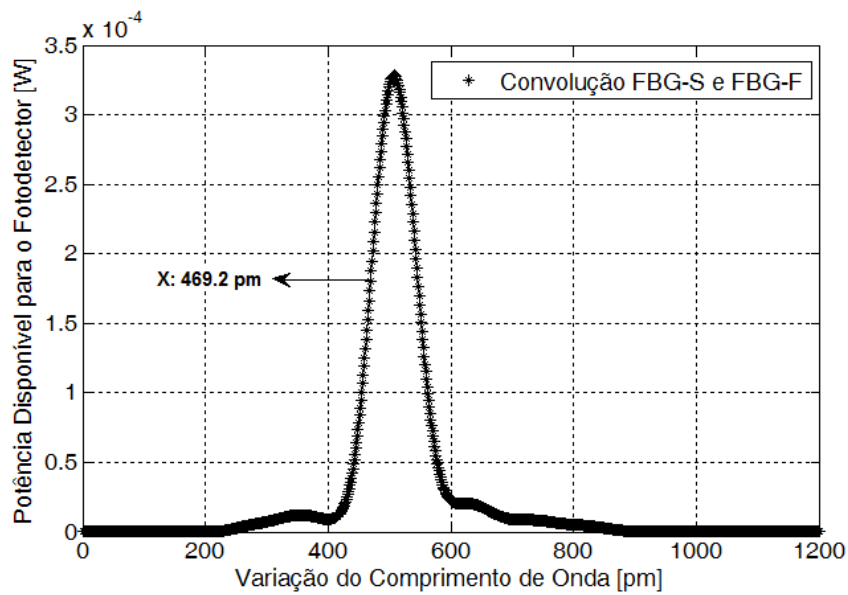


Figura 7.13: Curva da convolução entre a FBG Sensora [$F_{\text{FBG-PZT}}(\lambda)$] e o filtro FBG-Filtro [$F_{\text{FBG-F}}(\lambda)$].

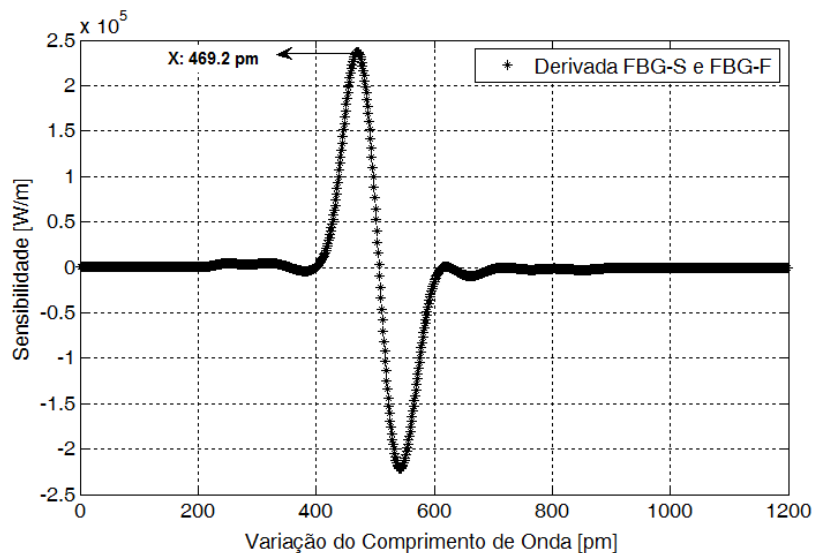


Figura 7.14: A derivada da convolução entre o filtro FBG-Filtro [$F_{\text{FBG-F}}(\lambda)$] e FBG Sensora [$F_{\text{FBG-PZT}}(\lambda)$].

Com o sensor posicionado no ponto ótimo, o VARIAC foi usado para fornecer uma tensão CA de 2 kV através do transformador ao sensor FBG-PZT. A tensão de entrada nos terminais do sensor foi medida usando um divisor de tensão, um multímetro e um osciloscópio digital foi usado para monitorar a saída analógica do sistema de demodulação do λ_B , conforme apresentado no setup experimental das Figuras 7.2 e 7.7. A saída da tensão sob uma variação de tensão aplicada tem uma resposta linear, no entanto, neste ensaio, o sensor foi mantido a uma tensão

constante, para avaliar o comportamento térmico durante as variações de temperatura. Portanto, na Figura 7.15 são apresentadas as respostas do sensor FBG-PZT compensado termicamente para uma tensão CA aplicada de 2 kV, aplicada no sensor e obtidas a partir da tela do osciloscópio. As capturas da tela do osciloscópio foram registradas no início do experimento e em seguida em intervalos de 5 minutos até alcançar 25 minutos em operação ininterrupta.

As formas de onda mostram a tensão V_{RMS} na saída do sensor. No início do experimento a tensão foi 382 mV e após 25 minutos do sensor em operação a tensão alcançou 400 mV. Esta variação está relacionada as variações na fonte de tensão CA, já que não é estável.

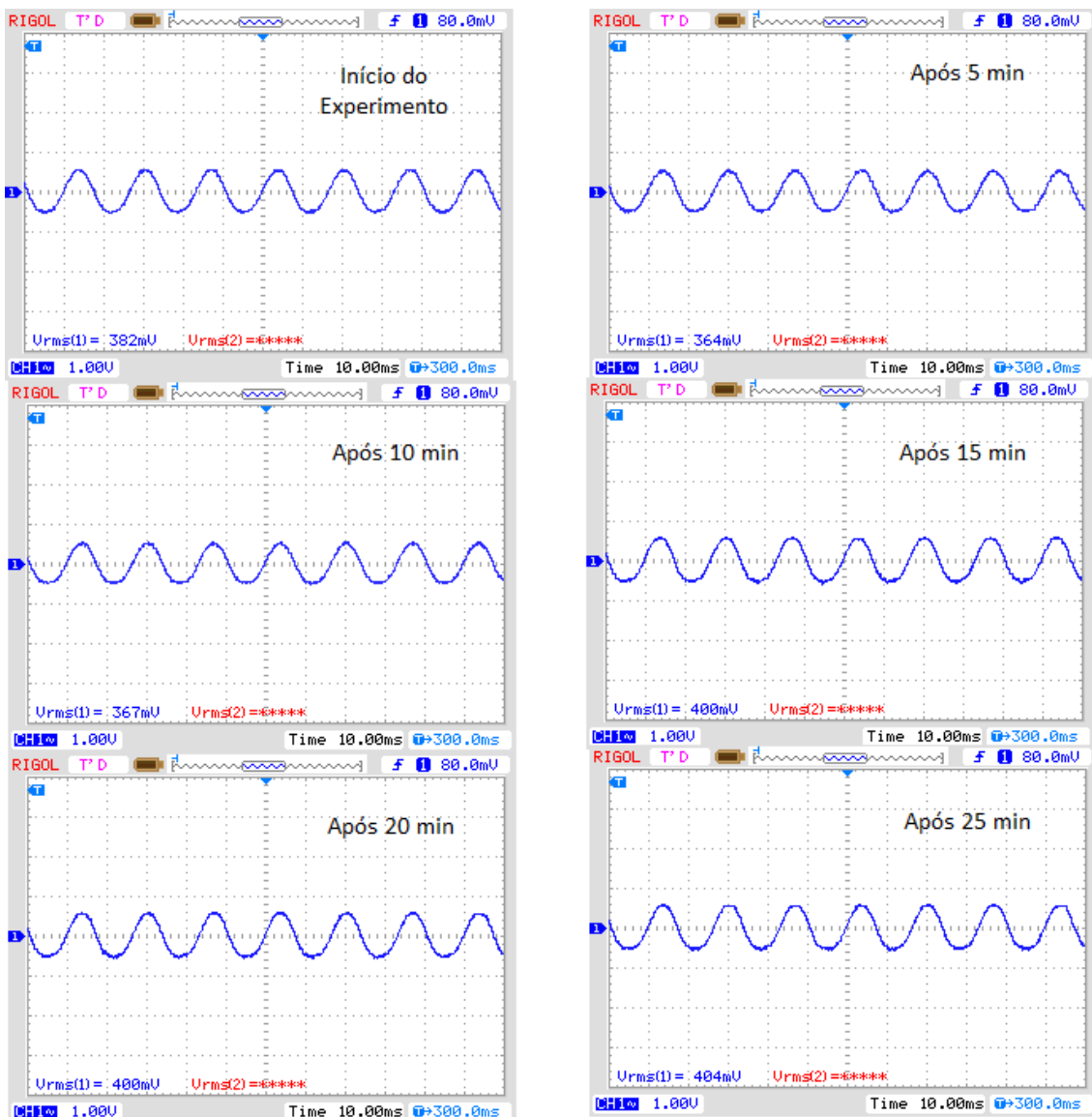


Figura 7.15: Formas de onda do sensor FBG-PZT na saída do sistema de demodulação usando um FBG-F submetido à tensão CA de 2 kV no início do experimento e após intervalos de 5 minutos até 25 minutos do sensor em operação. Eixo vertical: 1 V/div (equivalente a 2.0 kV/div). Eixo horizontal: 10 ms/div.

A Figura 7.16 mostra o λ_B do sensor no início do ensaio (1536.21 nm) e após o término (1536.39nm), mostrando que o λ_B variou 0.18 nm em 25 minutos durante a operação. Isto representa dizer que a sensibilidade térmica do sensor FBG-PZT permaneceu inalterada durante o experimento a despeito do aquecimento das cerâmicas PZT. Conseqüentemente comprova-se que o ponto ótimo de demodulação permaneceu inalterado. Pequenos ajustes no sistema podem ser realizados usando a proposta de compensação com o filtro sintonizável FBG-F em conjunto com a proposta mecânica.

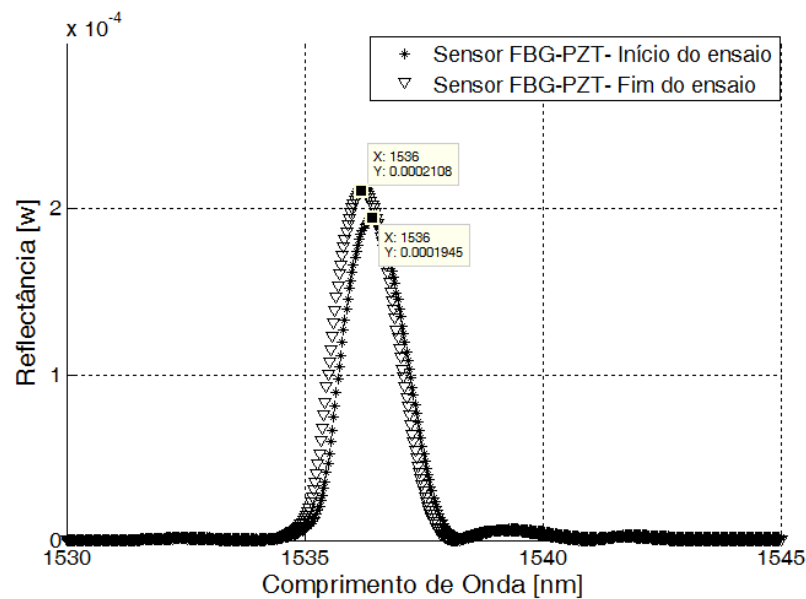
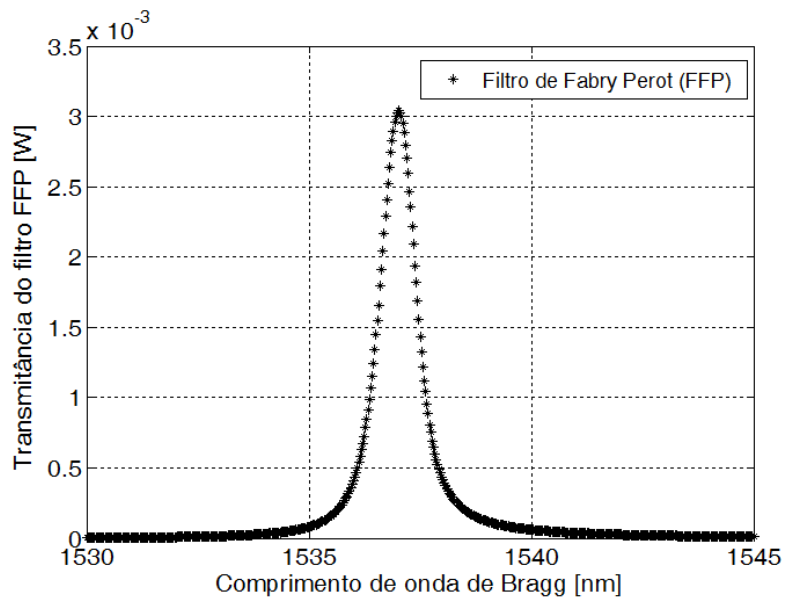


Figura 7.16: Curva espectral do λ_B do sensor FBG-PZT no início do ensaio e após o término.

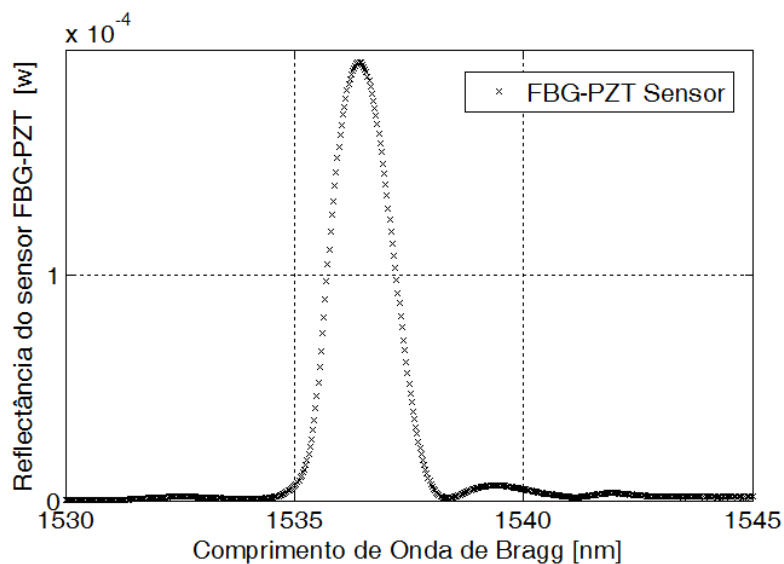
7.3.2: Resposta da tensão de saída CA do sensor FBG-PZT com compensação de temperatura e demodulado com o filtro de Fabry-Perot (FFP).

Neste ensaio, o sensor foi conectado ao esquema de demodulação usando o FFP. A Figura 7.17 mostra a curva espectral da FBG-S (FBG-PZT) com o FFP. O ponto de máxima sensibilidade entre os espectros foi obtido usando o algoritmo apresentado no Capítulo 6. Para uma faixa relativamente pequena de estímulo em torno do ponto de operação, a interação espectral entre o filtro FFP e a FBG-PZT pode ser otimizada. A curva espectral para as duas técnicas de demodulação (FFP) e (FBG-F) são mostradas na Figura 7.17, onde a FBG-S (FBG-PZT) está em estado de repouso após a sintonia do λ_B . O eixo vertical do gráfico mostra respectivamente, a reflectância relativa da FBG-PZT e a transmitância relativa do filtro FFP, cujos valores

são: $\lambda_{B(\text{FFP})}=1537.02 \text{ nm}$ e $\lambda_{B(\text{FBG-PZT})}=1536.42 \text{ nm}$, ambos em @25°C.



(a)



(b)

Figura 7.17: Curva espectral a) Filtro Fabry-Perot [$F_{\text{FFP}}(\lambda)$] e b) FBG Sensora [$F_{\text{FBG-PZT}}(\lambda)$]

A convolução numérica entre o FBG-PZT e o FFP é realizada a fim de se obter a máxima sensibilidade. Portanto, no gráfico da Figura 7.18 mostra-se o resultado da convolução como função do deslocamento do λ_B a partir do ponto de referência.

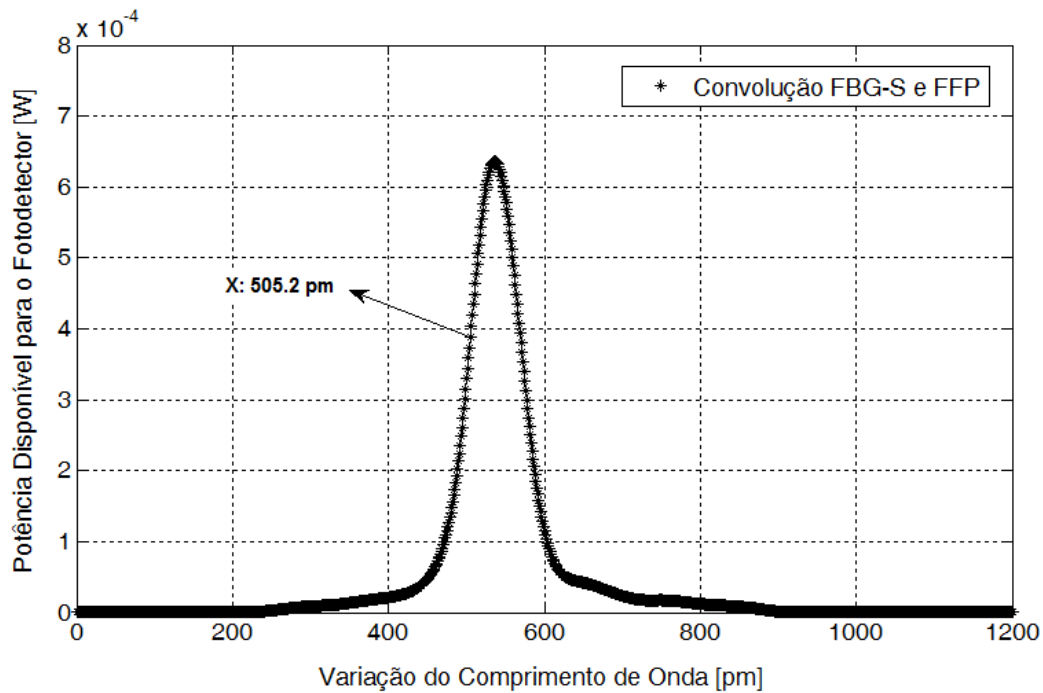


Figura 7.18: Curva da convolução entre (a) Filtro Fabry-Perot [$F_{FFP}(\lambda)$] e a FBG Sensora [$F_{FBG-PZT}(\lambda)$].

Em seguida, a derivada da curva de convolução é calculada e plotada na Figura 7.19 mostrando o ponto de derivada máxima. O máximo na curva representa a quantidade de deslocamento no λ_B necessária para obter a sensibilidade ótima isto é, o ajuste ideal do filtro no ponto ótimo de demodulação. Finalmente, o FFP é sintonizado aplicando uma tensão a fim de que a condição de repouso corresponda a quantidade de deslocamento exigido para que o comprimento de onda do filtro corresponda ao espectro de reflexão da FBG. Na Figura 7.19 a sensibilidade é máxima quando o λ_B do filtro está localizado em 505.2 pm à direita portanto da frequência central da FBG.

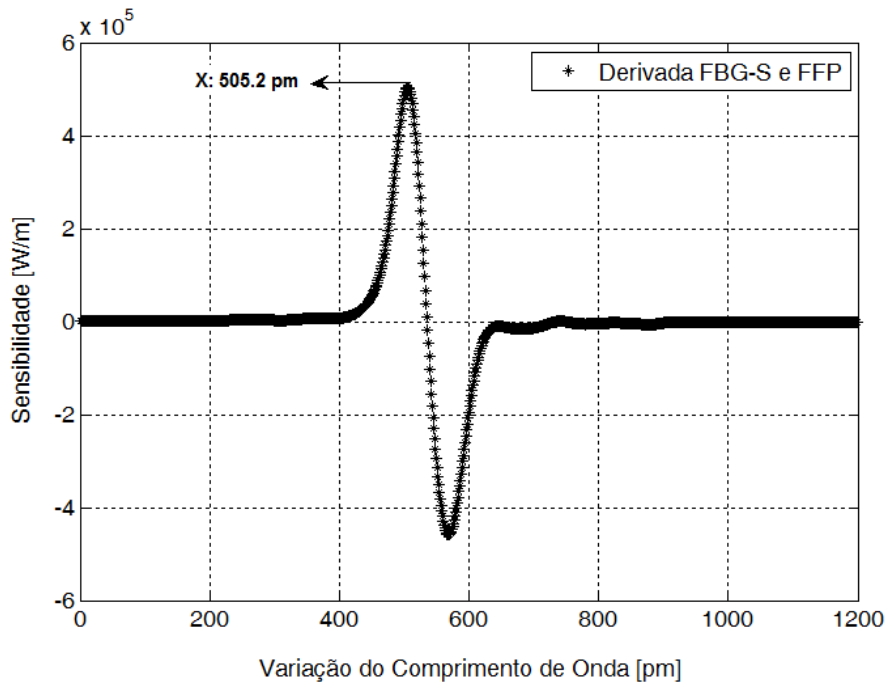


Figura 7.19: A derivada da convolução entre o Filtro Fabry-Perot [$F_{FFP}(\lambda)$] e a FBG Sensora [$F_{FBG-PZT}(\lambda)$].

A figura 7.20 mostra a resposta dinâmica da tensão de saída do sensor FBG-PZT quando uma tensão de 2 kV é aplicada aos terminais usando o FFP para a demodulação do sensor. São apresentadas nas figuras as respostas do sensor FBG-PZT compensado termicamente para uma tensão CA aplicada de 2 kV, obtidas a partir da tela do osciloscópio. As capturas da tela do osciloscópio foram registradas no início do experimento e em seguida em intervalos de 5 minutos até alcançar 25 minutos que em operação ininterrupta. É possível observar que o valor máximo da tensão na saída do sensor permaneceu inalterado com o incremento da temperatura no ambiente de medidas do sensor. Com isto garante-se que o ponto ótimo de demodulação permaneceu inalterado, comprovando que a técnica de sintonia térmica proposta foi bem sucedida.

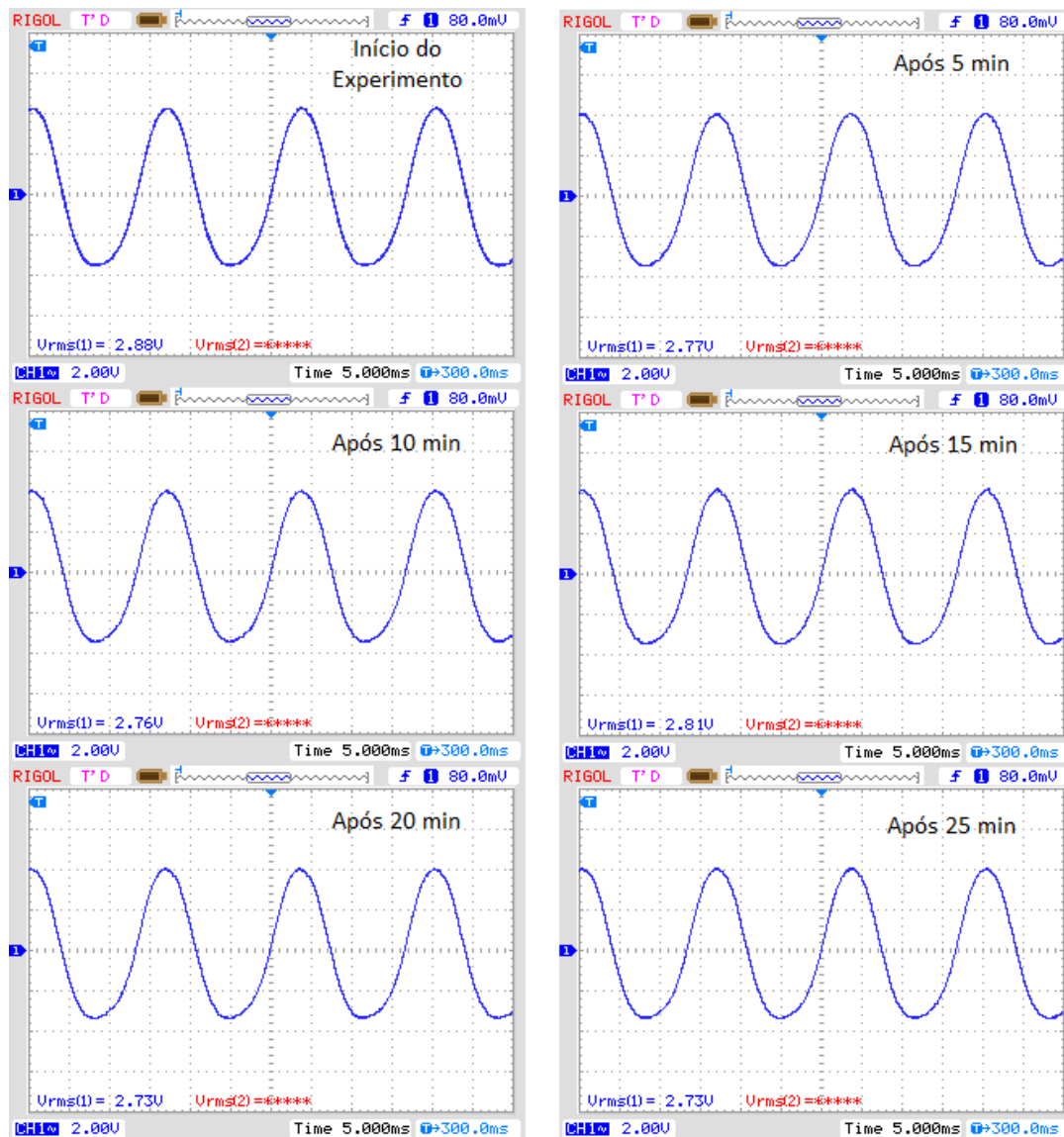


Figura 7.20: Formas de onda do sensor FBG-PZT na saída do sistema de demodulação usando o FFP submetido à tensão CA de 2 kV no início do experimento e após intervalos de 5 minutos até 25 minutos do sensor em operação. Eixo vertical: 2 V/div (equivalente a 2.0 kV/div). Eixo horizontal: 5 ms/div.

7.4 Resposta do sensor FBG-PZT com sintonia através do módulo termoeletrônico (MTE)

Para avaliar a eficiência do sistema de controle do filtro FBG-F sintonizável pelo MTE, foi desenvolvida a montagem experimental da Figura 7.21, onde a FBG filtro ou o FFP é substituído pela proposta apresentada no Capítulo 6. O sensor FBG-PZT foi submetido à tensão CA e o λ_B do filtro FBG-F foi posicionado, através do MTE (módulo termoeletrônico) no ponto para a demodulação do sensor. Usando o sistema de

controle manual desenvolvido no Capítulo 6, a sintonia do λ_B do filtro FBG-F é realizada impondo manualmente as variações na temperatura por meio do MTE.

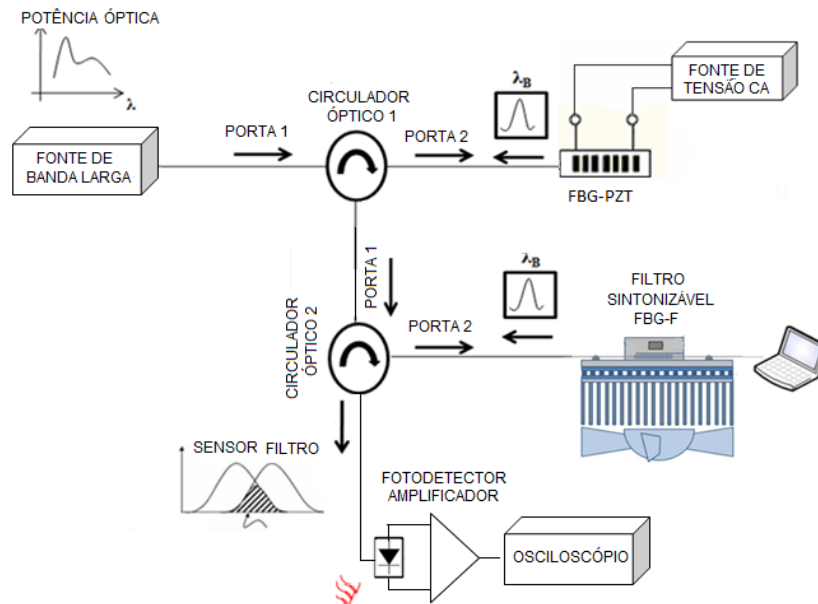


Figura 7.21: Diagrama esquemático do *set up* para os ensaios com tensão CA usando o filtro FBG-F.

A Figura 7.22 mostra o sinal CA na saída do fotodetector, assim com o controle automático de temperatura, será possível fazer o λ_B do filtro FBG-F acompanhar a translação do λ_B da FBG sensora (FBG-PZT), permitindo que o cruzamento entre os espectros da Figura 6.19 permaneça estável, sempre no mesmo ponto.

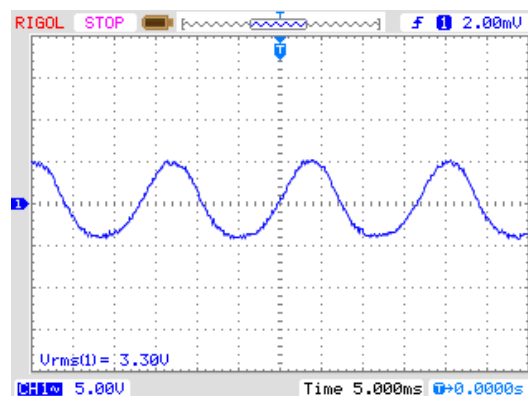


Figura 7.22: Resposta do sensor FBG-PZT submetido à tensão CA usando o filtro FBG-F construído.

O sistema apresentado poderá ser usado em projetos futuros funcionando como um controle automático de temperatura, para sintonizar o λ_B do filtro no filtro FBG-F no ponto ótimo de operação, de acordo com as variações na temperatura

sofridas pelo sensor FBG-PZT. Como o sensor está submetido à alta tensão, não é possível usar um sensor convencional para medir a temperatura, em função disto, será usada uma FBG para acompanhar as variações térmicas submetidas ao sensor. O sinal óptico oriundo da FBG de referência será convertido em elétrico usando um esquema de demodulação capaz de converter as variações no λ_B em função da temperatura em um sinal elétrico usando um fotodetector. Desta maneira, o sinal de referência estará pronto para ser introduzido no canal AD do DSP.

Capítulo 8

8 Conclusões e trabalhos futuros

Nesta tese foi apresentado o projeto e a construção de um sensor óptico-elétrico, onde foram aplicadas técnicas de compensação da temperatura. O sensor híbrido FBG-PZT, baseado na tecnologia de redes de Bragg (FBG) e das cerâmicas PZT, foi projetado e construído com a finalidade de supervisionar, avaliar e monitorar o desempenho das linhas de transmissão. O sistema sensor que será utilizado como o núcleo de um TPO da classe de 13.8 kV, usa um cristal PZT atuando como um transdutor de tensão e uma FBG como sensor de deslocamento, em função de uma tensão CC ou CA aplicada aos terminais do sensor.

Quando o sensor está sujeito às variações de temperatura, em virtude da dissipação das cerâmicas PZT, a curva espectral da reflectância do sensor desloca-se fazendo com que o ponto de operação mova-se através da curva de convolução e alcance uma região não linear diminuindo o ganho do sensor. Para solucionar o problema, propostas de compensação de temperatura foram implementadas e desenvolvidas nesta tese.

A primeira proposta de compensação térmica do sensor FBG-PZT discutida nesta tese sugere um compensador passivo do deslocamento do λ_B usando a própria estrutura do sensor. Desta maneira, pela primeira vez é apresentada uma proposta de compensação térmica mecânica e passiva de um sensor óptico-elétrico para medidas de tensão, usando a tecnologia FBG em conjunto com as características de uma cerâmica piezoelétrica. A compensação térmica foi realizada, combinando materiais de diferentes coeficientes de dilatação térmica e ajustando seu comprimento diretamente no sensor, a partir de cálculos teóricos realizados. Esta proposta de compensação torna-se vantajosa e permite sua aplicação em projetos práticos, pois os materiais usados são de baixo custo no mercado, além da implementação da proposta levar em conta requisitos como a fácil e rápida usinagem da peça no material escolhido e a aquisição do material no mercado.

Na segunda proposta discutida neste trabalho foi construído um compensador dinâmico usando um filtro FBG sintonizável, que funciona como um compensador térmico sintonizável do λ_B do sensor FBG-PZT. Esta proposta pode ser usada em conjunto com a proposta anterior de compensação mecânica, para corrigir pequenos desvios no cálculo do compensador mecânico, como também pode ser usado para

sintonizar uma FBG filtro no processo de demodulação usando redes gêmeas. As vantagens na proposta de compensação térmica usando o filtro FBG-F proposto são, a facilidade da implementação e o baixo custo com os materiais envolvidos na construção do sistema. Além disso, é uma construção compacta e uma proposta versátil, já que a aplicação contempla a compensação térmica de outros sistemas usando sensores FBG. Os resultados com o sensor em alta tensão, mostraram que o valor máximo da tensão na saída do sensor permaneceu inalterado com o incremento da temperatura no ambiente de medidas do sensor usando a compensação de temperatura no sensor compensado mecanicamente. Um estudo sobre a sensibilidade da tensão de saída do sensor é realizado a partir da comparação entre a demodulação do sistema sensor usando um filtro de Fabry-Perot e com uma rede gêmea (FBG-F).

Algumas propostas de trabalhos futuros destacam o aperfeiçoamento do protótipo mecânico do sensor usando cerâmicas com maior diâmetro interno. O uso nesta tese de cerâmicas com furo de 10 mm de diâmetro dificultou o posicionamento da FBG e a injeção do óleo isolante na estrutura interna do sensor. O uso de uma nova cerâmica permite a reformulação de toda a estrutura, incluindo a substituição dos eletrodos de latão por uma estrutura única e o posicionamento dos parafusos pelo lado de fora.

Na proposta de desenvolvimento do filtro sintonizável FBG-F são inúmeras as propostas de trabalhos futuros, entre os quais podemos destacar o desenvolvimento de um sistema de compensação de temperatura automático e em tempo real com as medidas de tensão usando uma FBG livre e insensível às variações de tensão e sensível apenas às variações de temperatura no ambiente de medidas do sensor. Ao sofrer as variações na temperatura, esta FBG, insensível ao strain funcionará como uma temperatura de referência, que, por meio da configuração de um canal AD no DSP, será capaz de acompanhar as variações térmicas impostas ao sensor FBG-PZT, corrigindo os desvios no seu λ_B e promovendo a sintonia do λ_B do filtro FBG-F na posição do ajuste ótimo, determinada pelo algoritmo demonstrado no Capítulo 5. Para a sintonia automática do filtro FBG-F usando a FBG de referência, é necessário o desenvolvimento de um projeto para a conversão do sinal de referência na placa DSP. Espera-se que com a implementação do filtro, seja possível estabilizar o processo de demodulação, conseguindo sintonizar automaticamente o filtro FBG-F de acordo com as variações térmicas no λ_B do sensor FBG-PZT.

Na parte do projeto elétrico, destaca-se a necessidade de se desenvolver um divisor capacitivo para reduzir a tensão de entrada no sensor para os níveis aceitáveis

da cerâmica PZT, a fim de validar os resultados do sensor em linhas de transmissão e distribuição de 13.8 kV.

Referências Bibliográficas

AL-ALAOUI, M. A., "Discretization methods of fractional parallel PID controllers". *16th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems*, 327-330, Yasmine Hammamet, Tunísia, 13-16, Dez. 2009.

ALAVIE, A T., MAASKANT R., STUBBE R., et al., "Characteristics of fiber grating sensors and their relation to manufacturing techniques". **SPIE** v. 2444, pp. 528–535.

ALLIL, R. C. DA S. B., WERNECK, M. M., Optical High-Voltage Sensor Based on Fiber Bragg Grating and PZT Piezoelectric Ceramics, **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement** v. 60, n. 6, pp. 2118–2125, Jun. 2011.

ALLIL, R. C. S. B. WERNECK M. M., RIBEIRO, B., NAZARÉ, F. V. B., **Application of Fiber Bragg Grating Sensors in Power Industry**, InTech, 2013.

ANNAMDAS, V. G. M. Review on Developments in Fiber Optical Sensors and Applications. **International Journal of Materials Engineering** v. 1, n. 1, pp. 1–16, Ago. 2012.

ANTUNES, P., LIMA H., VARUM H., ANDRE P., "Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: Abode wall case study", **Measurement** v. 45, n. 7, pp. 1695–1705, ago. 2012.

ASTROM, K. J., WITTENMARK K., **Computer-Controlled Systems: Theory and Design**, 3 ed. Prentice Hall, 1996.

ATCP do Brasil Soluções Piezoelétrica, "Materiais piezoelétricos", ATCP do Brasil Soluções Piezoelétricas, São Carlos, 2004.

CHAVEZ, P. P., RAHMATIAN, F., JAEGER, N. A. F, "230 kV Optical Voltage Transducer Using a Distributed Optical Electric Field Sensor System". *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 131 - 135, Atlanta, Out. 2001.

CHEN, S.-H., LIN, J., "The formation of micro/nanoparticles in laser-enhanced electroplating with continuous-wave and pulsed Nd-YAG laser interactions", **Optics & Laser Technology** v. 44, n. 1, pp. 169–176, Fev. 2012.

DAVIS, C., TEJEDOR, S., GRABOVAC, I., KOPCZYK, J., "High-strain fiber bragg gratings for structural fatigue testing of military aircraft", **Photonic Sensors** v. 2, n. 3, pp. 215–224, Jul. 2012.

DE NAZARE, F. V. B., WERNECK, M. M., "Hybrid Optoelectronic Sensor for Current and Temperature Monitoring in Overhead Transmission Lines", **IEEE Sensors Journal** v. 12, n. 5, p. 1193–1194, Maio 2012.

DE NAZARE, F. V. B., WERNECK, M. M., "Towards a hybrid current monitoring system: Nickel and GMM comparison as magnetostrictive transducers". *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Mineápolis, USA, 6-9 Maio 2013.

DZIUDA, L., SKIBNIEWSKI, F. W., KREJ, M., LEWANDOWSKI, J., "Monitoring respiration and cardiac activity using fiber Bragg grating-based sensor", **IEEE transactions on bio-medical engineering** v. 59, n. 7, pp. 1934–42, Jul. 2012.

FENG, Y., ZHANG, H., LI, Y. L., PENG, G., "Highly Sensitive Ni-Cu Duplex Metal Coated Fiber Bragg Grating Temperature Sensor". *Symposium on Photonics and Optoelectronics*, 1-4, Wuhan, China, 14-16 Aug. 2009.

FENG, Y., ZHANG, H., LI, Y. L., RAO, C-L, "Temperature Sensing of Metal-Coated Fiber Bragg Grating", **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics** v. 15, n. 4, pp. 511–519, Ago. 2010.

FISHER, N. E., HENDERSON, P. J., JACKSON, D. A., "The interrogation of a conventional current transformer using an in-fibre Bragg grating", **Measurement Science and Technology** v. 8, n. 10, p. 1080–1084, Out. 1997.

HABEL, W. R., INGOLF B., FRANCIS B., KRYSZTOF B., "Guidelines for the characterization and use of fibre optic sensors: basic definitions and a proposed standard for FBG-based strain sensors". *20th International Conference on Optical Fibre Sensors*

HABISREUTHER, T., HAILEMICHAEL, E., ECKE, W., et al., "ORMOCER Coated Fiber-Optic Bragg Grating Sensors at Cryogenic Temperatures", **IEEE Sensors Journal** v. 12, n. 1, pp. 13–16, Jan. 2012.

HALLIDAY, R., W., **Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas, Termodinâmica Vol. 2**. 6. ed. Brasil, LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

HATTA, A., FARRELL, G., HATTA, A. M., SEMENOVA, Y., et al., "A voltage sensor based on a Singlemode- Multimode-Singlemode fiber structure". *School of Electronic and Communications Engineering*, v. 52, n. 8, pp. 1887–1890, Dublin Institute of Technology, Jan. 2010.

HENKEL, Folha de Dados Técnicos. Disponível em <http://brafix.com.br/pdfs/416.PDF>. Acesso em: 28 jul. 2015, 15:12:00.

HENKEL, D. P., "Thermal spray and adhesive bonding of optical fibres to high-temperature composite materials", **Advanced Materials for Optics and Electronics** v. 4, n. 5, p. 327–335, Set. 1994.

HILL, K. O., MELTZ, G., "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview", **Journal of Lightwave Technology** v. 15, n. 8, pp. 1263–1276, Ago. 1997.

HSU, Y. S., CHIANG, Y. J., "Temperature Compensation of Optical Fiber Bragg Grating Pressure Sensor", **IEEE Photonics Technology Letters** v. 18, n. 7, pp. 874–876, Abril 2006.

HU, T., LV, Z., ZHAO, Y., ZHANG, X., "Fiber Bragg grating sensor with a simple demodulation method". *Symposium on Photonics and Optoelectronics*, pp. 1–4, 14-16 Ago. 2009.

HUANG, J., ZHOU, Z., WEN, X., et al., "A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation", **Measurement** v. 46, n. 3, pp. 1041–1046, Abr. 2013.

Instrument Transformers-Part 5-Capacitor Voltage Transformers, IEC Standard 60044-5, 2004.

JAEGER, N. A. F., RAHMATIAN, F., "Integrated Optics Pockels Cell High-Voltage Sensor", **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 1, pp. 127-134, Jan. 1995

JAMES, S. W., DOCKNEY, M. L., TATAM, R. P., "Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors", **Electronics Letters** v. 32, n. 12, pp. 1133, Jun. 1996.

KAMIKAWACHI, R. C., 2007, Dispositivos sensores em fibra para uso em refratometria. Tese de D.sc., UTFP, Curitiba, Brasil

KATHURIA, Y. P., UCHIDA, Y., "Pulsed Nd-YAG laser deposition of TiN and TiAlN coating", **Physics Procedia** v. 12, pp. 506–511, Jan. 2011.

KERSEY, A. D., BERKOFF, T. A., MOREY, W. W., "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry - Perot wavelength filter", **Optics letters** v. 18, n. 16, pp. 1370, Ago. 1993.

KERSEY, A. D., DAVIS, M. A., PATRICK, H. J., LEBLANC, M., et al., "Fiber Grating Sensors", **Journal of Lighthwave Technology** v. 15, n. 8, pp. 1442–1463, Ago. 1997.

LAGAKOS, N., BUCARO, J. A., JARZYNSKI, J., "Temperature-induced optical phase shifts in fibers", **Applied optics** v. 20, n. 13, pp. 2305–2308, Jul. 1981.

LATHI, B. P., "Signal Analysis", *Communication Systems*, chap. 1, New York, USA, John Wiley & Sons, Inc, 1968.

LAWRENCE, C. M., NELSON, D. V., UDD, E., "A fiber optic sensor for transverse strain measurement", **Experimental Mechanics** v. 39, n. 3, pp. 202–209, Set. 1999.

LEWIS, G. K.; MA, A., United States Patent, Piezocomposite Ultrasound Array and integrated circuit assembly with improved thermal expansion and acoustical crosstalk characteristics, 2004.

LI, K., HUA, Z., YAN, F. GANG, F., "A high sensitive fiber Bragg grating strain sensor with automatic temperature compensation", **Chinese Optics Letters** v. 7, n. 3, pp. 191–193, Março 2009.

LI, Y. HUA, Z., YAN, F., GANG, P., "Metal coating of fiber Bragg grating and the temperature sensing character after metallization". **Optical Fiber Technology** v. 15, n. 4, pp. 391–397, Ago. 2009.

LIN, S. I.-E., "Temperature-compensating device with central-wavelength tuning for optical fiber gratings", **Optical Engineering**, v. 40, n. 5, pp. 698-702, Maio 2001.

LINDNER, E. CHOJETZKI, C., MORBITZ, J., BRUCKNER, S., BECKER, M., "Regenerated single pulse fiber Bragg gratings for high temperature sensing". 3rd Asia Pacific Optical Sensors Conference , v. 8351, Sidnei, Austrália, Jan. 2012

LO, Y., KUO, C., "Packaging a fiber bragg grating with metal coating for an athermal design", **Journal of Lightwave Technology** v. 21, n. 5, pp. 1377–1383, maio 2003.

LUPI, C. FELLI, F., IPPOLITI, L., CAPONERO, M., CIOTTI, M., et al., "Metal coating for enhancing the sensitivity of fibre Bragg grating sensors at cryogenic temperature", **Smart Materials and Structures** v. 14, n. 6, pp. 71–76, Dez. 2005.

MAFUNÉ, F., KOHNO, J.-Y., TAKEDA, Y., KONDOW, T., "Formation and Size Control of Silver Nanoparticles by Laser Ablation in Aqueous Solution", **The Journal of Physical Chemistry B** v. 104, n. 39, pp. 9111–9117, Out. 2000.

MELTZ G. e MOREY W. W, Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity, *International Workshop on Photoinduced Self-Organization Effects in Optical Fiber*, SPIE, Vol. 1516, 1991.

MINAKUCHI, S., UHIRA, K., TERADA, Y., TAKEDA, N., et al., "Fiber-Optic-Based Pressure and Residual Strain Monitoring in CFRP Bonding Process: Toward Realization of Secondary Bonding in CFRP Aircraft Structures", *7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, La Cité, Nantes, França, 8-11 July, 2014.

MORGAN, Typical PZT Properties. Disponível em: <<http://www.morganelectroceramics.com/resources/piezo-ceramic-tutorials/typical-properties/>>. Acesso em: 11 ago. 2014.

MÜLLER, M. S. HOFFMANN, L., LAUTENSCHLAGER, T., KOCH, A., "Soldering fiber Bragg grating sensors for strain measurement", *19th International Conference on Optical Fibre Sensors*, **SPIE**, v. 7004, pp. 1-4,

NIEWCZAS, P. DZIUDA, L., FUSIEK, G., McDONALD, J., "Design and Evaluation of a Preprototype Hybrid Fiber-Optic Voltage Sensor for a Remotely Interrogated Condition Monitoring System". **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement** v. 54, n. 4, pp. 1560–1564, Ago. 2005.

NIEWCZAS, P., DZIUDA, L., FUSIEK, G. McDONALD, J. R., "Temperature Compensation for a Piezoelectric Fiber-Optic Voltage Sensor", *Instrumentation and Measurement Technology Conference Sorrento*, 1994–1998, Sorrento, Itália, 24-27 Abril, 2006.

NIEWCZAS, P., MCDONALD, J. R.. "Advanced Optical Sensors for Power and Energy Systems Applications", **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine** v. 10, n. 1, pp. 18–28, Fev. 2007.

NING, Y. N., CHU, B. C. B., JACKSON, D. A., "Interrogation of a conventional current transformer by a fiber-optic interferometer", **Optic Letters** v. 16, n. 18, pp. 1448–1450, Set. 1991.

OTHONOS A., KALLI, K., **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**, Boston, Artech House, 1999.

PACHECO, M., SANTOYO, F. M., ZENTENO, L., et al. "Piezoelectric-modulated optical fibre Bragg grating high-voltage sensor", **Measurement Science and Technology** v. 10, n. 9, pp. 777–782, 1999.

POONDI, D., DOBBINS, T., SINGH, J., "A novel laser-liquid-solid interaction technique for synthesis of silver, nickel and immiscible silver-nickel alloys from liquid precursors", **Journal of Materials Science** v. 35, n. 24, pp. 6237–6243, Dez. 2000.

PRAKKI, A., CARVALHO, R. M. D. E., "Cimentos resinosos dual : características e considerações clínicas", **Pós-Grad Rev Fac Odontol São José dos Campos**, v.4, n.1, pp. 21–26, Jan/Abr 2001.

PWS4205, PWS4305, PWS4323, PWS4602, and PWS4721 Linear DC Power Supplies Programmer Manual. Disponível em: http://www.testequipmentdepot.com/tektronix/pdf/pws4000_manu.pdf. Acesso em: 28 jul. 2015, 15:15:00

RAHMATIAN, F., CHAVEZ, P. P., "SF 6 -Free 550 kV Combined Optical Voltage and Current Transducer System". *Transmission and Distribution Conference and Exposition* v. 1, pp. 379 - 382, 7-12 Set. 2003

RAHMATIAN, F., CHAVEZ, P. P., JAEGER, N. A. F., Resistively Shielded Optical Voltage Transducer. *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2–7, Atlanta, USA, 28- Out. 2001-02 Nov 2001

RIBEIRO, B. A., WERNECK M. M., REZENDE, D. C. J., "Metallization of FBG by laser ablation for a voltage transducer", *22nd Plastic Optical Fiber Conference*, Búzios, Rio de Janeiro, 11-13 Set., 2013

RIBEIRO, B., WERNECK, M. M., "FBG-PZT sensor system for high voltage measurements", *2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1-6, Hangzhou, China, 10-12 maio 2011.

RIBEIRO, B., 2011, *Transformador de potencial óptico baseado em FBG-PZT com demodulação por redes gêmeas e filtro de Fabry-Perot*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RIBEIRO, B., WERNECK, M. M., DA SILVA-NETO, J. L., "Novel Optimization Algorithm to Demodulate a PZT-FBG Sensor in AC High Voltage Measurements", **IEEE Sensors Journal** v. 13, n. 4, pp. 1259–1264, Abr. 2013.

ROSSIGNOL, F., NAKATA, Y., NAGAI, H. et al., "New Synthesis Method of Poly(diphenylsilylenemethylene) Thin Films", **Chemistry of Materials** v. 10, n. 8, pp. 2047–2049, Ago. 1998.

SABAT, R. G. REN, W., YANG, G., MUKHERJEE, B. K., "Temperature Dependence of the Dielectric, Elastic and Piezoelectric Material Coefficients of Soft and Hard Lead Zirconate Titanate (PZT) Ceramics", *IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric*, 612 - 615, Nara, Japão, 27-31 May 2007.

SALERNO, D., "Ultralow Voltage Energy Harvester Uses Thermoelectric Generator for Battery-Free Wireless Sensors", **Journal of Analog Innovation** v. 20, n. 3, pp. 2–11, Out. 2010.

SAWA, T. KUROSAWA, K., KAMINISHI, T., YOKOTA, T., "Development of optical instrument transformers". **IEEE Transactions on Power Delivery** v. 5, n. 2, pp. 884–891, Abr. 1990.

SEKAR, R., SHIVANAJU, B.N., LAKSHMI, K. P., ASOKAN, S., et al. "Dual functional performance of fiber Bragg gratings coated with metals using flash evaporation technique", **Optical Fiber Technology** v. 18, n. 4, pp. 183–185, Jul. 2012.

SHERRIT, S., YANG, G., WIEDERICK, H. D., et al. "Temperature Dependence of the Dielectric, Elastic and Piezoelectric Material Constants of Lead Zirconate Titanate Ceramics". 1999.

SIBBALD, M. S., CHUMANOV, G., COTTON, T. M., "Reduction of Cytochrome c by Halide-Modified, Laser-Ablated Silver Colloids", **The Journal of Physical Chemistry** v. 100, n. 11, pp. 4672–4678, Jan. 1996.

SOMAN, J., O'NEAL, C. B., "Fabrication and Testing of a PZT Strain Sensor for Soil Applications", **IEEE Sensors Journal** v. 11, n. 1, pp. 78–85, Jan. 2011.

SONG, M., LEE, S. B., CHOI, S. S., LEE, B., "Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using Two Fiber Bragg Gratings Embedded in a Glass Tube", **Optical Fiber Technology** v. 3, n. 2, p. 194–196, Abr. 1997.

SONG, R. G., YAMAGUCHI, M. NISHIMURA, O., SUZUKI, M., "Investigation of metal nanoparticles produced by laser ablation and their catalytic activity". **Applied Surface Science** v. 253, n. 6, pp. 3093–3097, Jan. 2007.

TIAN, X., CHENG, Y., "The investigation of FBG sensor system for the transmission line icing measurement". *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 154–157, Chongqing, China, 9-12 Nov. 2008

TSAI, H. H., JANG, W. Y., YEH, F. F., "Central wavelength tunable mechanism for temperature compensated package of fiber BRAGG gratings", **IEEE Transactions on Advanced Packaging** v. 24, n. 1, pp. 86–90, Fev. 2001.

WERNECK, M. M., ALLIL, R. C. S. B., RIBEIRO, B. A., NAZARÉ, F. V. B., "**A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors**", INTECH OPEN, Capítulo 1, pp. 1–24, 2013.

WOLFGANG R. H., INGOLF B., FRANCIS, K. B. "Guidelines for the characterization and use of fibre optic sensors - Basic definitions & a proposed standard for FBG-based strain sensors". *20th International Conference on Optical Fibre Sensors*, v. 7503, 1-4, jul. 2009.

XIE, J.-F., ZHANG, H., ZHU, Z., et al., "A study of the temperature sensitivity of fiber Bragg gratings after metallization", **Smart Materials and Structures**, v. 16, n. 5, pp. 1837–1842, Oct. 2007.

YANLIANG, D. Y. DU, JIANZHI, L. J. L., CHENXI, L. C. L., "A Novel Fiber Bragg Grating Temperature Compensated Strain Sensor". *First International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, 569–572, Wuhan, China, 1-3 Nov. 2008

YIN, S., RUFFIN, P. B., YU, F. T. S., **Fiber Optic Sensors**. 2 ed New York: Taylor & Francis Group, 2008.

YOFFE, G. W. KRUG, P. A., OUELLETE, F., THORNCRAFT, D. A., "Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings", **Applied optics**, v. 34, n. 30, pp. 6859–61, Oct. 1995.

YU-LUNG, L., HAN-SHENG, C., "Measurement of thermal expansion coefficients using an in-fibre Bragg-grating sensor", **Measurement Science and Technology** v. 9, n. 9, pp. 1543–1547, 1999.

ZHAN, Y., YU. M., PEI, J., YANH, X., "A linearity interrogation technique with enlarged dynamic range for fiber Bragg grating sensing", **Optics Communications** v. 283, n. 18, pp. 3428–3433, 2010.

ZU, W., GU, X., "Fast fiber-optic tunable filter based on axial compression on a fiber Bragg grating", **Applied Optics** v. 45, n. 25, pp. 6457, Sep. 2006.

ANEXOS

```
// Controle de Temperatura do Peltier

#include "DSP28x_Project.h" // Device Headerfile and Examples Include File

#include <math.h>

#include "comunicacoes.h"
#include <stdio.h>

#define DSP_CLOCK 150000000

#define FREQ_AMOSTRAGEM 10000

#define FATOR_CONVERSAO 0.000732421875

#define pi 4.0*atan(1.0)

#define N 550

#define NUM_CONTADOR FREQ_AMOSTRAGEM/N

#define EPWM1_TIMER_TBPRD DSP_CLOCK/(2*FREQ_AMOSTRAGEM)
#define EPWM1_MAX_CMPA EPWM1_TIMER_TBPRD
#define EPWM1_MIN_CMPA EPWM1_TIMER_TBPRD*0.0

#define EPWM2_TIMER_TBPRD DSP_CLOCK/(2*FREQ_AMOSTRAGEM)
#define EPWM2_MAX_CMPA EPWM1_TIMER_TBPRD
#define EPWM2_MIN_CMPA EPWM1_TIMER_TBPRD*.0

void InitEPwm1Example(void);
```

```
void InitEPwm2Example(void);
```

```
typedef struct
```

```
{
```

```
volatile struct EPWM_REGS *EPwmRegHandle;
```

```
    Uint16 EPwm_CMPA_Direction;
```

```
    Uint16 EPwm_CMPB_Direction;
```

```
    Uint16 EPwmTimerIntCount;
```

```
    Uint16 EPwmMaxCMPA;
```

```
    Uint16 EPwmMinCMPA;
```

```
    Uint16 EPwmMaxCMPB;
```

```
    Uint16 EPwmMinCMPB;
```

```
}EPWM_INFO;
```

```
EPWM_INFO epwm1_info;
```

```
EPWM_INFO epwm2_info;
```

```
// Prototype statements for functions found within this file.
```

```
interrupt void adc_isr(void);
```

```
float temperatura,
```

```
    corrente,
```

```
    temperatura_ref,
```

```
    media_temp=0,
```

```
    media_cor=0,
```

```
    media_temp_ref=0,
```

```
avgcoeff = 0,
```

```
    t_ad,
```

```
    i_ad,
```

```
tref_ad,
```

```
    tpeltier,
```

```

    i,
    //tref, //descomentar qdo usar referencia externa
et=0,
    et_ant=0,
    tref_ant=0,
D=0,
D1=0,
D2=0,
D3=0,
D2_ant=0,
D_ant=0,
chavear = 1;

//Peltier grande
float Kp=0.15, //Ganhos do PI do controle de corrente
    Ki=0.05,
    Td=0.15;

//Peltier pequeno
/*float Kp=0.2,
    Ki=0.006;*/

const float tref=30, // Temperatura de referência gerada interna no DSP
T=1.0/FREQ_AMOSTRAGEM;

main()

{

InitSysCtrl();

avgcoeff = exp( -1.0 / (FREQ_AMOSTRAGEM * 0.1));

EALLOW;

```

```
#define ADC_MODCLK 0x3 // HSPCLK = SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2 =  
150/(2*3) = 25.0 MHz
```

```
EDIS;
```

```
reiniciar_comunicacoes(); // PARA COMUNICAÇÃO SERIAL  
configurar_comunicacoes();
```

```
EALLOW;
```

```
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO21 = 0; // Enable pullup on GPIO2  
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO21 = 0; // configure Port as Input/Output  
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO21 = 1; // configure port as Output  
//GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO21 = 1; // Coloca porta em nivel alto  
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO21 = 1; // Coloca porta em nivel baixo
```

```
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO4 = 0; // Enable pullup on GPIO2  
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 0; // configure Port as Input/Output  
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO4 = 1; // configure port as Output  
//GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO4 = 1; // Coloca porta em nivel alto  
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO4 = 1; // Coloca porta em nivel baixo
```

```
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO27 = 0; // Enable pullup on GPIO2  
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO27 = 0; // configure Port as Input/Output  
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO27 = 1; // configure port as Output  
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO27 = 1; // Coloca porta em nivel alto
```

```
EDIS;
```

```
// Configurar Portas GPIO para PWM
```

```
InitEPwm1Gpio();
```

```
InitEPwm2Gpio();
```

```
DINT;
```

```

InitPieCtrl();

// Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
IER = 0x0000;
IFR = 0x0000;

InitPieVectTable();

EALLOW; // This is needed to write to EALLOW protected register
PieVectTable.SEQ1INT      = &adc_isr;
PieVectTable.SCIRXINTA    = &interrupcao_serial;

// Desabilita periferico ePWM para configuracao
SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 0;

EDIS; // This is needed to disable write to EALLOW protected registers

InitEPwm1Example();
InitEPwm2Example();

EALLOW;
SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1;

EDIS;

// Enable ADCINT in PIE
PieCtrlRegs.PIECTRL.bit.ENPIE = 0x1;           // Ativar bloco PIE.
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx1 = 0x1;           // Ativar INT1.1 (SEQ1INT).
PieCtrlRegs.PIEIER9.bit.INTx1 = 0x1;           // Ativar INT9.1
(SCIRXINTA).
IER              = 0x101;

EINT;           // Enable Global interrupt INTM
ERTM;           // Enable Global realtime interrupt DBGM

```

```

// Configuracao dos canais A/D
EALLOW; // Permitir acesso a areas
protegidas do DSP.
SysCtrlRegs.HISPCP.all = 0x3; // HSPCLK =
SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2 = 150/(2*3) = 25.0 MHz.
EDIS; // Impedir acesso a areas protegidas
do DSP.

InitAdc();

AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 0x1; // Ativar modo cascata.
AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 0x0; // Desativar modo contínuo.
AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 0xF; // Setup 16 conv's on SEQ1
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x7; // Setup ADCINA7 as 1st SEQ1
conv. SENSOR DE TEMPERATURA
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x6; // Setup ADCINA6 as 2nd
SEQ1 conv. SENSOR DE CORRENTE
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x5; // Setup ADCINA5 as 3rd
SEQ1 conv. REFERENCIA DE TEMPERATURA
/*AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 0x7;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV04 = 0x5;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV05 = 0x7;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV06 = 0x5;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV07 = 0x7;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ3.bit.CONV08 = 0x5;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ3.bit.CONV09 = 0x7;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ3.bit.CONV10 = 0x5;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ3.bit.CONV11 = 0x7;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ4.bit.CONV12 = 0x5;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ4.bit.CONV13 = 0x7;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ4.bit.CONV14 = 0x6;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ4.bit.CONV15 = 0x6;*/

```

```
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.EPWM_SOCA_SEQ1 = 0x1; // Enable SOCA from
ePWM to start SEQ1
```

```
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 0x1; // Enable SEQ1 interrupt
(every EOS)
```

```
    // Assumes ePWM1 clock is already enabled in InitSysCtrl();
```

```
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCAEN = 0x1; // Enable SOC on A group
```

```
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCASEL = 0x1; // Selecionar SOC quando
```

```
TBCTR == 0.
```

```
    EPwm1Regs.ETPS.bit.SOCAPRD = 0x1; // Generate pulse on 1st event
```

```
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = 0x0; // Configurar "Time-
base Clock Prescale" em 1.
```

```
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = 0x0; // Configurar
"High Speed Time-base Clock Prescale" em 1.
```

```
    // Wait for ADC interrupt
```

```
    for(;;)
```

```
    {
```

```
    }
```

```
}
```

```
void InitEPwm1Example()
```

```
{
```

```
    // Setup TBCLK
```

```
    EPwm1Regs.TBPRD = EPWM1_TIMER_TBPRD; // Define a
frequencia do PWM
```

```
    EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0x0000; // Phase is 0
```



```

EPwm1Regs.TBCTR = 0x0000;           // Clear counter

// Set Compare values
EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 0; //EPWM1_MAX_CMPA/4; // Ciclo de
Trabalho

// Setup counter mode
EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; // Count up
EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE;        // Disable phase
loading
EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1;        // Clock ratio to
SYSCLKOUT
EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1;

// Setup shadowing
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE = CC_SHADOW;
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO; // Load on Zero
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO;
// Set actions - Para inverter a saida basta inverter o CLEAR/SET
EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_CLEAR;
EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_SET;
}

void InitEPwm2Example()
{

// Setup TBCLK
EPwm2Regs.TBPRD = EPWM2_TIMER_TBPRD;
EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0x0000;
EPwm2Regs.TBCTR = 0x0000;

// Set Compare values
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 0; //EPWM2_MAX_CMPA/2;

```

```

// Setup counter mode
EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;
EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE;
EPwm2Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1;
EPwm2Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1;
// Setup shadowing
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE = CC_SHADOW;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO;

```

```

// Set actions
EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_CLEAR;
EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_SET;

```

```

}
interrupt void adc_isr(void)
{

```

```

///// AQUISIÇÃO DE ENTRADAS /////

```

```

temperatura=(AdcRegs.ADCRESULT0 >>4)*FATOR_CONVERSAO;
corrente=(AdcRegs.ADCRESULT1 >>4)*FATOR_CONVERSAO*1.0067;
temperatura_ref=(AdcRegs.ADCRESULT2 >>4)*FATOR_CONVERSAO;

```

```

media_temp = temperatura + avgcoeff*(media_temp - temperatura); // Filtro
para temperatura

```

```

media_cor = corrente + avgcoeff*(media_cor - corrente); // Filtro para corrente

```

```
media_temp_ref = temperatura_ref + avgcoeff*(media_temp_ref -  
temperatura_ref);
```

```
t_ad = media_temp-0.057; // Temperatura em volts
```

```
i_ad = media_cor; // Corrente em volts
```

```
tref_ad=media_temp_ref+0.045; //temperatura de referencia em volts
```

```
//////// CONTROLE DE TEMPERATURA //////////
```

```
i=(i_ad-1.5)/(0.0625); //Converte valor de tensão em corrente
```

```
tpeltier=50*t_ad-30; //Converte valor de tensão em temperatura
```

```
//tref=tref_ad*40; //converte valor de tensão em temperatura de referencia
```

```
if (fabs(i) <= 0.1) {
```

```
  i = 0;
```

```
}
```

```
et = tref - tpeltier; // calculo do erro de temperatura
```

```
if ((D*D_ant)<0){
```

```
  D=0;
```

```
  D_ant=0;
```

```
  chavear=0;
```

```
}
```

// Enquanto chavear estiver zero, todos os IGBTs estão abertos a lógica de chaveamento dos IGBTs só entrará em ação quando a corrente no peltier for zero (evitando o problema de duas correntes em sentidos opostos)

```

if (i == 0){
chavear=1;
}

tref_ant = tref; // Atualiza tr_ant

D1 = Kp*et; //Saída do controlador proporcional
//D2 = D2_ant + (Ki*T/2)*(et+2*et_ant); // Saida do controlador integral
D2=D2_ant+Ki*Kp*T*et_ant; //saida do controlador integral
D3=((Kp*Td)/T)*(et-et_ant); //saida do controlador derivativo

if (et > 0){
if (D1>1) { // Satura D1
D1=0.99;
}
if (D2>1) { // Satura D2
D2=0.99;
}
if (D3>1){ // Satura D3
D3=0.99;
}
}

if (et < 0){
if (D1<-1) { // Satura D1
D1=-0.99;
}
if (D2<-1) { // Satura D2
D2=-0.99;
}
if(D3<-1){ // Satura D3
D3=-0.99;
}
}
}

```

```
//D = (Kp*(1+(T*Ki)/2))*et+((Kp*(1+(T*Ki)/2))*((T-2/Ki)/(T+2/Ki)))*et_ant+D_ant;  
//aproximacao de tustin
```

```
D=D1+D2+D3; //controlador PID
```

```
if (D<-1) { // Satura D  
D=-0.99;  
} else if (D>1){  
D=0.99;  
}
```

```
D2_ant = D2; //atualizacao das variaveis  
D_ant=D;  
et_ant=et;
```

```
// Controle dos PWMs para o chaveamento dos IGBTs  
// OBS: LOGICA INVERTIDA!!!!!!!
```

```
//Este if foi implementado para evitar correntes em sentidos opostos  
if (chavear == 0){  
EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_MAX_CMPA;  
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_MAX_CMPA;  
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO4 = 1;  
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO21 = 1;  
}  
else {
```

```

if (D > 0) {
    // se o erro for POSITIVO, ou seja tref>t.valor, D
será POSITIVO e deve-se aplicar corrente POSITIVA para AUMENTAR t.valor
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_MAX_CMPA*(1-D); // (1-D) para
inverter // se o erro zerar, ou seja tref=t.valor, continua aplicando a corrente que
estava para manter no mesmo valor, ou seja D=D_ant>0
    //EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_MAX_CMPA*(ciclo);
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_MAX_CMPA;
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO4 = 1;
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO21 = 1;
}
else if (D == 0) {
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_MAX_CMPA;
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_MAX_CMPA;
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO4 = 1;
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO21 = 1;
}
else {
    // se o erro for NEGATIVO, ou seja tref<t.valor, D será negativo e
deve-se aplicar corrente NEGATIVA para DIMINUIR t.valor
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_MAX_CMPA; // se o
erro zerar, ou seja tref=t.valor, continua aplicando a corrente que estava para manter
no mesmo valor, ou seja D=D_ant<0
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_MAX_CMPA*(1+D); //
(1+D) para inverter
    //EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_MAX_CMPA*(ciclo);
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO4 = 1;
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO21 = 1;
}
}
}

```

//////// FIM DO CONTROLE DE TEMPERATURA //////////

// Reinitialize for next ADC sequence

```
AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1;    // Reset SEQ1
AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1;  // Clear INT SEQ1 bit
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1; // Acknowledge interrupt to
```

PIE

```
return;
}
```

OTIMIZAÇÃO DA DEMODULAÇÃO DE SINAIS DE UM TRANSFORMADOR DE POTENCIAL ÓPTICO USANDO UM FILTRO ÓPTICO SINTONIZÁVEL

BESSIE DE A. RIBEIRO, MARCELO M. WERNECK, JOSÉ LUIZ DA S. NETO

Laboratório de Instrumentação e Fotônica, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Caixa Postal 68564, 21941-972, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

E-mails: bessie@lif.coppe.ufrj.br,

werneck@lif.coppe.ufrj.br, luizneto@lif.coppe.ufrj.br

Abstract— Optical voltage transformers offer many advantages over conventional technology, such as galvanic isolation, immunity to electromagnetic interference, wide dynamic range, low weight, compact structure, besides the high level of security. This article shows the construction of a hybrid sensor PZT-FBG to be installed in the measuring transformers class of 13.8 kV and presents the implementation of an algorithm for calculating the optimum adjustment of the Fabry-Perot filter used in the demodulation of the sensor for measurement and assessment of the distribution lines.

Keywords— Fiber Bragg Grating (FBG) sensor, high voltage measurement, PZT, Fabry-Perot filter, optical voltage transformer.

Resumo— Transformadores ópticos de tensão oferecem muitas vantagens em relação à tecnologia convencional, tais como isolamento galvânico, imunidade à interferência eletromagnética, ampla faixa dinâmica, baixo peso, estrutura compacta, além do elevado nível de segurança. Este artigo mostra a construção de um sensor híbrido FBG-PZT, a ser instalado nos transformadores de medida na classe de 13.8 kV e apresenta a implementação de um algoritmo para o cálculo do ponto ótimo e ajuste de um filtro de Fabry Perot usado na demodulação deste sensor para medidas e avaliação das condições das linhas de distribuição.

Palavras-chave— Sensores a redes de Bragg (FBG), medidas em alta tensão, PZT, Filtro Fabry Perot, transformadores ópticos tensão.

1 Introdução

O desenvolvimento de novas tecnologias para medir as condições das linhas de distribuição têm sido objeto de estudos e pesquisas recentes. O monitoramento e controle dentro das subestações garantem a manutenção dos sistemas elétricos, além de prevenir possíveis interrupções e falhas. Atualmente, esse monitoramento é realizado através dos transformadores de instrumentação convencionais e estão divididos em duas categorias: os Transformadores de Potencial (TPs) e os Transformadores de Corrente (TCs).

Com base em uma tecnologia fotônica passiva, os Transformadores de Potencial Ópticos (TPOs) e Transformadores de Corrente Ópticos (TCOs) foram desenvolvidos para substituir os transformadores convencionais (CEASE *et al.*, 1991, WERNECK *et al.*, 2004,).

Os TPOs usam o efeito Pockels ou efeito eletro-óptico característico da rotação da polarização da luz em função do campo elétrico. Para detectar o sinal óptico, a polarização Pockles é convertida em modulação da intensidade de luz usando polarizadores, conforme descrito por SAWA *et al.*, (1990).

A não necessidade de energia elétrica no ponto de sensoriamento, o isolamento galvânico, a imunidade à interferência eletromagnética, a ampla faixa dinâmica, além do baixo peso e estrutura compacta conferem à tecnologia óptica uma grande flexibilidade, conforme demonstrada em diversos trabalhos (CHAVEZ *et al.*, 2002, SANDERS *et al.*,

2002, BOHNERT *et al.*, 2004, RAHMATIAN *et al.*, 2003).

O protótipo de um sensor baseado em Redes de Bragg (FBG) e cerâmicas piezoelétricas (PZT) foi construído com o objetivo de realizar medidas de tensão para aplicação nos TPOs. O sistema apresenta vantagens como o preço competitivo se comparado com os TPs convencionais e soluciona os problemas de instabilidade óptica e alinhamento do feixe presentes nos TPOs comerciais, além de representar uma redução nos custos de aquisição e manutenção destes sistemas.

A fim de utilizar a característica de um sensor FBG é necessário desenvolver técnicas de demodulação para detectar os deslocamentos no comprimento de onda de Bragg em função do parâmetro a ser medido. O método de interferometria usando um filtro óptico sintonizável é uma tecnologia consolidada e outros trabalhos têm sido desenvolvidos para melhorar a precisão e instabilidade dos sistemas de modulação usando um filtro Fabry-Perot (FP). ZHANG *et al.*, (2009) apresentaram um esquema de demodulação baseado em um algoritmo de calibração da sensibilidade do sistema, capaz de eliminar os erros oriundos da não linearidade do filtro FP.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação de um novo procedimento de controle para o cálculo do ponto ótimo de operação de um filtro FP, que otimiza e maximiza o processo de demodulação nas medidas de tensão CA. O método de cálculo foi adotado a fim estabelecer o ajuste ótimo, isto é, o ponto de máxima sensibilidade sobre as características de um filtro FP.

2 Redes de Bragg em fibra óptica e Cerâmicas Piezoelétricas

2.1 Princípios Básicos das Redes de Bragg

As redes de Bragg são formadas por uma modulação periódica no índice de refração do núcleo da fibra óptica ao longo de uma direção longitudinal. Devido essas modulações periódicas, a luz guiada ao longo do núcleo da fibra será refletida por cada grade e vai somar à reflexões oriundas de outras grades na direção contrária, satisfazendo a condição de Bragg, dada por:

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

Na Equação (1) λ_B representa o comprimento de onda de Bragg do espectro refletido quando um sinal luminoso incide na FBG. De acordo com OTHONOS *et al.*, (1999) este valor é função do índice de refração efetivo do núcleo da fibra (η_{eff}) e do período de modulação do índice de refração (Λ). Assim, tanto uma deformação longitudinal quanto uma variação de temperatura devido a qualquer agente externo, poderá mudar tanto o η_{eff} quanto o Λ .

A Equação de Bragg (2) estabelece a relação entre o comprimento de onda de Bragg, a deformação e a temperatura aplicada a uma FBG (KERSEY *et al.*, 1997).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_{\text{FBG}} + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (2)$$

onde,

$$\varepsilon_{\text{FBG}} = \frac{\Delta L_{\text{FBG}}}{L_{\text{FBG}}} \quad (3)$$

sendo ε_{FBG} é o deslocamento longitudinal da fibra, L_{FBG} o comprimento da fibra (isto é, a distância entre os dois pontos de fixação da fibra contendo a FBG), ΔL_{FBG} o deslocamento da fibra, ΔT a variação de temperatura, ρ_e o coeficiente foto-elástico, α o coeficiente de expansão térmica da sílica e η o coeficiente termo-óptico.

Substituindo as constantes da Tabela 1 na Equação (2) e usando uma FBG com comprimento de onda central de 1550 nm, obtém-se a sensibilidade da FBG com o deslocamento:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 1,2 \text{ pm} / \mu\text{e} \quad (4)$$

2.2 Fundamentos da Piezoelectricidade

A piezoelectricidade é a propriedade que certas substâncias cristalinas possuem de gerar cargas elétricas quando estão submetidas à aplicação de uma força mecânica ou produzir uma deformação mecânica quando um campo elétrico é aplicado em

seus terminais. PZT é uma abreviação para cerâmicas compostas de Chumbo, Zircônio e Titânio. A deformação da espessura do PZT é dado pela constante que representa a deformação sofrida pela cerâmica na direção 3 (d_{33}) à partir da incidência de um campo elétrico nesta mesma direção. A relação entre a variação Δw da cerâmica em função da tensão aplicada nos eletrodos do PZT é dada por:

$$\frac{\Delta w}{w} = d_{33}E \quad (5)$$

Onde w é a espessura da cerâmica, $E=V/w$ é a tensão aplicada aos eletrodos do PZT e d_{33} é o coeficiente de deslocamento na direção de polarização [pm/V].

Uma das vantagens do emprego de cerâmicas PZT na fabricação de sensores é o fato de que estas não exigem uma fonte de alimentação externa para operar sendo uma das principais motivações para o uso na detecção de sinais de baixa potência (SOMAN *et al.*, 2011).

3 Princípio de Operação

Para a construção do protótipo, foi utilizada uma pilha de cristais PZT como um transdutor de tensão e uma FBG como um sensor de deslocamento. Como descrito anteriormente, esses materiais apresentam uma deformação em suas dimensões, quando um campo elétrico é aplicado em seus eletrodos. Dessa maneira, as deformações a que estes cristais estão submetidos, são convertidas em variações no comprimento de onda de Bragg da FBG colada ao PZT.

O grupo do Instituto de Tecnologia de Sistemas Elétricos ABB introduziu pela primeira vez em 1999, o conceito de usar este esquema para medir tensão. Uma fibra com um FBG inscrita foi colada longitudinalmente no disco PZT usando a constante piezoelectrica longitudinal (d_{31}).

O sistema proposto em NIEWCZAS *et al.*, (2006) apresentou investigações sobre as capacidades dinâmicas de um sensor de tensão híbrido, composto de uma pilha de cerâmicas PZT destinadas a monitorar tensão e corrente em transformadores.

Um trabalho recente foi apresentado por ALLIL *et al.*, (2011) onde os autores desenvolveram um sistema de medida de alta tensão para ser usado em transformadores de tensão na classe de 13.8 kV usando uma rede de Bragg colada a um cristal PZT. O sensor desenvolvido apresenta níveis de precisão na classe 0.2% exigidos pelo IEC 60044-5 (International Electrotechnical Commission).

A sensibilidade de um transdutor FBG-PZT, que é a relação entre o deslocamento no comprimento de onda de Bragg e o campo elétrico aplicado ao PZT é obtida, partindo-se da Equação (4). Como a FBG está colada ao PZT, ela sofrerá a mesma deformação, assim, combinando a Equação (2) com a Equação

(5), e considerando a temperatura ambiente constante ($\Delta T = 0$) resulta em (6):

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - \rho_e) d_{33} \frac{V}{w} \quad (6)$$

Mostra-se na Tabela 1 os parâmetros e as constantes da FBG e das cerâmicas usadas para a construção dos protótipos desenvolvidos.

Tabela 1. Parâmetros das cerâmicas PZT e da FBG.

PZT	
Propriedades Físicas	Valor
Formato	Anel
Tipo	PZT-4H
Constante Piezoelétrica d_{33}	$d_{33} = 300 \text{ pm/V}$
Espessura da cerâmica	$w = 4 \text{ mm}$
Máximo Campo Elétrico Direto	$1\text{-}2 \text{ kV/mm}$
Número de elementos na pilha	$n = 10$
FBG	
Comprimento de Onda de Bragg	$\lambda_B = 1538,48 \text{ nm}$
Coefficiente Foto-Elastico	$\rho_e = 0,22$
Coefficiente de Expansão Térmica	$\alpha = 0,55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Coefficiente Termo-Óptico (dn/dT)	$\eta = 8,6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Comprimento da FBG	$L = 28 \text{ mm}$

(Fonte: ALVES, 2010 e OTHONOS *et al.*, 1999).

4 Montagem Experimental

3.1 O protótipo sensor FBG-PZT

Um desenho ilustrativo do protótipo desenvolvido é mostrado na Figura 1. A montagem foi feita usando uma pilha de cerâmicas PZT separadas por chapas de cobre. Os eletrodos foram organizados em ambos os lados dos discos e foram conectados em paralelo de tal maneira que todos os discos fossem submetidos à mesma tensão. Uma estrutura de alumínio foi usada para acomodar a pilha de cerâmicas e as chapas de metal, juntamente com uma FBG colada em cima do alumínio, conforme o desenho da Figura 1.

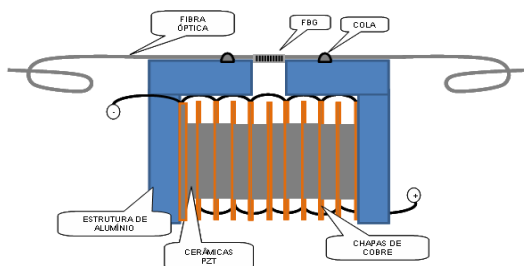


Figura 1. Diagrama esquemático com a configuração composta de 10 cerâmicas PZT.

Para calcular a sensibilidade do protótipo sensor para uma pilha de cerâmicas, reescreve-se a Equação (6) incluindo o número de elementos (n) de cerâmicas PZT.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - \rho_e) \frac{nd_{33}V}{L_{\text{FBG}}} \quad (7)$$

Substituindo as constantes da cerâmica PZT-4, de acordo com a Tabela 1, na Equação (7), obtém-se a seguinte sensibilidade:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta V_{\text{in}}} = 128,6 \text{ pm/kV} \quad (8)$$

Este transdutor é capaz de medir tanto CC quanto CA e significa um deslocamento no comprimento de onda de Bragg de 128,6 pm para cada 1000 V de tensão aplicados ao PZT.

Para aplicações usando tensão CC, um interrogador óptico comercial pode ser utilizado, entretanto, este equipamento é limitado a poucos Hertz, sendo incapaz de responder às frequências das linhas de CA. Para aplicações com tensão CA, foi utilizada outra implementação, conforme demonstrada no item a seguir.

3.2 Montagem Óptica Experimental para medidas em Tensão CA usando um filtro de Fabry Perot

A fonte de tensão CA foi usada para aplicar o sinal na entrada aos eletrodos. Uma fonte luz foi usada para iluminar o sensor FBG-PZT usando um circulador óptico. A luz incide na FBG através da porta (1) do primeiro circulador óptico e circula até a porta (2). O espectro refletido do sensor retorna através da porta (2) deste mesmo circulador onde então é direcionado para a porta (3) que está ligada ao filtro FP. O sinal resultante na saída do filtro é a convolução entre seu espectro de transmissão e o espectro refletido da FBG que representa a área sombreada do espectro ilustrado na Figura 2. A integral desta área é a intensidade de luz total que existe no filtro e atinge o fotodetector e sua saída é analisada utilizando um osciloscópio.

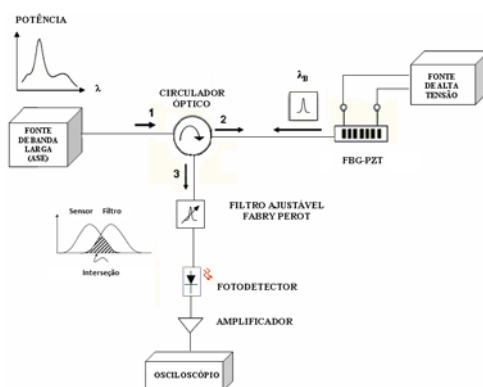


Figura 2. Diagrama esquemático da montagem experimental para tensão CA usando um filtro de Fabry-Perot.

A escolha do ajuste ótimo para a posição do comprimento de onda central do filtro é realizada com o algoritmo desenvolvido neste trabalho, e apresentado na próxima seção. O ponto de interseção entre os dois espectros ocorre na região linear de cada curva, portanto quando o espectro do sensor varia, essa área sobreposta varia linearmente.

Como o espectro do sensor está oscilando em 60 Hz, ele vai interagir com o filtro em pontos diferentes em cada ciclo da senóide, assim a interseção irá aumentar ou diminuir em diferentes pontos e a potência de saída do filtro irá oscilar na mesma frequência. Após este processo de demodulação, a intensidade do sinal luminoso será proporcional à tensão de entrada aplicada no PZT.

5 Algoritmo de Otimização

4.1 Técnica de Demodulação usando um filtro Óptico Sintonizável

A técnica de interferometria usando um filtro Fabry-Perot é usada para detectar as variações no comprimento de onda de uma FBG (TIAN *et al.*, 2008). Através do ajuste dos espelhos e variando a cavidade interna do cristal PZT, utilizado para a varredura do espectro, é possível sintonizar o filtro e selecionar o comprimento de onda desejado. A largura de banda do filtro pode ser ajustada variando a tensão através de uma fonte de alimentação.

O espectro assimétrico do filtro pode ser atribuído à defeitos na geometria das lentes, defeitos estes que podem provocar a instabilidade no sistema de leitura. Em função disto, alguns algoritmos têm sido propostos para melhorar a precisão e a estabilidade destes sistemas de demodulação.

4.2 Desenvolvimento do Algoritmo para Sintonia do filtro Fabry Perot

A sensibilidade é um aspecto importante em qualquer sistema de medida. Sua determinação é crítica para se obter o desempenho pré-definido nas medidas e a capacidade qualitativa de medir o estímulo físico de interesse. Este parâmetro é influenciado pela física inerente ao sensor e aos elementos transdutores, bem como pela implementação específica da cadeia de medidas.

Considerando o sistema sob estudo, algumas instâncias e parâmetros podem ser modificados;

- O ponto de operação (Q);
- O fator de qualidade do sensor FBG;
- A largura de banda do sensor FBG;
- Os parâmetros da cerâmica PZT.

O ponto de operação pode ser facilmente alterado por meio de um filtro sintonizável Fabry Perot. Portanto, para desenvolver a prova do conceito com o diagrama esquemático mostrado na Figura 2, parece razoável, que os esforços devam inicialmente estar focados na otimização do ponto de operação, considerando a melhoria na sensibilidade, ajustando o comprimento de onda central do filtro FP.

Um procedimento foi utilizado para estabelecer o ponto ótimo de operação, isto é, o ponto de máxima sensibilidade sobre as características espectrais do filtro em repouso. Para um faixa relativamente pequena de estímulo em torno do

ponto de operação, a interação espectral entre o filtro e o sensor FBG pode ser otimizada.

A curva espectral para o filtro FP, $F_{FP}(\lambda)$ e a FBG, $F_{FBG}(\lambda)$ são mostradas na Figura 3, onde o sensor está em estado de repouso. O eixo vertical mostra respectivamente, a transmitância relativa do filtro FP e a reflectância relativa do sensor FBG.

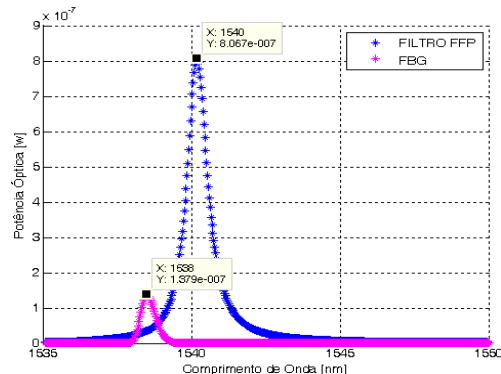


Figura 3. Curva espectral para o filtro Fabry-Perot, $F_{FP}(\lambda)$ e a FBG, $F_{FBG}(\lambda)$.

A convolução numérica $F_{FP}(\lambda)*F_{FBG}(\lambda)$ é realizada a fim de se obter a potência disponível entregue ao fotodetector em função do deslocamento do comprimento de onda. A curva da convolução está mostrada na Figura 4, com uma resolução de 12 pm; a mesma do analisador de espectro óptico (OSA) utilizado. Portanto, mostra-se no gráfico da Figura 4 o resultado da convolução como função do deslocamento do comprimento de onda a partir do ponto de referência.

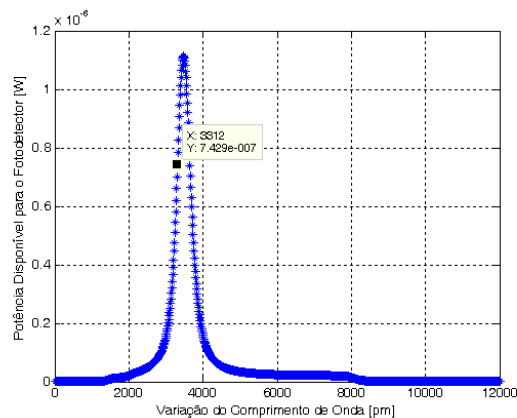


Figura 4. Curva da convolução entre $F_{FP}(\lambda)*F_{FBG}(\lambda)$.

Em seguida, a derivada $\Delta[F_{FP}(\lambda)*F_{FBG}(\lambda)]/\Delta\lambda$ da curva de convolução é calculada e plotada na Figura 5. O máximo na curva representa a quantidade de deslocamento do comprimento de onda necessária para obter a sensibilidade ótima e, portanto, o ajuste ideal do filtro. Este ponto de derivada máxima mostra-se na Figura 5. Finalmente, o filtro FP é sintonizado a fim de que a condição de repouso corresponda a quantidade de deslocamento exigido.

Mostra-se na Figura 5 que a sensibilidade máxima calculada pelo algoritmo é 1402 W/m em 3312 pm, significando uma variação de potência de

1402 pW para cada 1 pm de deslocamento na frequência, quando o comprimento de onda central do filtro está localizado em 3312 pm à direita da frequência central da FBG.

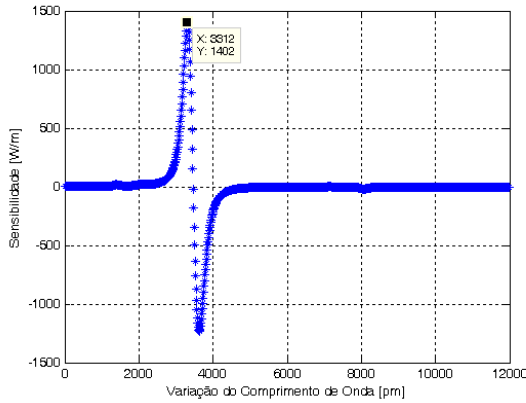


Figura 5. A derivada da convolução $\Delta[F_{FP}(\lambda)*F_{FBG}(\lambda)]/\Delta\lambda$.

A implementação do algoritmo proposto possui a vantagem de também ser aplicada na técnica de demodulação baseada em duas redes gêmeas, uma que funciona no protótipo sensor e outra FBG que funciona como filtro usada para interrogar o sensor FBG-PZT. A técnica usando rede gêmeas ainda apresenta um custo eficiente quando comparada à implementação usando um filtro sintonizável de Fabry-Perot.

Para calcular a sensibilidade teórica a partir da incidência de uma tensão CA aplicada aos terminais do PZT, usando a montagem da Figura 3, considerou-se inicialmente que uma variação de tensão aplicada ao PZT irá produzir um deslocamento no comprimento de onda da FBG, de acordo com a Equação (8):

$$\Delta\lambda_B = k_1\Delta V_{in} \quad (9)$$

onde, k_1 é o valor calculado em (8).

Agora, o deslocamento da frequência na entrada do filtro produz uma variação de potência na saída de:

$$P_{in} = k_2\Delta\lambda_B \quad (10)$$

Onde, P_{in} é a intensidade luminosa na entrada no fotodetector e k_2 é a sensibilidade ótima (1402 W/m) calculada pelo algoritmo de convolução.

No passo seguinte, a intensidade luminosa de entrada aplicada ao fotodetector produz uma corrente na saída, dada por:

$$i = k_3P_{in} \quad (11)$$

Onde k_3 é a responsividade do fotodetector e corresponde a 0,95 A/W, de acordo com o datasheet do fabricante.

Finalmente, a corrente de saída do fotodetector é amplificada por um amplificador de transimpedância produzindo uma tensão na saída, dada por:

$$\Delta V_{out} = k_4i \quad (12)$$

onde, k_4 é o ganho de transcondutância do amplificador no valor de: $4,75 \times 10^{-6}$ V/A.

Assim, combinaram-se as Equações (10), (11) e (12) obtendo-se:

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = k_1k_2k_3k_4 \quad (13)$$

Substituindo as constantes, obtém-se a função de transferência para a implementação proposta:

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = 0,813 \times 10^{-3} \quad (14)$$

6 Resultados e Discussões

Usando o diagrama da Figura 3, o filtro FP foi ajustado no ponto ótimo, sintonizando no comprimento de onda calculado pelo algoritmo. Aplicando uma tensão CA no PZT e medindo a tensão na saída do amplificador é possível obter o gráfico da Figura 6. A sensibilidade encontrada é de $0,882 \times 10^{-3}$, valor este, próximo ao da sensibilidade teórica encontrada em (14): $0,813 \times 10^{-3}$.

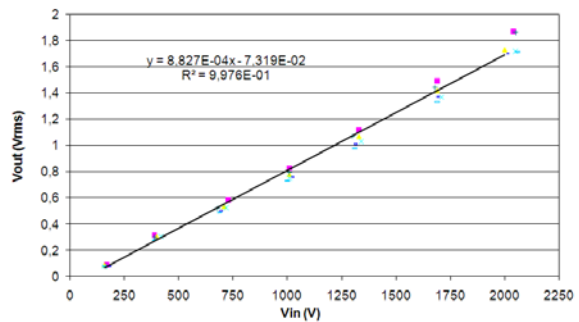


Figura 6. A derivada da convolução $\Delta[F_{FP}(\lambda)*F_{FBG}(\lambda)]/\Delta\lambda$.

Esta proximidade entre o valor teórico e o experimental é difícil de ser obtida, já que o processo de ajuste do filtro FP é realizado aplicando uma tensão CC e a resposta do filtro é muito sensível às pequenas variações do controle de tensão. Além disso, a exatidão de 50 pm do analisador de espectro óptico faz com que o processo de ajuste fino do filtro se distancie do ideal. Portanto, a posição exata do comprimento de onda central do filtro será sempre desviada de pelo menos 100 pm.

Outro ponto relevante é em relação às variações de temperatura quando o sensor está em operação devido ao fator de dissipação ($\tan \delta$), que representa

as perdas capacitivas das cerâmicas. Como a temperatura varia o comprimento de onda de Bragg (λ_B), o ponto de operação excursiona ao longo do gráfico da Figura 4. Para cada nova posição do ponto de operação do filtro, o sistema apresentará diferentes ganhos. O pico na Figura 5 representa o ganho máximo, que está indicado por k_2 na Equação (10), por isso, à medida que a temperatura aumenta, k_2 diminui, consequentemente produzindo diferentes valores de sensibilidades.

Para as aplicações em campo, sujeitas as variações térmicas, será necessário compensar as variações no comprimento de onda de Bragg, já que tanto uma deformação como a variação de temperatura, resultam em variações no comprimento de onda de Bragg.

Algumas propostas para solucionar os efeitos térmicos podem ser implementadas. Uma proposta inicial é usar uma rede de Bragg livre de tensão mecânica, no mesmo ambiente térmico do sensor usado para as medidas de deformação. Dessa forma, os erros nas medidas na sensibilidade do sensor causados pelas variações de temperatura, podem ser compensados subtraindo-se do deslocamento no comprimento de onda de Bragg ocasionado pelas variações térmicas.

A segunda proposta seria a aplicação da técnica de demodulação por redes gêmeas. Usando uma FBG filtro para demodulação da FBG sensora juntamente com um módulo termo-elétrico (TEM), ou Peltier. Através de um circuito eletrônico, o peltier será controlado termicamente, a fim de que, o controle promova os deslocamentos necessários no comprimento de onda de Bragg da FBG filtro, a fim de manter a posição ótima do ponto de operação durante as variações de temperatura.

5 Conclusão

O artigo desenvolve um esquema para transformador de potencial baseado na combinação de duas tecnologias: tecnologia de Redes de Bragg e a tecnologia de cerâmicas piezoelétricas para medidas em linhas de alta tensão. O artigo também apresenta um algoritmo para determinação do ponto de máxima sensibilidade da convolução espectral entre uma FBG e um filtro Fabry-Perot.

Resultados experimentais são demonstrados usando o algoritmo desenvolvido e apresenta a concordância entre o valor teórico e o valor experimental.

Para uma implementação comercial de um TPO usando o esquema proposto neste trabalho, vale destacar que o desenvolvimento de novos dispositivos ópticos para o mercado de telecomunicações, tem aumentado a confiabilidade e ao mesmo tempo, diminuído seus custos de aquisição. Por esta razão, a fabricação final deste dispositivo pode ser considerada viavelmente possível.

Referências Bibliográficas

- Allil, R. C. S. B., Werneck, M. M., "Optical high-voltage sensor based on fiber Bragg grating and PZT piezoelectric ceramics", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, pp. 1-8, 2011.
- Alves A. H., "Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades", ATCP Engenharia Física, Mar. 2010.
- Bohnert, K., Nehring, J., "Fiber-optic sensing of voltages by line integration of the electric field", Optics and Lasers in Engineering, v. 14, n. 5, pp. 511-526, Jul. 2004.
- Cease, T. W., "Optical voltage and current sensors used in a revenue metering system", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 6, n. 4, pp. 1374-1379, Oct. 1991.
- Chavez, P. P., Rahmatian, F., Jaeger, A. F., "230 KV optical voltage transducers using multiple electric field sensors", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 17, n. 2, Apr. 2002.
- Instrument Transformers-Part 5-Capacitor Voltage Transformers, IEC60044-5, 2004.
- Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M., Koo, K. P., Askins, C. G., "Fiber Grating Sensors", Lightwave Technology, v. 15, n. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- Niewczas, P., Fusiek, G., Mc Donald, J. R., "Dynamic Capabilities of the Hybrid Fiber-Optic Voltage and Current Sensors". 5th IEEE Conference on Sensors, pp. 295-298, Daegu Korea, 22-25 Oct., 2006.
- Othonos, A. Kalli, K., "Fiber Bragg Gratings: Fundamental and Applications in Telecommunications and Sensing", Norwood, MA: Artech House, 1999.
- Rahmatian, F., Chavez, P. P., "SF₆-free 550 kV combined optical voltage and current transducer system". IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, v. 1, pp. 379-382, Sept. 2003.
- Sawa, T., Kurosawa, K., Kaminishi, T., Yokota, T., "Development of optical instrument transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 2, Apr. 1990.
- Soman, J., O'Neal, C. B., "Fabrication and Testing of a PZT Strain Sensor for Soil Applications", IEEE Sensors Journal, v. 11, n. 1, Jan. 2011.
- Zhang, J., Zhao, H., "Matched FBG application research on dynamic sensing and demodulation". Symposium on Photonics and Optoelectronics – SOPO, pp. 1-5, 14-16 Aug. 2009.
- Werneck, M. M., Abrantes, A. C. S., "Fiber-optic-based current and voltage measuring system for high-voltage distribution lines", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 3, pp. 947-951, July 2004.

B. A. Ribeiro, M. M. Werneck, D. C. J. Rezende, F. V. B. de N. and D. M. dos Santos., "METALLIZATION OF FBG BY LASER ABLATION FOR A VOLTAGE TRANSDUCER", 22nd International Conference on Plastic Optical Fibers, apresentado em Armação de Búzios - Rio de Janeiro, Brasil, setembro de 2013.

METALLIZATION OF FBG BY LASER ABLATION FOR A VOLTAGE TRANSDUCER

Bessie A. Ribeiro*, Marcelo M. Werneck, Dulce Cristina J. Rezende, Fábio Vieira B. de Nazaré and Daniel M. dos Santos

Instrumentation and Photonics Laboratory, Electrical Engineering Programme, Universidade Federal do Rio de Janeiro

*Corresponding author: bessie@lif.coppe.ufrj.br

Abstract: To ensure measurement reliability, several aspects need to be considered when an FBG (Fiber Bragg Grating) strain sensor is fixed on a structure. The fiber coating material and the method to attach the strain sensor on the structure can affect its behavior. Recently new improvements on Bragg Gratings may help to enhance the strength of a sensor and it may also improve the adhesion to tin/lead solder to the fiber surface. To achieve this, we introduced a new technique in Bragg Gratings by creating a metal coating on a FBG surface using laser ablation technique. The voltage sensitivity and uncertainties of the high voltage measuring sensor using an FBG metalized and soldered on the sensor's structure were inferred from the results obtained.

Key words: Fiber Bragg Grating (FBG); Draw Tower Grating (DTG); thin film; laser ablation; PZT [Lead (Plumbum) Zirconate Titanate]; high-voltage measurement.

1. Introduction

Fiber Bragg Grating (FBG) sensors are a well-known technology for strain and temperature measurements. To use the FBG as a strain sensor, designing of an appropriate interface is required in order to measure the wavelength shifts of the grating, which may then be used as a parameter transducer.

The well-known Bragg Equation (1) establishes the relationship between the grating periodicity (Λ) and the Bragg wavelength (λ_B) when a periodic modulation of the refraction index of the fiber in a longitudinal direction occurs.

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

where n_{eff} stands for the average index of refraction in the fiber core after the FBG inscription.

Several aspects need to be considered when an FBG is fixed on a structure because accuracy and reproducibility in measurements are important for strain sensors. The fiber coating material and the method to attach the sensor on the structure can affect the system behavior, resulting in inaccurate measurements and in a decreased lifetime [1].

In recent years, optical fibers manufacturing process is combined with the FBG inscription procedure. This process is called Drawn Tower Grating (DTG), and the idea was developed to provide mechanical resistance to the FBG. The coating is applied just after the FBG is inscribed, increasing the sensor mechanical resistance [2]. Apart from yielding high mechanical strength, the DTG also allows the deposition of an additional coating to provide, for example, a higher thermal coefficient.

The laser ablation technique is used for thin film formation [3-4] through the interaction of the laser and materials which evaporate a plume of melted particles which solidify after reaching the substrate surface. In this technique, laser pulses are used to evaporate matter from the target surface. As a result, a vapor plume is ejected normal to the target surface and deposited over the substrate surface.

Thin film deposition has many scientific and industrial applications, such as biosensors [5] and catalysis [6], and has attracted attention in the production of nanoparticles and films with thickness of micro and nanometers.

Another application of laser ablation is to produce a metallic coating over an optical fiber [7-8]. Various methods have been developed for thin films, such as electroplating [9], thermal spraying [10], and laser ablation [11-12].

But, the performance of a sensor depends on its strength so we focused our research to enhance the performance of a strain sensor by improving its strength. The present work investigates the influence of a metal coating on a DTG surface by using the laser ablation technique to improve the sensor performance. We also studied whether the current technique helps to improve the adhesion to tin/lead solder to the fiber surface.

A PZT crystal stack was used as a voltage transducer and a DTG as a strain sensor. The setup basically involves the attachment of DTG sensor to the PZT [Lead (Plubum) ZirconateTitanate] ceramic stack, and measure the PZT displacement when an electric field is applied. Whenever the PZT crystal is submitted to an electric field, there will be a change in its dimensions, and since the DTG is soldered to the PZT, it will be strained accordingly [13].

2. Theory and Design

Fiber Bragg gratings have been widely established in several applications, like biochemical, strain measurement, temperature, voltage and current sensors, and so on. These sensors present specific advantages over other optical fiber sensors, such as small size, immunity to electromagnetic interference, light weight, electrical insulation, and multiplexing capability.

On the DTG process the manufacturing process of optical fibers is combined with the FBG inscription. The coating is applied after the FBG inscription process and its main advantage is to circumvent the necessity of coating removing prior the FBG inscription on the fiber. Ormocer® coating used in the DTG method is a hybrid polymer material synthesized by a sol-gel process that improves the mechanical properties of FBG sensors [14]. Furthermore, Ormocer adheres well to glass, so that there is no evidence of any offset movement between the glass and the coating.

The FBG sensing parameter is the shift of Bragg wavelength that occurs through changes on thermal dilation and on thermo optic coefficients when an external force or a temperature variation is applied on the FBG.

Equation 2 describes the FBG response to calculate the temperature and the strain sensitivity [15], the central wavelength displacement is:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_{FBG} + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (2)$$

where $\Delta\lambda_B$ is the displacement due to both temperature and strain; ρ_e is the photo-elastic coefficient of silica ($\rho_e = 0.22$); ε_{FBG} is the longitudinal strain of the grating; α is the thermal expansion of silica ($\alpha=0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) and η is the thermo-optic coefficient ($\eta=8.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ for Ge-doped silica optical fibers).

One of the applications of FBG as a strain sensor is in high voltage measuring systems, where a PZT piezoelectric crystal is employed as transducer and a FBG as a strain sensor. The sensitivity of the FBG-PZT transducer, i.e., the relationship between the Bragg wavelength displacement and the electric field applied to the PZT can be derived from the classic PZT thickness displacement model:

$$\frac{\Delta w}{w} = nd_{33}E \quad (3)$$

where w is PZT disk thickness, E is the applied voltage n is the number of PZT ceramics ($n=10$) in the stack, d_{33} is the piezoelectric constant ($d_{33}=300$ pm/kV). If the DTG is bonded to the lateral surface of the PZT disk by two fixing points, it experiences the same strain as the PZT and this allow us to combine Equations (2) and (3). For a constant temperature environment ($\Delta T=0$), and since the DTG is bonded between the two fixing points on the stack, the PZT displacement is transmitted to the fiber. Then we have [13]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - \rho_e) \frac{nd_{33}V}{L_{\text{FBG}}} \quad (4)$$

By substituting the fiber length ($L_{\text{DTG}}=19.8$ mm) and its Bragg wavelength of 1544.70 nm we obtain the sensor theoretical sensitivity of 182.19 pm/kV.

3. Materials and Methods

3.1. Laser Ablation Experiment

Xie et al. [16] proposed and studied the electroless plating technique on the FBG surface to evaluate the relationship between temperature sensitivity and the plating thickness of the deposited nickel cladding on the sensor. In another work [17], an FBG was metalized with a nickel coat by electroless-electro plating method. The nickel increased the FBG sensitivity to temperature.

In this work, we irradiated a copper target with a Nd:YAG laser (wavelength=1064 nm and 5 ns pulses @ 10 Hz). The incidence angle of the laser on the target was 30° and the target was placed at 10 mm and parallel to the substrate. In this way the copper coating was deposited around the fiber. Figure 1 shows the laser ablation system with the Nd:YAG laser, the vacuum chamber and the target holder with a copper target.

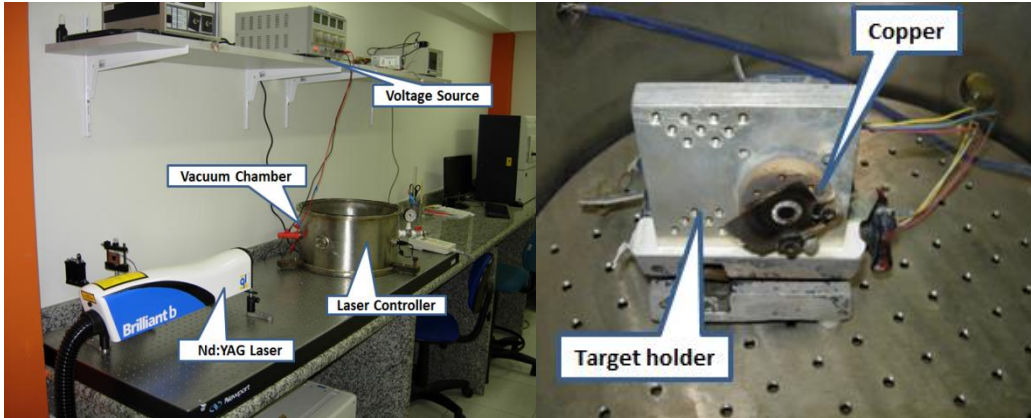


Fig. 1.: Photograph of the laser ablation system.

The experiments were performed with a laser peak power of 7.8 W and the number of pulses varied according to the total energy necessary for an appropriated thickness.

The DTG used in the experiment was 8 mm long, reflectivity around 30% and a Bragg wavelength of 1544.70 nm. Before applying the copper layer on the DTG surface, the fiber containing the grating was immersed for ten minutes in an ultrasonic bath containing alcohol to improve the adhesion of the metal to the Ormocer coating.

Figure 2 shows the scanning electron microscope (SEM) image with the copper film deposited on the FBG. With this copper thickness of 2 μm it is possible to solder the sensor to the structure.

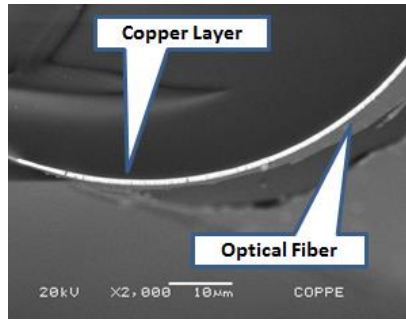


Fig. 2.: SEM image of the cross-section the FBG coated with copper.

The most common way to fix a strain gauge to a structure is by epoxy bonding and this technique was naturally extended to FBG sensors. However, due to the high Young modulus of the optical fiber, the elasticity of the epoxy allows small displacements between the fiber and the structure and hence measurement values can be distorted.

So that, in this experiment, the fiber with DTG was coated with copper and soldered to the structure allowing the development of a copper layer as thin and homogeneous as possible around the fiber so as to completely avoid any elastic displacement. The inscribed DTG is bonded to the side of a PZT crystal stack showed in a previous work [13].

3.2 The Optical Setup for DC input

With the block diagram of the optical setup for DC input shown in Fig. 3, it is possible to read the wavelength displacement of the sensor, and compare it with the DC input voltage read by a voltmeter.

A variable high voltage DC power supply was used to test the system. Fig. 3 encompasses the optical system that is a commercial optical interrogator. An ASE (Amplified Spontaneous Emission) broadband light source illuminates the FBG, and its reflected peak is directed to an optical spectrum analyzer (OSA), which is controlled and monitored by a computer. By using this scheme, we demodulated the sensor system at DC voltage operation and calculated the measurement sensitivity.

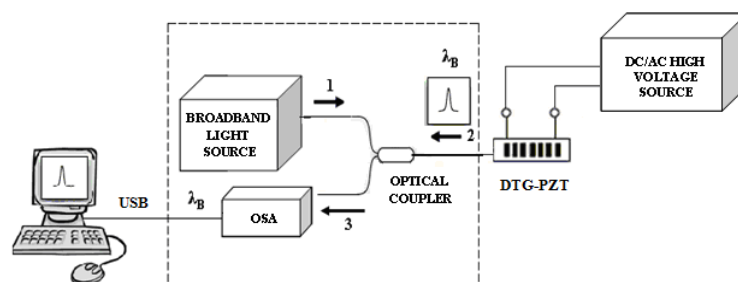


Fig. 3: Schematic diagram of the setup for DC input.

4. Results and Discussions

4.1 Temperature Sensitivity Measurement

This section describes the experimental sensitivity for the DTG pristine before the metal coating process and after the laser ablation deposition. We immersed both DTG and the thermocouple into an oven and used an FBG

commercial interrogator to monitor the Bragg wavelength shift for a temperature range of 25°C to 100°C by using a precision thermometer.

The graph shows that the measured thermal sensitivity for a DTG pristine and copper coating DTG was of 11.95 pm/°C and 12.22 pm/°C, respectively. The data obtained show that copper film deposited on the DTG surface did not affect the behavior of the sensor. However, in case it is necessary to enhance its sensitivity to temperature the copper coating thickness on the sensor surface should be increased.

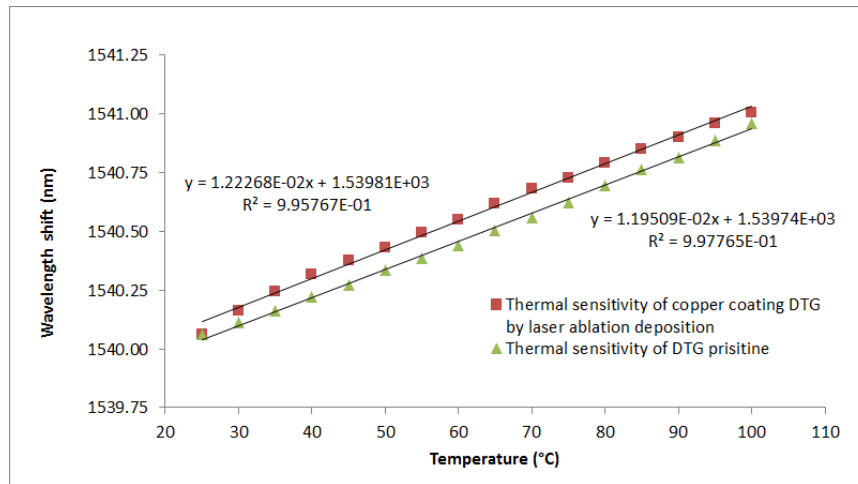


Fig. 4: Experimental thermal sensitivity for DTG pristine and copper coated DTG.

4.2 DC voltage measurements

Ten measurement cycles were carried out for an input range of 0 to 3 kV as shown in Fig. 5. The average sensitivity calculated for the 10 cycles was 104.60 pm/kV with a linearity of $R^2=0.9960$. Dividing the average standard deviation (SD) of 1.05 pm by the sensitivity we obtained an uncertainty in voltage measurement of 10.03 V. This represents an uncertainty of 0.07% in the 13.8 kV class of transmission lines which is close to the 0.2% accuracy to comply with the International Electrotechnical Commission (IEC) [18] for DC measurements. The experimental sensitivity is lower than the one theoretically calculated (182.19 pm/kV), a fact that can be explained due to the adhesive used to fix the PZT disks together that could decrease the sensitivity.

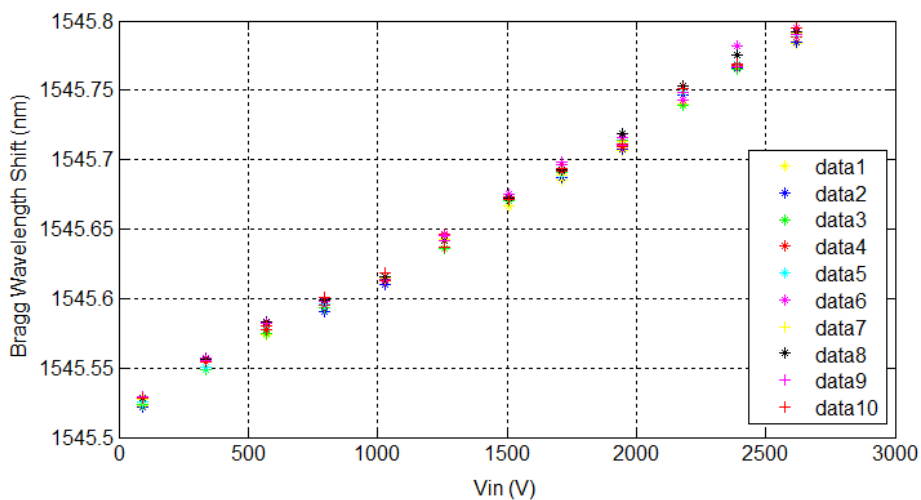


Fig. 5: Relationship between the DC voltage applied to FBG-PZT and the Bragg wavelength shift.

We calculated the average peak wavelength when different DC voltages are applied to the sensor. From the analysis of Fig. 6, it was possible to observe that the maximum error was 77.1 V. This error can be attributed to inaccuracies of the system as well to uncertainties of the commercial interrogation system.

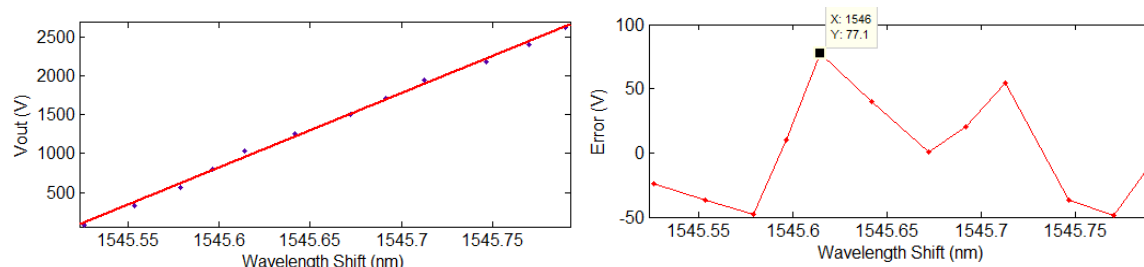


Fig. 6.:Error of the DTG-PZT sensor with DTG soldered to the structure.

5. Conclusions

In order to improve the accuracy of the proposed sensor, we demonstrated a novel laser ablation technique capable of metallizing a DTG sensor to be soldered on the sensor system structure, providing mechanical stability. The experiment showed the sensor sensitivity after copper coating thickness on the DTG surface. The results presented show that this sensor may be used as a voltage sensor in distribution lines.

The metalized DTG was soldered to a PZT crystal stack and a variable voltage was applied to the DTG-FBG set-up in order to record the Bragg wavelength shift. In the sequence, we calculated the sensitivity, dispersion, accuracy and the error of the sensor system.

The experimental results present a difference between experimental and theoretical sensitivity values. This difference occurs due to the elasticity of the epoxy layer between the PZT ceramics and the aluminum structure that might easily be relaxed by a few nanometers, which is enough to lower the DTG displacement, resulting in a lower sensitivity. To solve this problem, a new setup is under development, in order to eliminate the epoxy glue between the PZT stack and the aluminum structure.

References

- [1] W. R. Habel, "Standards and guidelines – could they enhance user confidence in fibre sensor technology", Third European Workshop on Optical Fibre Sensors, 2007.
- [2] E. Lidner, J. Morbitz, C. Chojetzki, M. Becker, S. Bruckner, K. Schuster, M. Rothhardt, R. Willsch and H. Bartelt, "Tailored draw tower fiber Bragg gratings for various sensing applications", Third Asia Pacific Optical Sensors Conference, vol. 8351, pp. 1-7, 2012.
- [3] F. Mafune F, J. Y Kohno, Y. Takeda, H. Sawabe, "Formation and size control of silver nanoparticles by laser ablation in aqueous solution", Journal of Physical Chemistry B, vol. 104, pp. 9111-9117, 2000.
- [4] D. Poondi , T. Dobbins ., J. Singh , "A novel laser-liquid-solid interaction technique for synthesis of silver, nickel and immiscible silver-nickel alloys from liquid precursors", Journal of Materials Science, vol 35, pp. 6237-6243, 2000.
- [5] M. S. Sibbald, G. Chumanov, T. M. Cotton, "Reduction of cytochrome c bt halide-modified laser-ablated silver colloids", J. Phys. Chem., vol 100, pp. 4672-4678, 1998.
- [6] F. Rossignol, Y. Nakata, H. Nagai, S. Konno, T. Okutani, M. Suzuki, "New synthesis method of poly (diphenylsilylenemethylene) thin films", Chem Mater; vol. 10, 2047-2049, 1998.
- [7] R. Sekar, B. N. Shivananju, K. P. Lakshmi, S. Asokan., "Dual function performance of fiber Bragg gratings coated with metals using flash evaporation technique". Optical Fiber technology, vol. 18, pp. 183-185, 2012.

- [8] Y Li, W. Liu, Y. Feng, Z. Hua. "Ultrasonic embedding of nickel-coated fiber Bragg grating in aluminium and associated sensing characteristics", *Opt. Fiber Technol.*, Vol. 18, pp. 7-13, 2012.
- [9] S-H. Chen, J. Lin. "The formation of micro/nanoparticles in laser-enhanced electroplating with continuous-wave and pulsed Nd-YAG laser interactions", *Optics & Laser Technology*, vol. 44, pp. 169-176, 2012.
- [10] D.P. Henkel, "Thermal spray and adhesive bonding of optical fibers to high temperature composite materials", *Adv. Mater. Opt. Electron.*, vol. 4, pp. 327-335, 1993.
- [11] Y. P. Kathuria, Y., "*Pulsed Nd-YAG laser deposition of TiN and TiAlN coating*", vol. 12, pp. 506-511, 2011.
- [12] R. G Song, M. Yamaguchi, O. Nishimura, M. Suzuki., "Investigation of *metal nanoparticles produced by laser ablation and their catalytic activity*", *Applied Surface Science*, vol. 253, pp. 3093-3097, 2007.
- [13] B. A. Ribeiro, M. M. Werneck, J. L. Silva-Neto, "*A Novel Optimization Algorithm to Demolutate a PZT-FBG sensor in AC High Voltage Measurements*", *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, pp. 1259-1264, 2012.
- [14] T. Habisreuther, E. Hailemichael, W. Ecke, I. Latka, K. Schroder, C. Chojetzki, K. Schuster, M. Rothhardt, and R. Willsch, "*ORMOCER coated fiber-optic Bragg grating sensors at cryogenic temperatures*," *IEEE Sensord Journal*, vol.12, no. 1, pp. 13-16, 2012.
- [15] A. D. Kersey, M. A. Davis, "*Fiber grating sensors*", *Journal of Ligthwave Technology*", vol. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- [16] J-F. Xie, H. Zhang, Z. Zhu, J-N Xu, R-H Hu and L-F. Song, "A study of the temperature sensitivity of fiber Bragg gratings after metalization, *Smart Materials and structures*", IOP Publishing, vol.16, pp. 1837-1842, 2007.
- [17] Y. Li, Z. Hua, F. Yan, P. Gang, "Metal coating of fiber Bragg grating and the temperature sensing character after metallization", *Optical fiber technology*, vol 15, pp. 391-397, 2009.
- [18] *Instrument Transformers-Part 5-Capacitor Voltage Transformers*, IEC60044-5, 2004.

Novel Optimization Algorithm to Demodulate a PZT-FBG Sensor in AC High Voltage Measurements

Bessie de Assumpção Ribeiro, Marcelo Martins Werneck, and José Luiz da Silva-Neto

Abstract—The application of optical fiber sensors in high-voltage environments has long been recognized as being useful, due to many properties of silica, such as insulation and electromagnetic induction immunity. Thus, optical voltage transducers offer many improvements on traditional inductive and capacitive voltage transformers, such as linear performance, wider dynamic range, lighter weight, smaller size, and improved safety. In this paper, we aim toward a power-line voltage transformer application by using a piezoelectric ceramic crystal stack together with a fiber Bragg grating (FBG) sensor to construct the core of a potential transformer for 13.8 kV class. For the AC demodulation process, we develop a mathematical model to identify the optimization parameters through a novel algorithm to improve sensitivity on FBG demodulation. This new scheme is simple, reduces the cost of the setup implementation and shows a solution to circumvent the temperature drift of the system.

Index Terms—Fabry-Perot filter, fiber Bragg grating (FBG) sensor, high-voltage measurement, optical voltage transformer, piezoelectric ceramic (PZT), twin grating.

I. INTRODUCTION

INSTRUMENT transformers such as voltage transformers (VTs) and current transformers (CTs) are widely used in electric power facilities like as substations and electric power plants by providing protection, monitoring and metering voltage and current, respectively. Their high-tech substitutes, the optical voltage transformer (OVT) and optical current transformer (OCT) are available today from a few companies.

They present many advantages over the conventional ones, including linearity, lighter weight, smaller size, and improved safety, as the only connection between high potential and ground potential is made with an optical fiber cable, which is an insulating material [1]–[3].

Manuscript received May 22, 2012; revised October 17, 2012; accepted November 19, 2012. Date of publication January 21, 2013; date of current version February 11, 2013. The associate editor coordinating the review of this paper and approving it for publication was Dr. M. Nurul Abedin.

B. de A. Ribeiro is with the Instrumentation and Photonics Laboratory, Electrical Engineering Programme, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 22241-200, Brazil (e-mail: bessie@lif.coppe.ufrj.br).

M. M. Werneck is with the Instrumentation and Photonics Laboratory, Electrical Engineering Programme, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro 22241-200, Brazil (e-mail: werneck@lif.coppe.ufrj.br).

J. L. da Silva-Neto is a Researcher and Professor at the Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 22241-200, Brazil (e-mail: luizneto@lif.coppe.ufrj.br).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/JSEN.2012.2232290

OVTs and OCTs apply Pockels and Faraday effects respectively, which also have some drawbacks, including mechanical and optical instability, due to vibration and temperature [4], [5].

The application of optical fiber sensors in high voltage lines has long been recognized as being useful, due to the insulation property of silica. However, as both electric and magnetic fields do not interfere in fiber waveguide properties, some other transducer should be used in conjunction with the optical fiber to measure voltage or current. In this scenario, the piezoelectric ceramic (PZT) is of utility because of its electromechanical property.

Ning et al. [6] was the first to use a PZT crystal together with an optical fiber sensor applied to high voltage. The authors proposed a scheme, using a fiber-optic Michelson interferometer together with a PZT, to measure current in a high voltage line. In their scheme, the transducer was a current transformer (CT), the secondary voltage of which was applied to the PZT. Later, the same group improved the measuring system, by substituting the interferometer with an FBG [7].

The previous two citations applied a PZT scheme to measure current; however, a group from the ABB Electric Systems Technology Institute first introduced the concept of using this scheme to measure voltage in 1999 [8]. The fiber with the inscribed FBG was bonded longitudinally in a PZT disk form. Niewczas et al. [9] demonstrated the use of PZT together with FBG focused on monitoring the drive voltage of electrical pumps destined for the oil and gas industry.

Finally, Hatta et al. [10] also applied a PZT crystal as a sensor, which was interrogated by a singlemode-multimode-singlemode fiber structure to measure low voltages.

However, the studies described above were not aimed towards power line voltage transformer (VT) application, nor did they address issues such as sensitivity or temperature drift. A recent work by our group [11] presented a PZT stack together with an FBG, which demonstrated a setup capable of measuring up to 8.000 V_{DC} with an accuracy appropriated to a VT application, according to the International Electrotechnical Commission (IEC) 60044-5 [12].

In this paper, we aimed to develop a power line VT with an appropriated accuracy to comply with the IEC by using a PZT crystal stack composed of PZT rings in a parallel polarization scheme. For the demodulation process we improved a technique known as edge filter demodulation by the use of a novel algorithm to calculate the optimum position of

the demodulation filter which optimizes and maximizes the AC demodulation process. As temperature variations also displace the Bragg wavelength, we propose a new demodulation scheme improving the technique known as twin grating filter.

II. FBG AND PZT THEORY

FBGs are formed by the periodic modulation of the refraction index of the fiber core in a longitudinal direction. In the FBG, the reflected light signal meets the Bragg condition, given by [13]

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

where, n_{eff} is the effective index of refraction of the fiber core and Λ is the modulation period of the refraction index. Longitudinal deformation, due to an external force, may change both Λ and n_{eff} , by increasing the pitch of the grating and by the photo-elastic effect, respectively. Variation in temperature also changes both parameters, due to the thermo-optic effect and thermal dilation. The well-known Bragg equation establishes the relationship between the Bragg wavelength, strain, and temperature applied to the FBG [14], [15]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\frac{\Delta L_{FBG}}{L_{FBG}} + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (2)$$

where, $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ is the relative Bragg center wavelength displacement, L_{FBG} is the fiber length (i.e., the distance between the two fixing points of the fiber containing the FBG), ΔL_{FBG} is the fiber displacement, ΔT is the variation in temperature, ρ_e is the photo-elastic coefficient, equals to 0.22, α is the thermal expansion coefficient of silica, equals to $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ and η is the thermo-optic coefficient, representing the temperature dependence of the refractive index, equals to $8.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. All these constants are standards for silica fibers with a germanium doped core.

By substituting these constants in (2) and using a central wavelength of $\lambda_B = 1538.48$ nm, we obtain the sensitivity of the FBG with temperature and strain

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 14.1 \text{ pm}/^\circ\text{C} \quad (3)$$

and

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} = 1.2 \text{ pm}/\mu\text{m}. \quad (4)$$

PZT is an acronym for the lead (Plumbum) Zirconate Titanate piezoelectric ceramic. The basic electromechanical equation for a piezoelectric ceramic is [16]

$$\frac{\Delta X}{X} = d_{33}E \quad (5)$$

where, $\Delta x/x$ is the relative change in length of a ceramic element, E is the electric field [V/m] applied to the PZT electrodes, and d_{33} is the thickness displacement constant. For a PZT-4 in disk or ring form d_{33} equals to 300 pm/V.

III. PZT-FBG SENSOR

Fig. 1 shows a sketch of the mechanical setup. The ceramic stack used ten PZT rings with 4 mm in thickness separated by electrodes connected in parallel, so that each piece of ceramic received the same voltage. A double aluminum structure was

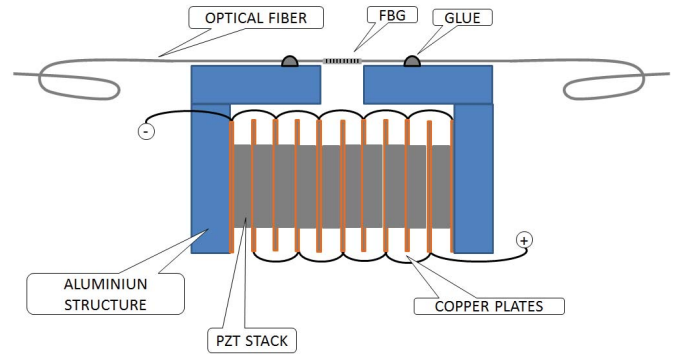


Fig. 1. Mechanical setup comprised of 10 ceramic disks in a stack. Polarization is applied so that all disks receive the same voltage.

used to accommodate the ceramic stack and a 28-mm-length fiber (L_{FBG}) with a FBG sensor inscribed on it was bonded to the structure, as shown in Fig. 1.

An FBG, with a central wavelength of 1536.18 nm, was stretched to 1538.48 nm before being bonded to the aluminum structure, to allow measurements in both directions, since the PZT experiences positive and negative displacements when subjected to an AC voltage.

To calculate the sensitivity of this setup, we rewrite (5) including n , which is the number of PZT elements

$$\Delta W = nd_{33}V. \quad (6)$$

Since the FBG is bonded between the two fixing points of the stack, the displacement given by (6) is transmitted to the fiber, so that

$$\Delta W = \Delta L_{FBG}. \quad (7)$$

Now, by combining (2), (6), and (7), and considering $\Delta T = 0$ (constant temperature environment), we obtain

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - \rho_e)\frac{nd_{33}V}{L_{FBG}}. \quad (8)$$

Substituting the PZT constants in (8), we obtain the sensitivity

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta V} = 128.6 \text{ pm}/\text{kV}. \quad (9)$$

Notice in (8), that the smaller the L_{FBG} the greater the strain experienced by the FBG and, consequently, the greater the sensitivity. The design of the stack ends incorporated this fact.

This transducer is able to measure both DC and AC. However, commercial Bragg Meters can only demodulate quasi DC signals and so, for AC signals we used a different approach, as shown in the next section.

IV. OPTICAL SETUP

As mentioned before, commercial OSAs are too slow to respond to the 60-Hz line frequency, and so we used the interrogation system shown in Fig. 2. A high voltage AC source was used to supply the input signal to the PZT electrodes. A broadband light source (ASE) was used to illuminate the FBG-PZT sensor via an optical circulator. The reflected spectrum

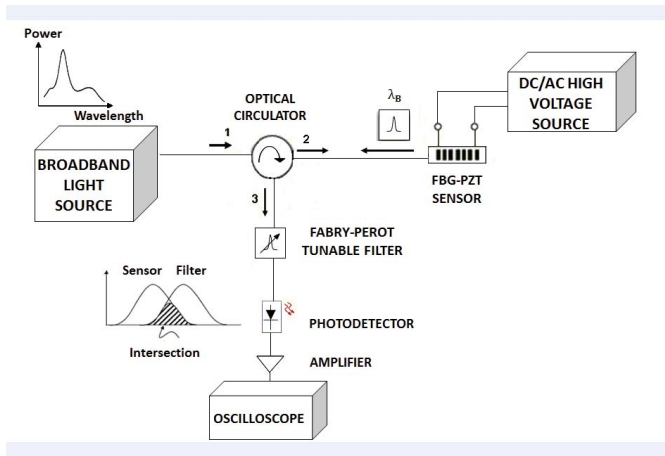


Fig. 2. Schematic diagram of the setup for ac voltage using a tunable Fabry-Perot filter.

of the sensor passes through a Fabry-Perot (FP) tunable filter with a 0.89 nm bandwidth. The resultant signal at the output of the FP filter is the convolution between the reflected FBG spectrum and the FP transmission spectrum. The optimum position of the center wavelength of the FP filter is chosen by a novel algorithm described in the Section V. The dashed area on the spectrum drawing to the left of the FP filter in Fig. 2 is the intersection between the spectrum of the reflected signal and the band pass of the FP filter. The integral of this area is the total light power that exits in the filter and that reaches the photodetector. The intersection point of the two spectra occurs at a linear portion of each curve; therefore, when the sensor spectrum moves, the superimposed area varies linearly.

Since the sensor spectrum oscillates at 60 Hz, the intersection area will increase and decrease accordingly, and the output power of the filter will also oscillate at the same frequency. After this demodulation process, the amplitude (power) of the light signal is proportional to the instantaneous input voltage applied to the PZT. The signal is then fed into an amplified photodetector, which is analyzed by an oscilloscope.

V. OPTIMIZATION ALGORITHM

Sensitivity is often an aspect of paramount importance in any measurement system. Its determination is critical to attain the predefined measuring performance, and the capacity of quantitatively measuring the physical stimulus of interest. Sensitivity is influenced by the physics inherent to the sensor and transducer elements, as well as the specific implementation of the chain of measurement e.g. the filter and photodetector stability, the spectrum analyzer resolution and the system thermal drift.

Regarding the system under study, some instances, in principle, might be tailored specifically for the application.

- 1) The operating point.
- 2) The Quality Factor of the filter.
- 3) The bandwidth of the FBG sensor.
- 4) The PZT ceramic parameters.

The operating point may be easily altered by means of the FP tunable filter or by a twin FBG used as a filter. In

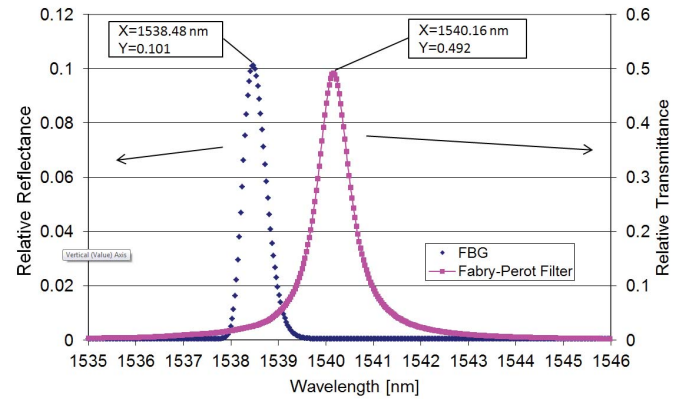


Fig. 3. Spectral curves for the Fabry-Perot filter, $F_{FP}(\lambda)$, and the FBG, $F_{FBG}(\lambda)$.

this last case, the FBG may be mechanically stretched to move its central wavelength to the point of interest. Therefore, to perform the proof of the concept with the setup shown in Fig. 2, it seems reasonable that effort should be initially focused on the optimization of the operating point, regarding better sensitivity, by adjusting the central wavelength of the filter.

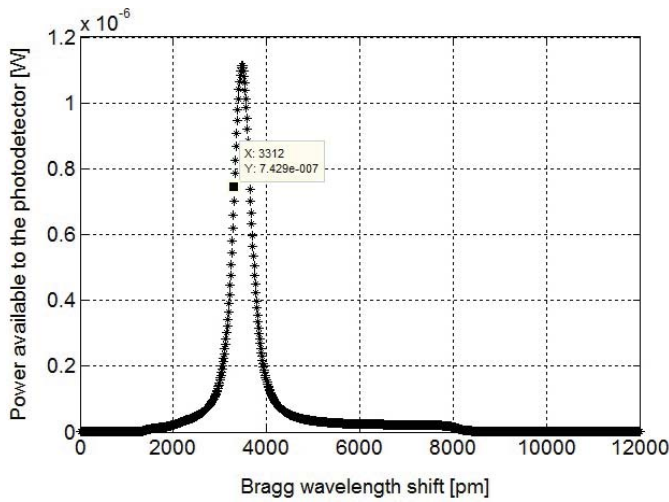
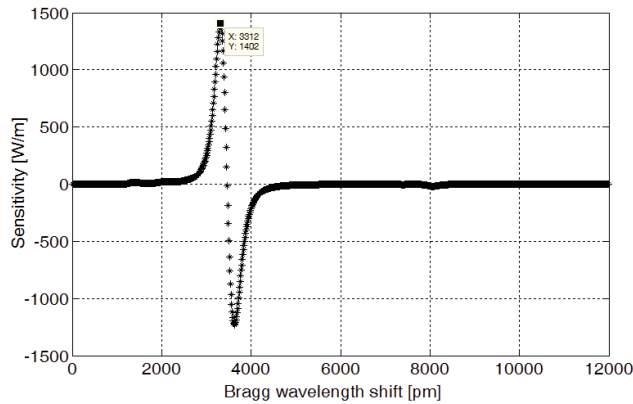
Hence, a procedure was adopted to establish the best operating point, i.e., the point of maximum sensitivity over the spectral characteristics of the filter under quiescent conditions. Consequently, for a small enough dynamic range of the stimulus around the operating point, the spectral interaction between the filter and the FBG sensor would be optimized.

The spectral curves for the FP filter, $F_{FP}(\lambda)$, and the FBG, $F_{FBG}(\lambda)$, are shown in Fig. 3, where the sensor is at quiescent state. The vertical axes show the relative transmittance of the FP filter and the relative reflectance of the FBG sensor, respectively.

First, the numerical convolution $F_{FP}(\lambda) * F_{FBG}(\lambda)$ is performed to obtain the available power to the photodetector as a function of the wavelength shift. The convolution curve is shown in Fig. 4, with a resolution of 12 pm—the same as the resolution of the spectrum analyzer used. In addition, the operation is performed on the two sequences representing the functions F_{FP} and F_{FBG} , starting at a reference point on one of the sequences. Therefore, the graph in Fig. 4 shows the result of the convolution as a function of the wavelength shift from the reference point.

Subsequently, the derivative $\Delta[F_{FP}(\lambda) * F_{FBG}(\lambda)] / \Delta\lambda$ of the convolution curve is calculated and plotted in Fig. 5. The maximum on this curve represents the amount of wavelength shift needed to attain the optimum sensitivity and, thus, the ideal position of the filter. This point of maximum derivative is also shown in Fig. 4. Finally, the FP filter is tuned so that the quiescent point exactly matches the amount of shift required.

Fig. 5 shows that the maximum sensitivity calculated by the algorithm is 1402 W/m at 3312 pm. This means that a power variation of 1402 pW for each 1 pm of frequency shift, when the filter center wavelength is located at 3312 pm to the right of the FBG center frequency.

Fig. 4. Convolution of $FFP(\lambda)*FFBG(\lambda)$.Fig. 5. Derivative $\Delta[FFP(\lambda)*FFBG(\lambda)]/\Delta\lambda$ of the convolution.

Now it is possible to calculate the theoretical sensitivity for an AC voltage applied to the PZT terminals by using the setup of Fig. 2. To accomplish this, we start by assuming that variation in the voltage applied to the PZT produces a frequency shift on the FBG, according to (9)

$$\Delta\lambda_B = k_1 \Delta V_{in} \quad (10)$$

where, k_1 is the value calculated in (9).

Now, a frequency shift at the input of the filter produces variation in power at its output

$$P_{in} = k_2 \Delta\lambda_B \quad (11)$$

where, P_{in} is the input power at the window of the photodiode and k_2 is the optimum sensitivity calculated by the convolution algorithm, 1402 W/m.

In the next step, the input light power applied to the photodiode produces a photocurrent at its output, given by

$$i = k_3 P_{in} \quad (12)$$

where, k_3 is the photodetector responsivity, which, according to the photodetector datasheet, is 0.95 A/W.

Finally, the output current of the photodiode is amplified by a transconductance amplifier producing a voltage at its output,

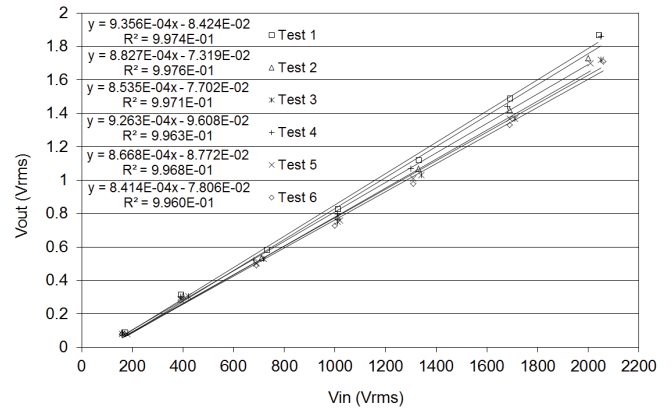


Fig. 6. Relationship between the input and output voltages using the Fabry-Perot filter technique and ac voltage input. Line: one set of measurements.

given by

$$\Delta V_{out} = k_4 i \quad (13)$$

where, k_4 is the transconductance gain of the amplifier given by the datasheet: 4.75×10^6 V/A.

Now, combining (10), (11), (12), and (13) we obtain

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = k_1 k_2 k_3 k_4. \quad (14)$$

By substituting the constants, we obtain the transfer function of the setup

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = 0.813 \times 10^{-3}. \quad (15)$$

VI. RESULTS AND DISCUSSION

A. AC High Voltage Results With Fabry-Perot Filter

The first experiment used the setup of Fig. 2, with the FP filter being adjusted to the optimum position, according to the wavelength calculated by the algorithm. By applying an AC voltage to the PZT and measuring the output voltage of the amplifier on six consecutive tests, it was possible to produce the plots shown in Fig. 6.

The averaged sensitivity was 0.884×10^{-3} , based on the six measurements shown in Fig. 6, which was very close to the theoretical sensitivity predicted by (15): 0.813×10^{-3} .

The reason for each test presenting a different slope is that, as the test goes on, the temperature keeps increasing, due to the dissipation factor ($\tan \delta$) of the PZT ceramic, which represents its capacitive losses. As the temperature changes, so does λ_B , according to (3), and as λ_B drifts, the operating point travels along the graph of Fig. 4. For each new position of the operating point in Fig. 4, the system presents a different gain, which is shown in Fig. 5. The peak in Fig. 5 is the maximum gain, which is indicated by k_2 in (11); hence, as temperature increases, k_2 declines, consequently producing a different locus, as shown in Fig. 6. Of course, this effect is not present when using DC voltages, as the current flows in one direction to charge the capacitor, and consequently does not keep dissipating heat during the tests. In order to circumvent this process, one must adjust the FP filter so as to track the optimum intersection point given by the algorithm. However,

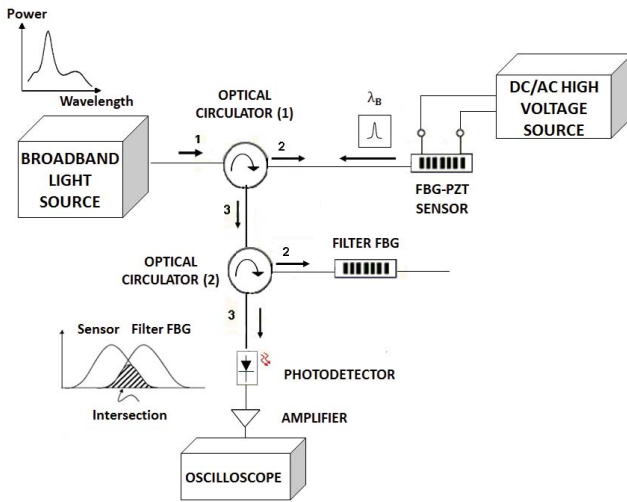


Fig. 7. Schematic diagram of experiment for ac voltage by using twin grating.

because the tuning process of the FP filter is attained by a variable DC power supply and the filter response is sensitive to small variations of the control voltage, this compensation is very difficult to be accomplished. The next section presents another way to track the optimum intersection point.

B. Bragg Demodulation by a Twin Grating

Another way to demodulate AC voltage is by using a twin grating to substitute the FP filter, as shown in Fig. 7. Although twin gratings have been applied for FBG demodulation in many sensing applications [17]–[19], the approaches shown in the literature are quite empirical. However, as we are concerned about sensitivity and accuracy, we developed the mathematical model to identify the optimization parameters.

Notice that the twin FBG filter acts now as a dichroic mirror in this scheme, as opposed to the FP filter which acts by light transmission. The ASE injects light into port 1 of the optical circulator 1. The latter circulates the light to port 2, illuminating the FBG-PZT sensor. The reflection spectrum of the FBG-PZT sensor that returns to port 2 is deviated to port 3, and enters port 1 of circulator 2. The optical circulator 2 deviates the signal to the twin FBG filter, through port 2. Only the superimposed wavelengths (inset graphic) reflect back to circulator 2, which deviates the light to the photodetector through port 3.

This demodulation scheme is very simple, and reduces the cost of the setup implementation; however, the twin FBG must be manufactured at an exact wavelength to produce an optimized effect. Since the FBG fabrication does not allow picometer accuracy, it is not possible to apply this method in practice.

So, in order to tune to the desired wavelength, the twin FBG-filter was mechanically stretched to reach the optimal demodulation point given by the algorithm. The output signal was monitored by an oscilloscope, and the graph is shown in Fig. 8. It is possible to observe a linearity with $R^2 = 0.9973$, but at a lower sensitivity. Although the operating point used was the same as that used in the setup of Fig. 2, the sensitivity

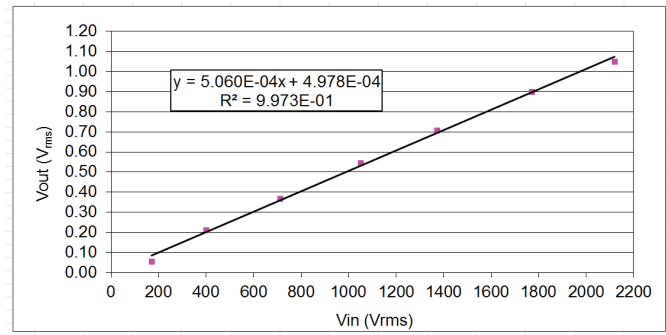


Fig. 8. Relationship between input and output for an ac voltage using the twin FBG technique.

was not the same. The reason for this is that the spectrum of the twin FBG filter is slightly different to that of the FP filter, which also changed k_2 . To obtain an optimum operating point, it would be necessary to run the algorithm every time the twin FBG filter is changed.

As for the tuning process, it is important to recall that one cannot stretch an optical fiber with an FBG in more than 3 nm in displacement, because it will produce a stress in the fiber greater than can be with stood (see, for instance [20]). The ideal solution is to fabricate twin FBGs with center wavelengths of no more than 3 nm apart, and to stretch the one with lower central wavelength until it reaches the optimum wavelength. Alternatively, one could produce two exactly matched FBGs, which is much easier, as there is no need to adjust the inscription plant between the FBG writings.

To circumvent the temperature drift effect shown in Fig. 6, we must measure the PZT temperature by using another FBG, and calculating the respective Bragg drift of the FBG sensor. Then, the twin FBG filter must be displaced accordingly in order to track the optimum intersection point. This can be done by applying heat through a Peltier plate automatically driven by a controlled power supply. This setup is the theme of another work under progress of our team.

VII. CONCLUSION

In this paper, we demonstrated a new measurement scheme for developing an OVT for an AC high voltage line concerned with accuracy and repeatability, which was appropriated to a field instrument that could comply with the standard IEC 60044-5 if industrially manufactured. We also provided the first demonstration of two schemes to demodulate AC voltages, using an FP tunable filter and a twin FBG filter. Finally, a novel computer algorithm was designed and tested with success that determined the optimum tuning of the filters.

Therefore, the main conclusion of this work is that this setup may be used as the core of a practical 13.8 kV-Class VT, as long as temperature compensation is addressed appropriately.

As for the commercial production of an OVT using the techniques proposed here, it is worth recalling that in recent years the extensive development of optical devices for the telecommunication market has improved their reliability and, at the same time, decreased their cost. In addition, the devices

used in our prototypes, such as PZT crystals, FBGs sensors, broadband light source, and an amplified InGaAs photodetector, are not more expensive than the components used in conventional VTs. For this reason, it is considered that the final fabrication costs would not exceed those of conventional VTs.

REFERENCES

- [1] T. Sawa, K. Kurosawa, T. Kaminishi, and T. Yokota, "Development of optical instrument transformers," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 2, pp. 884–891, Apr. 1990.
- [2] T. W. Cease, J. G. Driggans, and S. J. Weikel, "Optical voltage and current sensors used in a revenue metering system," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 6, no. 4, pp. 1374–1379, Oct. 1991.
- [3] A. Klimek, "Optical technology: A new generation of instrument transformer," *Electron. Today*, vol. 1, no. 2, pp. 38–39, 2003.
- [4] N. A. F. Jaeger and F. Rahmatian, "Integrated optics Pockels cell high-voltage sensor," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 10, no. 1, pp. 127–134, Jan. 1995.
- [5] C. Li, X. Cui, I. Yamaguchi, Y. Masayuki, and Y. Toshihiko, "Optical voltage sensor using a pulse-controlled electrooptic quarter waveplate," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 54, no. 1, pp. 273–277, Feb. 2005.
- [6] Y. N. Ning, B. C. B. Chu, and D. A. Jackson, "Interrogation of a conventional current transformer by a fiber-optic interferometer," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 18, pp. 1448–1450, Sep. 1991.
- [7] N. E. Fisher, P. J. Henderson, and D. A. Jackson, "The interrogation of a conventional current transformer using an in-fibre Bragg grating," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 8, pp. 1080–1084, Oct. 1997.
- [8] M. Pacheco, F. M. Santoyo, A. Mendez, and L. A. Zenteno, "Piezoelectric-modulated optical fibre Bragg grating high-voltage sensor," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 777–782, 1999.
- [9] P. Niewczas, L. Dziuda, G. Fusiek, and J. R. McDonald, "Design and evaluation of a preprototype hybrid fiber-optic voltage sensor for a remotely interrogated condition monitoring system," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 54, no. 4, pp. 1560–1564, Aug. 2005.
- [10] A. Hatta, Y. Semenova, G. Rajan, and G. Farrell, "A voltage sensor based on a singlemode-multimode-singlemode fiber structure," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 52, no. 8, pp. 1887–1890, Aug. 2010.
- [11] R. C. B. S. Allil and M. M. Werneck, "Optical high voltage sensor based in fiber bragg grating and PZT piezoelectric ceramics," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 60, no. 6, pp. 2118–2125, Jun. 2011.
- [12] *Instrument Transformers-Part 5-Capacitor Voltage Transformers*, IEC Standard 60044-5, 2004.
- [13] G. Meltz, W. W. Moorey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method," *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 15, pp. 823–825, Aug. 1989.
- [14] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings-Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Norwood, MA: Artech House, 1999.
- [15] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Lightw. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1442–1463, Aug. 1997.
- [16] *Designing With Piezoelectric Transducers: Nanopositioning Fundamentals*, (Physik Instrumente), Karlsruhe, Germany, (2010) [Online]. Available: <http://www.PIceramics.com>
- [17] Y. Zhan, S. Xue, and Q. Yang, "Multiplexed reflective-matched optical fiber grating interrogation technique," *Chin. Opt. Lett.*, vol. 5, no. 3, pp. 135–137, Mar. 2007.
- [18] Z. Jian and Z. Hong, "Matched FBG application research on dynamic sensing and demodulation," in *Proc. Symp. Photon. Optoelectron.*, Aug. 2009, pp. 1–5.
- [19] Y. Zhan, M. Yu, J. Pei, X. Yang, and S. Xiang, "A linearity interrogation technique with enlarged dynamic range for fiber Bragg grating sensing," *Opt. Commun. J.*, vol. 283, pp. 3428–3433, Sep. 2010.
- [20] *Optical Fibres-Part 1-1: Measurement Methods and Test Procedures-General and Guidance*, IEC Standard 60793-1, 2008.



Bessie de Assumpção Ribeiro was born in Rio de Janeiro, Brazil. She graduated as a Telecommunications Engineer from Estácio de Sá University, Rio de Janeiro, in 2008, and the M.Sc. degree from the Electrical Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, in 2011. She is currently pursuing the D.Sc. degree with the Electronic Engineering Program, Photonics and Instrumentation Laboratory (LIF), Federal University of Rio de Janeiro.

Her current research interests include fiber optics sensors and electronic instrumentation.



Marcelo Martins Werneck was born in Petrópolis, Brazil. He received the B.Sc. degree in electronic engineering from the Pontifícia Universidade Católica of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, in 1975, and the M.Sc. degree from the Biomedical Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Brazil, in 1977, and the Ph.D. degree from the University of Sussex, Brighton, U.K., in 1985.

He is currently a Lecturer and Researcher at UFRJ, where he has been since 1978, and he is the coordinator of the Instrumentation and Photonics Laboratory, Electrical Engineering Program, UFRJ. His current research interests include fiber optics, sensors, transducers, and instrumentation.



José Luiz da Silva-Neto was born in Rio de Janeiro, Brazil. He received the B.Sc. and M.Sc. degrees from the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, in 1989 and 1993, respectively, and the Ph.D. degree from Université Laval, Quebec, Canada, in 1999.

He is currently a Lecturer and Researcher with the Instrumentation and Photonics Laboratory, UFRJ.



**XXII SNPTEE
SEMÍNÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GTM/25
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - XIII

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES -
GTM**

**AVANÇOS NO DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSFORMADOR DE POTENCIAL ÓPTICO PARA APLICAÇÃO
EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO**

**Bessie de Assumpção Ribeiro(*)
UFRJ/COPPE/LIF**

**Marcelo Martins Werneck
UFRJ/COPPE/LIF**

**José Luis da Silva Neto
UFRJ/COPPE/LIF**

RESUMO

Transformadores de Potencial Óptico (TPO) oferecem muitas vantagens em relação à tecnologia convencional, tais como isolamento galvânico, imunidade à interferência eletromagnética, ampla faixa dinâmica, baixo peso, estrutura compacta, além do elevado nível de segurança. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um TPO da classe de 13.8 kV usando uma tecnologia híbrida baseada em Redes de Bragg (FBG) e cerâmicas piezoelétricas (PZT). A sensibilidade experimental obtida mostra uma dependência linear entre o deslocamento no comprimento de onda de Bragg e a tensão CC aplicada. O estudo da incerteza nos resultados obtidos mostram que o erro em tensão está próximo da precisão de 0.2% necessários para atender a norma IEC 60044-5 nas medições em corrente contínua. O trabalho utiliza um procedimento de controle para o cálculo do ponto ótimo de operação de um filtro Fabry Perot, que otimiza e maximiza o processo de demodulação nas medidas em tensão CA.

PALAVRAS-CHAVE

Sensores a redes de Bragg, FBG, PZT, Filtro de Fabry Perot, Transformadores Ópticos

1.0 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias visando a melhoria no desempenho, proteção, segurança e a redução das perdas nos sistemas elétricos tem sido objeto de estudos e pesquisas recentes. A avaliação e monitoramento dentro das linhas de transmissão além de garantirem a manutenção dos sistemas elétricos prevêm possíveis interrupções e falhas. Atualmente a medição, a avaliação do desempenho e a supervisão são realizadas através dos transformadores convencionais e estão divididos em duas categorias: os Transformadores de Potencial (TPs) e os Transformadores de Corrente (TCs).

Com base em uma tecnologia fotônica passiva, os Transformadores de Potencial Ópticos (TPOs) e Transformadores de Corrente Ópticos (TCOs) foram desenvolvidos para substituir os TPs convencionais [1]. Os TPOs usam o efeito Pockels ou efeito eletro-óptico característico da rotação da polarização da luz em função do campo elétrico. Para detectar o sinal óptico, a polarização Pockles é convertida em modulação da intensidade de luz usando polarizadores, conforme descrito por [2].

Dentre as vantagens que garantem flexibilidade à tecnologia óptica em relação a tradicional destacamos a não necessidade de energia elétrica no ponto de sensoriamento; a imunidade à interferência eletromagnética em alta e baixa frequência; as medidas em tempo real garantindo a otimização do processo de manutenção; a segurança e confiabilidade garantidos à equipe de operação de linhas de transmissão, além do baixo peso e da estrutura compacta de uma fibra óptica [3]. Outro ponto relevante em relação aos TPs convencionais é em relação aos transientes nas linhas que podem gerar sobretensões nos transformadores resultando em danos aos equipamentos

(*) Rua Horácio de Macedo, n° 2030 – sala 036 - Bloco I2000 – CEP 21941-598 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2562-8200 – Fax: (+55 21) 2562-8200 – Email: bessie@lif.coppe.ufrj.br

dentro das subestações em caso de explosões. Aplicações de novas soluções usando fibras ópticas surgem como um método de controle de sobretensões para a proteção dos sistemas elétricos.

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um TPO usando uma tecnologia híbrida baseada em Redes de Bragg em fibra óptica (FBG) e cerâmicas piezoelétricas (PZT). O sistema é utilizado como o núcleo de um TPO da classe de 13.8 kV e usa um cristal PZT que atua como um transdutor de tensão e uma FBG como sensor de deslocamento em função da tensão aplicada aos terminais do sensor. A sensibilidade experimental obtida mostra uma dependência linear entre o deslocamento no comprimento de onda de Bragg e as tensões CC aplicadas ao sensor. O trabalho utiliza um procedimento de controle para o cálculo do ponto ótimo de operação de um filtro Fabry Perot (FP), que otimiza e maximiza o processo de demodulação nas medidas de tensão CA.

2.0 - REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA E CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS

2.1 Teoria dos sensores FBG

A tecnologia de Redes de Bragg (FBG) é uma das mais populares opções em sensores a fibra óptica para medidas de tensão, temperatura e muitas outros mensurandos. As redes de Bragg são formadas por uma modulação periódica no índice de refração do núcleo da fibra óptica ao longo de uma direção longitudinal. Devido à essas modulações periódicas, a luz guiada ao longo do núcleo da fibra será refletida por cada grade e vai somar à reflexões oriundas de outras grades na direção contrária, satisfazendo a condição de Bragg dada por:

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

Na Equação (1) λ_B representa o comprimento de onda de Bragg do espectro refletido quando um sinal luminoso incide na FBG. Este valor é função do índice de refração efetivo do núcleo da fibra (η_{eff}) e do período de modulação do índice de refração (Λ) [4].

A deformação longitudinal, devido a uma força externa pode mudar tanto Λ quanto η_{eff} , portanto, usando uma FBG como um sensor é possível obter medidas de tensão, temperatura, pressão, vibração, deslocamento, etc através da imposição de alguma perturbação na grade resultando em uma mudança no comprimento de onda de Bragg, que pode então ser utilizado como um parâmetro transdutor.

A equação de Bragg estabelece a relação entre o comprimento de onda de Bragg, a deformação e a temperatura aplicada a uma FBG [5]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\epsilon_{FBG} + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (2)$$

sendo ϵ_{FBG} o deslocamento longitudinal da fibra, ΔT a variação de temperatura, ρ_e o coeficiente foto-elástico, α o coeficiente de expansão térmica da sílica e η o coeficiente termo-óptico.

Supondo uma fibra de comprimento L com uma FBG inscrita, se aplicarmos uma extensão (ΔL) na fibra, produzirá uma deformação igual a $\Delta L/L$ que representa o deslocamento longitudinal da fibra (ϵ_{FBG}). Do mesmo modo, uma FBG de comprimento L_{FBG} irá experimentar uma deformação igual a $\Delta L_{FBG}/L_{FBG}$. Como a FBG está inscrita na fibra temos que:

$$\epsilon_{FBG} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta L_{FBG}}{L_{FBG}} \quad (3)$$

Substituindo as constantes da Tabela 1 na Equação (2) e usando uma FBG com comprimento de onda central de 1550 nm, obtém-se a sensibilidade da FBG com o deslocamento:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\epsilon} = 1,2\text{pm}/\mu\epsilon \quad (4)$$

2.2 Fundamentos da piezoeletrecidade

A piezoeletrecidade é a propriedade que certas substâncias cristalinas possuem de gerar cargas elétricas quando estão submetidas à uma força mecânica ou produzir uma deformação mecânica quando um campo elétrico é aplicado em seus terminais, atuando como transdutores de tensão.

A sigla PZT é uma abreviação para cerâmicas policristalinas compostas de íons tetravalentes de Chumbo, Zircônio e Titânio e uma das vantagens do emprego de cerâmicas PZT na fabricação de sensores é o fato de que estas não exigem uma fonte de alimentação externa para operar sendo uma das principais motivações para o uso na detecção de sinais de baixa potência [6].

A deformação da espessura do PZT é dada pela constante d_{33} que representa a deformação sofrida pela cerâmica na direção 3 à partir da incidência de um campo elétrico nesta mesma direção. A relação entre a variação de espessura (Δw) da cerâmica em função da tensão aplicada aos eletrodos do PZT é dada por:

$$\frac{\Delta w}{w} = d_{33} E \quad (5)$$

Onde w é a espessura da cerâmica, E é o campo elétrico aplicado aos eletrodos do PZT e d_{33} é o coeficiente de deslocamento na direção de polarização com unidade pm/V.

3.0 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Princípio de Operação

Para a construção do protótipo, foi utilizada uma pilha de cristais PZT como um transdutor de tensão e uma FBG como um sensor de deslocamento. Como descrito anteriormente, esses materiais apresentam uma deformação em suas dimensões, quando um campo elétrico é aplicado em seus eletrodos. Dessa maneira, as deformações a que estes cristais estão submetidos, são convertidas em variações no comprimento de onda de Bragg da FBG colada ao PZT.

A sensibilidade de um transdutor FBG-PZT, que é a relação entre o deslocamento no comprimento de onda de Bragg e o campo elétrico aplicado ao PZT é obtida, partindo-se da Equação (5). Como a FBG está colada ao PZT, ela sofrerá a mesma deformação, assim, combinando a Equação (2) com a Equação (5), e considerando a temperatura ambiente constante ($\Delta T=0$) resulta em:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (1 - \rho_e) d_{33} \frac{V}{w} \quad (6)$$

Na Tabela 1 estão relacionados os parâmetros e as constantes da FBG e das cerâmicas PZT usadas para a construção do protótipo desenvolvido.

Tabela 1- Parâmetros das cerâmicas PZT e da FBG

PZT	
Propriedades Físicas	Valor
Formato	Anel
Tipo	PZT-4H
Constante Piezoelétrica d_{33}	$d_{33} = 300$ pm/V
Espessura da cerâmica	$w = 4$ mm
Máximo Campo Elétrico Direto	1-2 kV/mm
Número de elementos na pilha	$n=10$
FBG	
Comprimento de Onda de Bragg	$\lambda_B = 1538,48$ nm
Coefficiente Foto-Elastico	$\rho_e = 0,22$
Coefficiente de Expansão Térmica	$\alpha = 0,55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Coefficiente Termo-Óptico (dn/dT)	$\eta = 8,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Comprimento da FBG	$L = 28$ mm

Fonte: ALVES, 2010 [7] e OTHONOS *et al.*, 1999 [4]

3.2 Montagem Experimental

3.2.1 Protótipo sensor FBG-PZT

Um desenho ilustrativo do protótipo desenvolvido é mostrado na Figura 1. A montagem foi feita usando uma pilha de cerâmicas PZT separadas por chapas de cobre. Os eletrodos foram organizados em ambos os lados dos discos e foram conectados em paralelo de tal maneira que todos os discos fossem submetidos à mesma tensão. Uma estrutura de alumínio foi usada para acomodar a pilha de cerâmicas e as chapas de cobre, juntamente com uma FBG colada em cima do alumínio, conforme mostra o desenho:

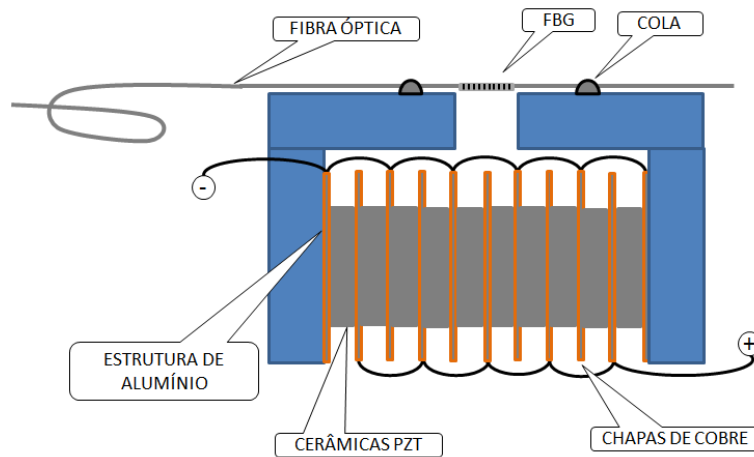


FIGURA 1 – Diagrama esquemático do sensor FBG-PZT.

Para calcular a sensibilidade do protótipo sensor para uma pilha de cerâmicas, reescreve-se a Equação (6) incluindo o número de elementos (n) de cerâmicas PZT.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - \rho_e) \frac{nd_{33}V}{L_{\text{FBG}}} \quad (8)$$

Substituindo as constantes da cerâmica PZT-4, de acordo com a Tabela 1, na Equação (8), obtém-se a seguinte sensibilidade:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta V_{\text{in}}} = 128,6 \text{ pm/kV} \quad (9)$$

Este transdutor é capaz de medir tanto CC quanto CA que corresponde a um deslocamento no comprimento de onda de Bragg de 128,6 pm para cada 1000 V aplicados ao PZT.

3.2.2 Montagem Óptica para medidas em Tensão CC

Uma tensão CC foi aplicada aos terminais do PZT usando uma fonte de alta tensão e a deformação sofrida pelo PZT foi convertida em variações do comprimento de onda de Bragg refletido pela grade ($\Delta\lambda_B$). Para a interrogação destas variações, foi usado um interrogador óptico comercial com resolução de 2 pm, conforme ilustrado na Figura 2.

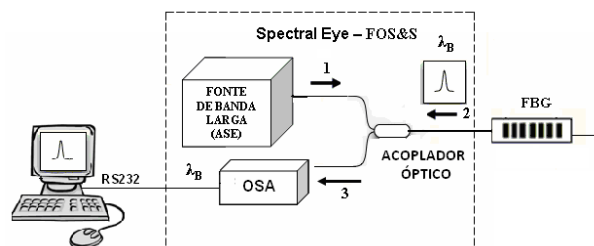


FIGURA 2 – Diagrama esquemático da montagem experimental para medidas com tensão CC.

A linha tracejada na Figura.2 compreende os componentes do interrogador óptico comercial utilizado. O sistema consiste de uma fonte de banda larga ASE (Amplified Spontaneous Emission) usada para iluminar a FBG através da porta 1 de um circulator óptico. O espectro de reflexão da FBG retorna pela porta 2 e é então dirigido, através da Porta 3, para um analisador de espectro óptico (OSA) para então ser detectado. Todos os dados podem ser acessados e monitorados por um computador conectado à porta USB do interrogador óptico.

3.2.3 Montagem Óptica para medidas em Tensão CA

Para aplicações usando tensão CC, um interrogador óptico comercial pode ser utilizado, entretanto, este equipamento é limitado a poucos Hertz, sendo incapaz de responder às frequências das linhas de CA. Para aplicações com tensão CA, foi usada a técnica interferométrica usando um filtro de Fabry Perot (FP), conforme demonstrado no esquema a seguir:

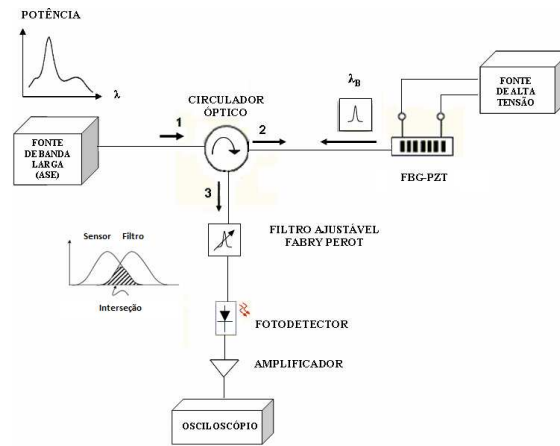


FIGURA 3 – Diagrama esquemático da montagem experimental para medidas com tensão CA.

A fonte de tensão CA foi usada para aplicar o sinal na entrada aos eletrodos. Uma fonte de luz (ASE) foi usada para iluminar o sensor FBG-PZT usando um circulador óptico. A luz incide na FBG através da porta (1) do primeiro circulador óptico e circula até a porta (2). O espectro refletido do sensor retorna através da porta (2) deste mesmo circulador onde então é direcionado para a porta (3) que está ligada ao filtro FP.

A posição do ajuste ótimo para o comprimento de onda central do filtro FP é escolhida pelo algoritmo descrito em [8]. A área sombreada do espectro ilustrado dentro da Figura 3 é a interseção entre o espectro do sinal refletido e o espectro de transmissão do filtro FP. A integral desta área representa a intensidade luminosa total que atinge o fotodetector. A convolução numérica $F_{FP}(\lambda) * F_{FBG}(\lambda)$ é realizada a fim de se obter a potência máxima disponível entregue ao fotodetector em função do deslocamento do comprimento de onda de Bragg.

A curva espectral para o filtro FP, $F_{FP}(\lambda)$ e a FBG, $F_{FBG}(\lambda)$ é mostrada na Figura 3a, onde o sensor está em estado de repouso. O eixo vertical mostra a transmitância relativa do filtro FP e a reflectância relativa do sensor FBG. A curva da convolução após o procedimento de controle está mostrada na Figura 3b.

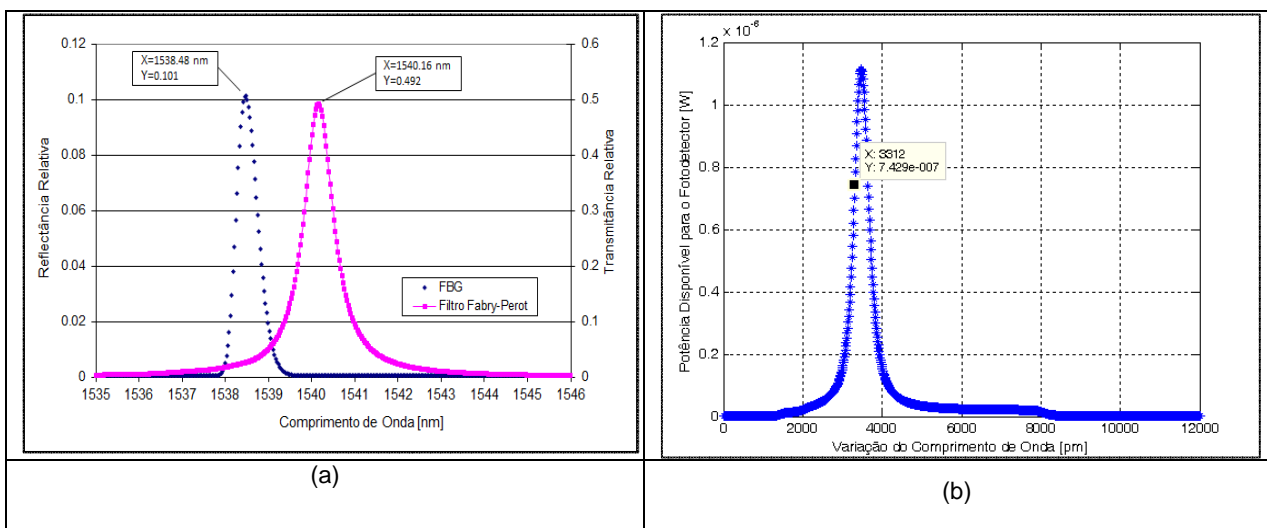


FIGURA 4 – (a) Curva espectral para o filtro Fabry-Perot, $F_{FP}(\lambda)$ e a FBG, $F_{FBG}(\lambda)$. (b) Curva da convolução entre $F_{FP}(\lambda) * F_{FBG}(\lambda)$.

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Medidas em Tensão CC

O primeiro experimento realizado foi submeter o protótipo sensor FBG-PZT as variações de tensão usando uma fonte de alta tensão (15 kV/10 mA) para medir o deslocamento no comprimento de onda de Bragg usando o esquema de interrogação mostrado na Figura 2. A tensão aplicada no PZT variou entre 0 e 2250 V aproximadamente a fim de não exceder os campos elétricos máximo direto e reverso especificados pelo fabricante das cerâmicas. O gráfico da Figura 5, mostra o resultado de 10 medidas realizadas com o sistema proposto. A

sensibilidade linear média foi de 89.09 pm/kV e o coeficiente de correlação (R^2) de 0,9985. Este valor significa um deslocamento no comprimento de onda de Bragg de 89.09 pm para cada 1000 V de tensão aplicados aos terminais do PZT.

A sensibilidade média experimental de 89,09 pm/kV obtida foi menor do que a calculada pelo desenvolvimento teórico desenvolvido em (9): 128,6 pm/kV. A razão para esta diferença pode estar relacionada à elasticidade dos materiais empregados na montagem mecânica. O adesivo usado para colar as cerâmicas é altamente elástico e pode facilmente ceder alguns poucos nanômetros o que já é suficiente para reduzir o deslocamento da FBG, resultando em uma sensibilidade menor do que a teoricamente calculada.

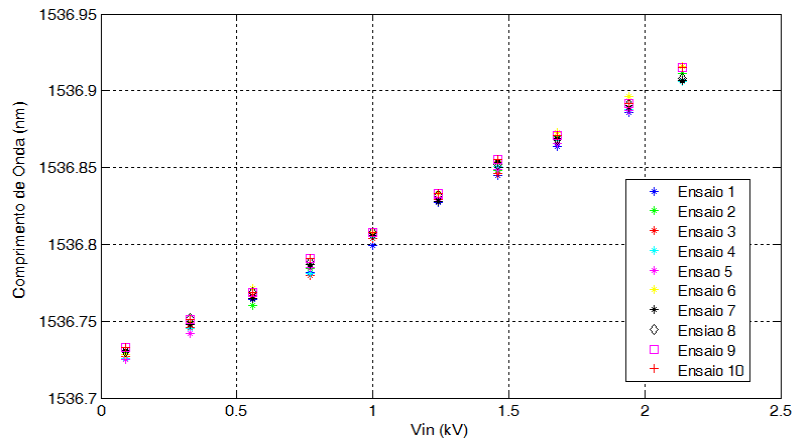


FIGURA 5 – Relação entre a tensão CC aplicada ao sensor FBG-PZT e o deslocamento do comprimento de onda de Bragg.

Usando um procedimento de ajuste linear (Matlab) o estudo da incerteza em relação aos resultados das medidas indicaram um desvio padrão médio de 1,19 pm, que quando dividido pela sensibilidade produz uma incerteza na tensão medida de 13,36 V. Este erro na tensão representa uma incerteza de 0,09% na classe de 13,8 kV, estando de acordo com a precisão de 0,2% necessários para atender a norma IEC 60044-5 [9] nas medições em corrente contínua.

De acordo com o gráfico da Figura 6, o erro residual máximo foi de 0,028 kV. Esta dispersão apresentada nos resultados foi devida as imprecisões do sistema bem como devido a incerteza do interrogador óptico utilizado.

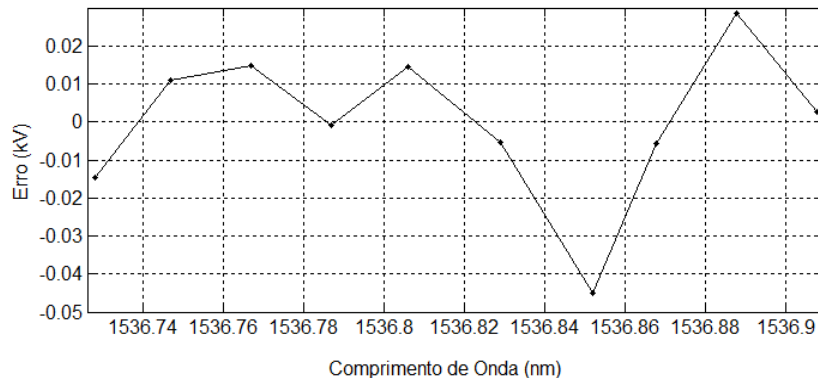


FIGURA 6 – Erros do Transdutor FBG-PZT4 para tensão CC aplicada.

4.2 Medidas em Tensão CA

Os resultados para as medidas em tensão CA consiste em medir as variações no comprimento de onda de Bragg convertidos a partir da tensão de saída do fotodetector como função da tensão alternada de entrada aplicada aos terminais do sistema sensor. Aplicando uma tensão CA (V_{in}) no PZT e medindo a tensão de saída (V_{out}) em 6 ciclos consecutivos, obtém-se o gráfico da Figura 7. O sensor mostra uma resposta linear para uma tensão CA aplicada variando de 0 kV a 2 kV, aproximadamente. A sensibilidade média encontrada foi de 1,07 e coeficiente de correlação (R^2) de 0,9978.

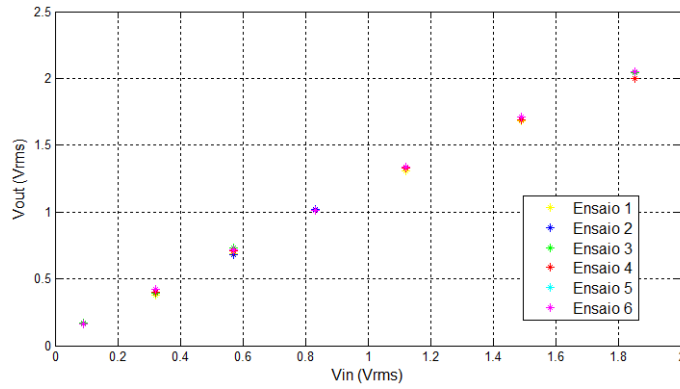


FIGURA 7 – Relação entre a tensão CA aplicada ao sensor FBG-PZT e a tensão de saída.

A Figura 8 mostra o gráfico do erro residual para a média das medidas em CA realizadas no transdutor FBG-PZT4. De acordo com o gráfico o erro máximo encontrado foi de 0.04 kV.

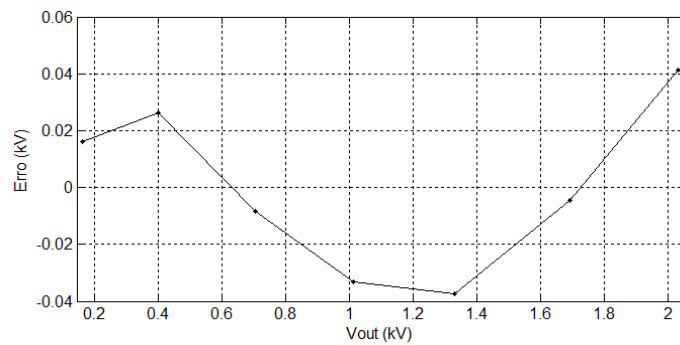


FIGURA 8 – Erros do Transdutor FBG-PZT4 para tensão CA aplicada.

Para a análise das medidas dinâmicas do sinal de saída, é necessário medir a distorção harmônica total (THD) do sinal de entrada. A Figura 9 mostra a forma de onda do sinal do sistema medido. O objetivo desta análise foi investigar a conduta do sinal de entrada (60 Hz) e medir a distorção harmônica na saída, com o incremento da tensão CA aplicada. O valor de 4,72% obtido assegura que a THD nos resultados em tensão CA não está relacionada ao sinal de entrada. Observa-se que a THD ocorre particularmente quando o sinal de entrada alcança uma região não linear da curva de convolução entre o espectro da FBG e o espectro do filtro FP.

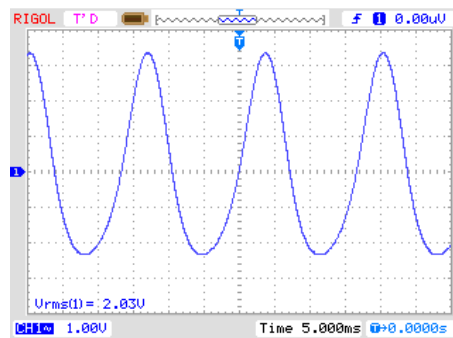


FIGURA 9 – Sinal de saída do fotodetector para o incremento da tensão CA aplicada ao sensor FBG-PZT.

5.0 - CONCLUSÃO

O artigo demonstra um novo sistema a ser utilizado como o núcleo de um TPO da classe de 13.8 kV usando um cristal PZT que atua como um transdutor de tensão e uma FBG como sensor de deslocamento.

Embora os TPOs comerciais tendem a ser mais caros do que os TP convencionais esse estudo objetiva mostrar a viabilidade técnico-econômica do sistema proposto bem como a precisão de 1% obtida. Os resultados obtidos mostram os impactos nas redes de transmissão a serem alcançados com a implementação desta nova tecnologia.

A baixa dispersão das medidas de calibração encontrada nos resultados experimentais mostra que o novo esquema de sensoriamento desenvolvido para aplicações em linhas de transmissão garantem a precisão, a repetibilidade e a confiabilidade das medidas viabilizando sua fabricação e aplicação industrial.

A sensibilidade experimental obtida mostra uma dependência linear entre o deslocamento no comprimento de onda de Bragg e as tensões aplicadas. O estudo da incerteza nos resultados obtidos representa uma incerteza de 0.09% na Classe 13.8 kV estando de acordo com a precisão de 0,2% necessários para atender a norma IEC 60044-5 nas medições em corrente contínua. Também foram avaliados os erros mínimos e máximos residuais do sensor nas medidas em tensão CC e CA.

Para a análise das medidas em tensão CA, a avaliação da distorção harmônica total (THD) foi avaliada usando uma modelagem matemática através da implementação de um procedimento de controle para o cálculo do ponto ótimo de operação de um filtro Fabry Perot, que otimiza e maximiza o processo de demodulação nas medidas em tensão CA

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Cease, T. W., "Optical voltage and current sensors used in a revenue metering system", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 6, n. 4, pp. 1374-1379, Oct. 1991.
- (2) Sawa, T., Kurosawa, K., Kaminishi, T., Yokota, T., "Development of optical instrument transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 2, Apr. 1990.
- (3) Rahmatian, F., Chavez, P. P., "SF₆-free 550 kV combined optical voltage and current transducer system". IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, v. 1, pp. 379-382, Sept. 2003.
- (4) Othonos, A. Kalli, K., "Fiber Bragg Gratings: Fundamental and Applications in Telecommunications and Sensing", Norwood, MA: Artech House, 1999.
- (5) Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M., Koo, K. P., Askins, C. G., "Fiber Grating Sensors", Lightwave Technology, v. 15, n. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- (6) Soman, J., O'Neal, C. B., "Fabrication and Testing of a PZT Strain Sensor for Soil Applications", IEEE Sensors Journal, v. 11, n. 1, Jan. 2011.
- (7) Alves A. H., "Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades", ATCP Engenharia Física, Mar. 2010.
- (8) Ribeiro, B. A., Werneck, M. M. and Silva-Neto, J. L., "A Novel Optimization Algorithm to Demodulate a PZT-FBG sensor in AC High Voltage Measurements", IEEE Sensors Journal, Jan. 2013.
- (9) Instrument Transformers-Part 5-Capacitor Voltage Transformers, IEC60044-5, 2004.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

BESSIE DE ASSUMPÇÃO RIBEIRO atualmente é estudante de doutorado pelo Programa de Engenharia Elétrica (PEE) - COPPE/UFRJ. Possui mestrado em Engenharia Elétrica na área de Instrumentação e Fotônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Formada em Engenharia de Telecomunicações pela Universidade Estácio de Sá. Possui experiência profissional na área de redes de transmissão e sensores a fibra óptica.

JOSÉ LUIZ DA SILVA NETO Possui graduação em Engenharia Elétrica Eletrotécnica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1988), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1993) e doutorado em Engenharia Elétrica - Université Laval - Québec, Canada (1999). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MARCELO MARTINS WERNECK graduou-se em Engenharia Eletrônica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC) em 1975. Obteve seu MSc pelo Programa de Engenharia Biomédica da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1977. Em 1978 ingressou para o Departamento de Eletrônica e Computação da UFRJ onde é professor Associado desde 1978. Seu PhD foi obtido pela University of Sussex, no Reino Unido em 1985. Atualmente é coordenador do Laboratório de Instrumentação e Fotônica do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE onde desenvolve pesquisas na área de instrumentação e transdutores a fibra óptica. Atualmente é também Professor Titular da COPPE e tem desenvolvido pesquisas nas áreas de Engenharia Elétrica e Fotônica, atuando principalmente nos temas Instrumentação eletrônica e sensores a fibra óptica.



Curitiba, 20 May 2015

to
Bessie Ribeiro
RIO DE JANEIRO, Brazil

We are glad to inform your work 9634-325, “A Bragg Grating Tunable Filter Based on Temperature Control System to Demodulate a Voltage Sensor” has been accepted for presentation at the 24th International Conference on Optical Fiber Sensors – OFS-24, to be held in Curitiba (Brazil) from 28 September to 2 October, 2015. Details on the presentation type will be provided in the Conference website opportunely.

Registration to OFS-24 is now open at the conference site (www.ofs24.org). We ask you to register as soon as possible, confirming your participation, so that we can design the final program of the conference. We also remind you to upload your SPIE copyright transfer form using the submission site (use the same submission link on the conference site).

If you receive a message with Reviewer’s comments, please observe the suggestions when preparing your presentation.

We are looking forward to meeting you in Curitiba.

With our best wishes,

Hypolito José Kalinowski
(OFS-24 General Chair)

José Luís Fabris Wojtek J. Bock
(OFS-24 Technical Co-Chairs)

End: Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Av. Sete de Setembro, 3165 80230-901 Curitiba, PR
Tel (41) 3310-4608/4689 cel (41) 9975-1573 e-mail: hjkalin@utfpr.edu.br

A Bragg Grating Tunable Filter Based on Temperature Control System to Demodulate a Voltage Sensor

Bessie A. Ribeiro*^a, Marcelo M. Werneck^a, Fabio B. V. de Nazaré^a, Marcell N. Gonçalves^a

^aLaboratório de Instrumentação e Fotônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Horácio Macedo, 2030, Ilha do Fundão - Centro de Tecnologia, Bloco I – 036, Rio de Janeiro–RJ, Brazil

ABSTRACT

This work presents an innovative automated Fiber Bragg Grating (FBG) based tunable optical filter (TOF) controlled by temperature to be used in temperature compensating schemes in FBG sensing set-ups. Mechanical and electronic aspects are discussed, and the implemented FBG-TOF viability and reliability in sensing systems are showed. The system was employed to demodulate a high voltage AC signal applied to a FBG-PZT sensor, showing good linearity and sensitivity.

Keywords: Tunable Optical Filter (TOF), thermoelectric cell, temperature compensation, twin gratings, piezoelectric ceramic

1. INTRODUCTION

The compact and hybrid solutions for transmission lines have been presented as a viable and economic alternative to attend the necessities of vast urban centers that require energy in high quantities [1]. In the last decades, due to the advantages of optical technology, Fiber Bragg grating (FBG) sensors have been employed in the development of telecommunication systems, Tunable Optical Filters (TOFs) and in the measurement of a number of physical parameters. In our previous work we developed a high-voltage measuring system to be used as the core of a 13.8 kV-class Voltage Transformer (VT) for electric power industry application [2]. The sensor used was an FBG together with a PZT transducer to measure high voltage. The optical signal was demodulated by a Fabry–Perot (FP) tunable filter. These optical filters are relevant in demodulation schemes for FBG signals and several TOF implementations have been proposed in literature [3]. Usually, FBG based demodulation systems do not use tunable filters because they are very expensive. Instead, a technique called fixed-filter or twin Bragg gratings demodulation technique is employed, where the filter FBG spectrum is fixed and the measurement information is obtained by exploring the reflected optical power of the intersection region of both FBGs [4]. Since FBGs are sensitive both temperature and strain, these parameters can be controlled in order to implement and develop FBG-TOF devices. This paper explores a possibility which is the use of the Bragg grating thermal sensitivity as the tuning parameter taking advantage of the linear Bragg wavelength shift when the temperature is varied. Then, the FBG-TOF must be displaced accordingly in order to track the optimum intersection point [2]. This can be done by controlling the FBG temperature through a thermoelectric cell automatically driven by a controlled power supply. As we are concerned about sensitivity and accuracy, the FBG based tunable optical filter is thermally stretched making it possible to the user to set a desired wavelength to demodulate the FBG-PZT sensor.

2. THE TUNABLE OPTICAL FILTER

Twin grating technique has been applied in FBG demodulation in many sensing applications [5], but, these approaches are usually quite empirical. The twin FBG filter acts as a dichroic mirror, as opposed to the FP filter which acts by light transmission. Usually two FBGs are used in measurement systems that employ the fixed filter technique, that is, the FBG-filter remains fixed, and the two FBGs have almost similar reflectivity. In the proposed tunable FBG-based filter developed in this work, the FBG-filter wavelength is displaced through induced temperature (provided by the TEC) in order to track the optimal position. The system consists of an aluminum structure developed to accommodate the FBG and a temperature sensor. Due to its high thermal expansion coefficient (approximately $24 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), aluminum was chosen as the material used in the construction of the structure that will accommodate the FBG. The FBG is then bonded to the aluminum structure, which will expand or contract according to temperature, thus increasing the Bragg wavelength

*bessie@lif.coppe.ufrj.br; phone +55 21 3983-8200; fax +55 21 3983-8200; www.lif.coppe.ufrj.br

range. The assembly is shown in Fig. 1 (a). The LM35 temperature sensor is a precision integrated circuit whose output voltage varies linearly with temperature. In this experiment, the temperature sensor on its basic configuration is designed to obtain an operation range of +2°C to +150°C. The LM35 and the FBG sensor were attached to the aluminum customized assembly, between an insulating glass plate and the TEC. Metal part 1 and metal part 2 are used to fix the structure. An FBG is then positioned inside a cylindrical cavity on the aluminum plate which ensures a good heat transfer between the TEC and the optical fiber. Fig. 1 (b) shows the complete mechanical setup with a heat sink fixed to metal part 2 and a fan, used to dissipate heat when the FBG is being cooled down.

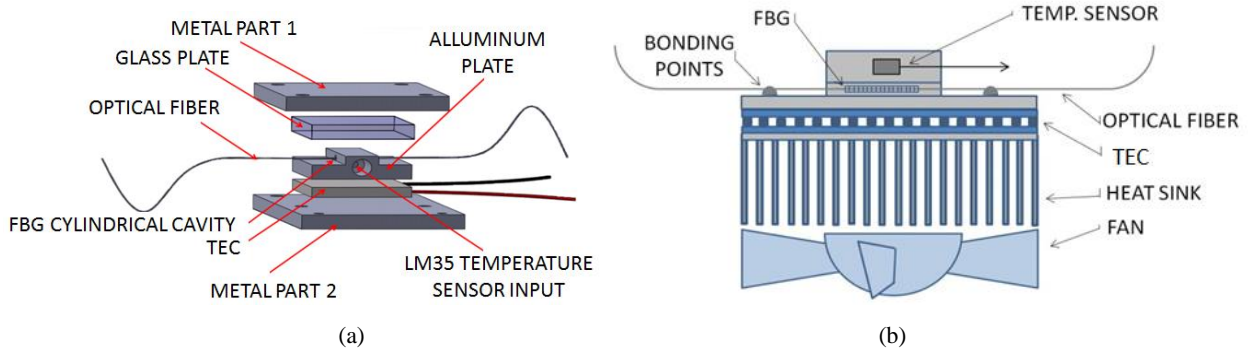


Figure 1. a) The FBG-filter assembly b) Schematic diagram of the FBG-TOF mechanical setup.

The TEC basic operation principle consists in comparing the actual cell temperature with a temperature value informed by the user, i.e. the desired temperature that will produce the desired FBG central wavelength. The control parameter is the difference between the input and the TEC temperature, provided by the temperature sensor. A Proportional Integral Derivative (PID) controller was implemented in a DSP (Digital Signal Processor). The derivative term was essential to increasing the stability of the control system, mainly on high temperatures (closer to 100°C) due to the nonlinear behavior of the TEC module. The error signal e_T , after being processed by the PID, controls the PWM power module which drives the TEC. Temperature references (T_{ref}) in the range of 10°C to 100°C were supplied in steps of 10°C. Fig. 2 (a) shows the block diagram of the control software. Fig. 2 (b) shows the temperature rise time of the thermoelectric cell ($T_{peltier}$) to a 10°C step for temperatures 60°C where the maximum value is 63.19°C, the overshoot is 5.3% and the rise time is 14 s. The controller objective is to track the reference temperature with an error less or equal to $\pm 0.05^\circ\text{C}$. A fine adjustment of the gain and the time constant were necessary in order to obtain a faster response and maintain the error regime within the established range.

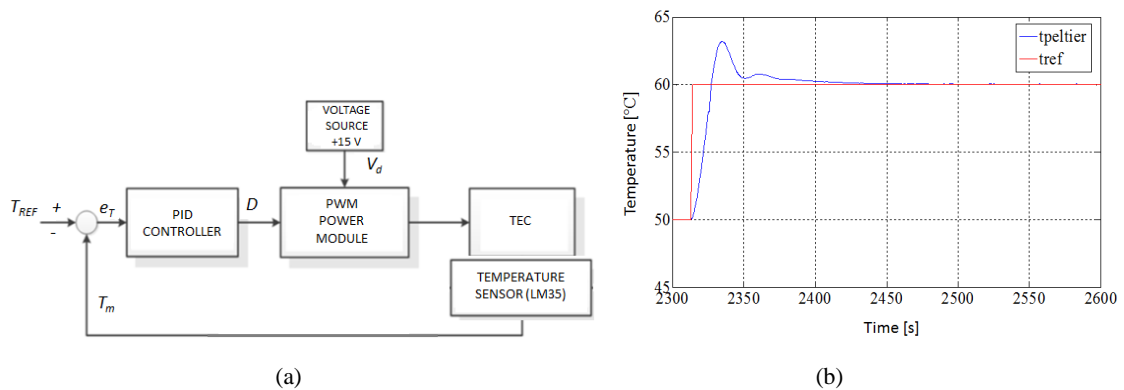


Figure 2. a) TEC control system block diagram. b) Temperature response to a 10°C step from an initial temperature of 50°C.

3. EXPERIMENTS AND RESULTS

An FBG-PZT transducer was built using a scheme similar to the one presented in [2]. It consisted of ten 7-mm-thick PZT rings connected in series, as shown in Fig. 3 (a). When a PZT is submitted to an electric field, there will be a change in its dimensions, according to thickness displacement constant parameter (d_{33}), in this case $d_{33}=550 \text{ pm/V}$. In the present

case, each PZT ring will increase its width by 550 pm for each volt applied to its electrodes. The electrodes were arranged on both sides of the ceramic discs and were connected in a parallel fashion. An aluminum structure was used to fix the ceramic stack and the FBG sensor was bonded on the top of it. In Fig. 3 (b) the two FBG spectra are shown, the one on the left is the FBG-TOF spectrum and the one on the right is the FBG-PZT spectrum.

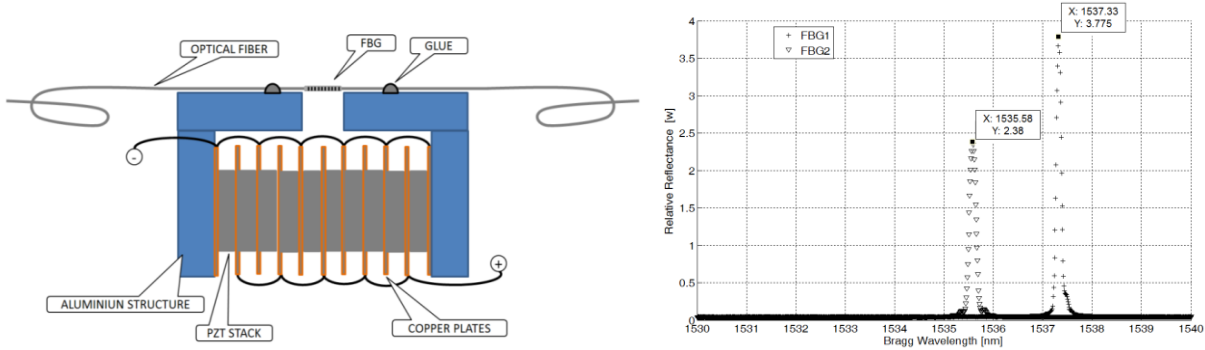


Figure 3. a) The FBG-PZT mechanical setup [2]. b) Spectral curves for FBG-TOF and FBG-PZT.

In order to achieve a proper demodulation, the filter spectrum must intersect the FBG-PZT sensor spectrum at a specific point so as to yield maximum sensitivity. This is done by varying the temperature of the filter using the control system. As the TEC temperature is increased by the control system the intersection spectra is monitored by the Optical Spectrum Analyzer (OSA). Commencing from ambient temperature, a demodulation signal starts to appear at 69°C. The output optical power increases until it reaches a maximum, approximately at 71°C as shown in Fig. 4 (a). This is the position in which the optical power reaches its peak, when the FBG-Filter Bragg wavelength displaced 1.282 nm from its original position. If the temperature keeps increasing, the output optical power starts to decrease as shown in Fig 4 (b), for 72°C up to 74°C. The total output optical power can be obtained by integrating each curve. In Fig. 4 (b) the optical power is presented as a function of the FBG-TOF temperature.

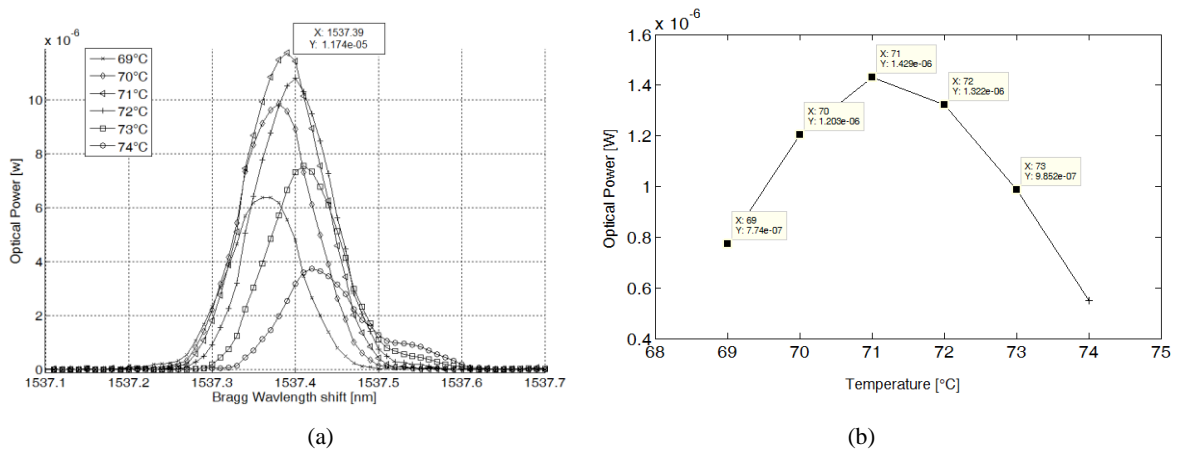


Figure 4. a) Intersection between the spectra of FBG Filter and FBG-Sensor, as monitored by the OSA. Notice that the maximum reflected power is achieved at 71°C and decreasing thereafter. b) Output optical power values as a function of temperature, showing the point where the optical power is maximum.

3.1 AC high voltage measurements results with FBG-Tunable Optical Filter

The optical setup shown in Fig. 5 (a) was employed to demodulate a 2.5 kV AC voltage signal supplied by an AC high voltage power supply and with the FBG-TOF adjusted by the TEC control. The output signal was fed into an InGaAs photodetector which output was amplified before read by an oscilloscope. Fig. 5 (b) shows the measured AC output voltage, correspondent to the high voltage AC input voltage. The oscilloscope trace is the instantaneous input voltage applied to the FBG-PZT sensor. The intersection point of the two spectra occurs at the linear portion of the convolution

function between FBG-PZT sensor and FBG-TOF curve. When the sensor spectrum moves due to input voltage variations, then the superimposed area varies linearly. This occurred due to the increase of the temperature, moving the operation point away of the linear region. To mitigate this drift effect, the filter center spectrum must track the sensor Bragg wavelength, but always keeping the maximum optical power. This filter can be use in other FBG sensors systems.

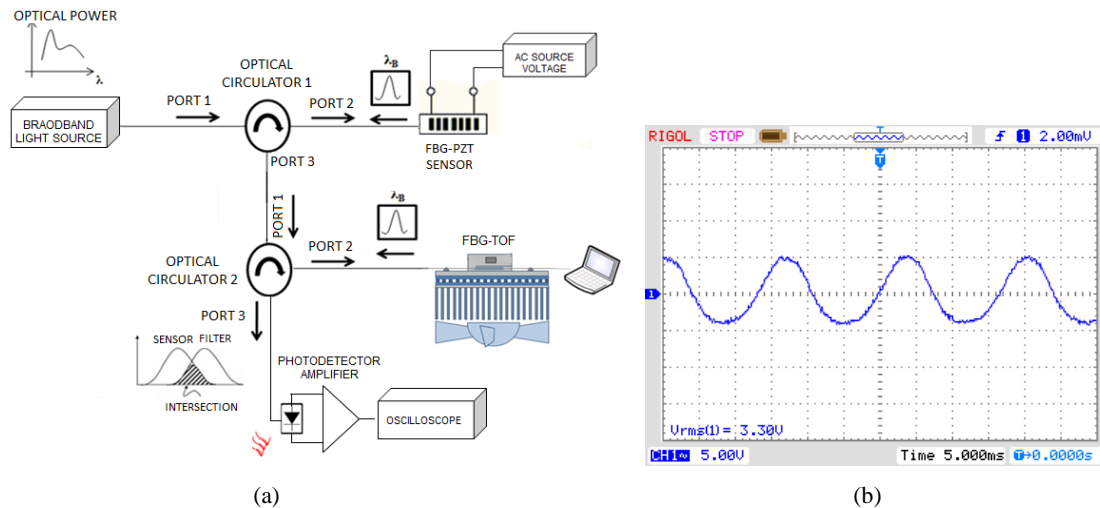


Figure 5. a) Schematic diagram of experiment for AC high voltage FBG-PZT demodulation system by using FBG-TOF. b) Voltage sensor experimental response for an applied AC voltage using the FBG-TOF. Vertical axis: 5 V/div (equivalent to 2.5 kV/div). Horizontal axis: 5 ms/div.

4. CONCLUSIONS

This work presents an innovative automated FBG-TOF controlled by temperature to be used in optical fiber sensing set-up. The temperature control set-up drives a TEC to heating or cooling the FBG-TOF thus enabling the system to control both the temperature drift of the FBG-sensor and the tuning of the FBG-TOF to an optimum position. By applying a large expansion coefficient material to which the FBG-filter is attached it was possible to achieve an extended tuning range, thus allowing the use of the same FBG-TOF for many different FBG-sensor wavelengths. The system was employed to demodulate a high voltage AC signal applied to the FBG-PZT sensor, demonstrating a good linearity and sensitivity.

REFERENCES

- [1] F. V. B. Nazaré and M. M. Werneck, "Compact Opto-Magnetic Bragg-Grating-Based Current Sensor for Transmission Lines," *IEEE Sensors Journal* 15(1), 100-109 (2014)
- [2] B. A. Ribeiro, M. M. Werneck and J. L. S. Neto, "A Novel Optimization Algorithm to Demodulate a PZT-FBG Sensor in AC High Voltage Measurements," *IEEE Sensors Journal*, 13(4) 1259-1264 (2013).
- [3] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter," *Optics Letters*, 18 (16) 1370-1372 (1993).
- [4] L. C. S. Nunes, L. C. G. Valente and A. M. B. Braga, "Analysis of a demodulation system for Fiber Bragg Grating sensors using two fixed filters," *Optics and Lasers in Engineering*, 42 529-542 (2004).
- [5] Z. Jian, and Z. Hong, "Matched FBG application research on dynamic sensing and demodulation," *Symposium on Photonics and Optoelectronics*, 1-5 (2009).



Curitiba, 20 May 2015

to
Bessie Ribeiro
RIO DE JANEIRO, Brazil

We are glad to inform your work 9634-314, "A mechanical method to tuning a FBG-PZT voltage sensor" has been accepted for presentation at the 24th International Conference on Optical Fiber Sensors – OFS-24, to be held in Curitiba (Brazil) from 28 September to 2 October, 2015. Details on the presentation type will be provided in the Conference website opportunely.

Registration to OFS-24 is now open at the conference site (www.ofs24.org). We ask you to register as soon as possible, confirming your participation, so that we can design the final program of the conference. We also remind you to upload your SPIE copyright transfer form using the submission site (use the same submission link on the conference site).

If you receive a message with Reviewer's comments, please observe the suggestions when preparing your presentation.

We are looking forward to meeting you in Curitiba.

With our best wishes,

Hypolito José Kalinowski
(OFS-24 General Chair)

José Luís Fabris Wojtek J. Bock
(OFS-24 Technical Co-Chairs)

End: Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Av. Sete de Setembro, 3165 80230-901 Curitiba, PR
Tel (41) 3310-4608/4689 cel (41) 9975-1573 e-mail: hjkalin@utfpr.edu.br



**Sociedade Brasileira de
Microondas &
Optoeletrônica**

A mechanical method to tuning a FBG-PZT voltage sensor

Bessie A. Ribeiro*^a and Marcelo M. Werneck^a

^a Laboratório de Instrumentação e Fotônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Horácio Macedo, 2030, Ilha do Fundão - Centro de Tecnologia, Bloco I – 036 (subsolo), Rio de Janeiro–RJ, Brazil

ABSTRACT

When using a Fiber Bragg Grating (FBG) for strain measurements it is always necessary to compensate the FBG against temperature fluctuations. In this paper it is shown an innovative method for mechanically compensating an FBG in a high voltage measurement application using an FBG-PZT sensor. The system takes advantage of a mechanical assembly that, as the PZT displaces, the screw where the FBG is bonded on displace in the opposite direction, keeping the FBG length constant. A theoretical analysis is done and experimental results are shown.

Keywords: Fiber Bragg Gratin (FBG), mechanical compensation, strain measurement, high voltage sensor, PZT

1. INTRODUCTION

The development of new technologies of low socio-environmental impact in order to reduce costs with operation and maintenance are required for the electrical industry. In the last decades, due to the advantages of optical technology Fiber Bragg Grating (FBG) sensors have attracted a great interest and are employed in the measurement of a number of physical parameters, playing an important role in high voltage measurements [1-2]. Since FBGs are sensitive to both temperature and strain simultaneously, in order to ensure reliability and accuracy in strain measurements it is necessary to compensating the FBG for temperature shifts. Actually, a number of these devices were presented, most of them employing an induced axial strain as the tuning driver [3]. This paper explores the possibility of use the Bragg grating strain sensitivity as the tuning parameter taking advantage of the linear Bragg wavelength (λ_B) shift. We propose a mechanism to tune a high-voltage measuring transducer with an FBG sensor applied to the electric power industry by using an FBG together with a PZT transducer [4]. In this new method the FBG was bonded between the extremities of two screws and mechanically stretched to tune it to the optimal demodulation point. Besides, the new package allows choosing different materials with specific temperature expansion coefficients in order to mechanically compensate the sensor structure submitted to temperature variations.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 The Sensor Prototype

An FBG-PZT transducer was built using part of the scheme to the one presented in [4]. Unlike to the previous scheme with the FBG attached above the structure, in the current method the operation principle of the sensor consists of a mechanism capable to tune the λ_B by fixing the FBG through the inner cavity of the PZT stack. The FBG was bonded between the extremities of two screws with their other ends protruding outside of the PZT stack as shown in Fig. 1. Two nuts were used to pull the screws outwards to stretching the FBG to the λ_B desired. An important feature of this scheme is its flexibility in the use of Bragg gratings in the twin gratings demodulation technique, since it is possible to choose the FBG filter in order to tune the FBG sensor. At the final stage of the sensor construction, we used two aluminum plates at each side of the PZT stack joined together by four screws. In order to allow the PZT stack to move about. Four springs were used as washers between the plate and the nuts (see Fig. 1). Since most adhesive previously used were not able to bond the FBG becoming fragile as temperature rises, an UV light cured resin was used to provide proper attachment. The resin is an adhesion material used in filling and restoration of dental structures and its cure process is done through a light polymerization process. The curing light led used was the *Poly 600 (Kavo, DE)*, with a wavelength range from 450 nm to 460 nm and a light output power of 600 mW/cm².

*bessie@lif.coppe.ufrj.br; phone +55 21 3983-8200; fax +55 21 3983-8200; www.lif.coppe.ufrj.br

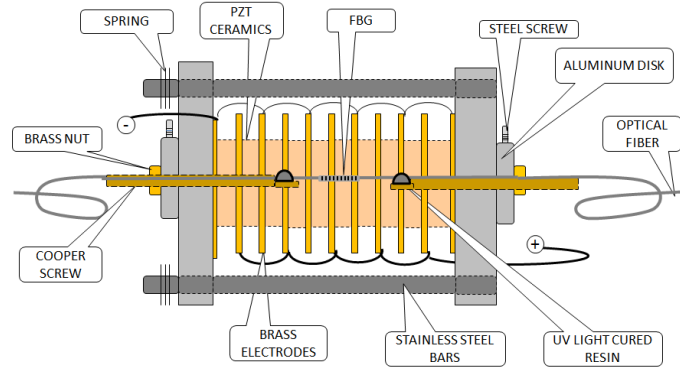


Figure 1. Schematic diagram of the FBG-PZT sensor.

2.2 Theoretical Aspects

In order to calculate the sensitivity of the λ_B with temperature and strain Equation (1) must be used, where $\Delta\lambda_B$ is the Bragg wavelength shift, ρ_e is the photo-elastic coefficient, ε_{FBG} is the strain of the grating due to the extension of the fiber, ΔT is the temperature variation, α_{FBG} is the silica thermal expansion coefficient and η is thermo-optic coefficient for Ge-doped silica optical fiber [5].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_{FBG} + (\alpha_{FBG} + \eta) \cdot \Delta T \quad (1)$$

If a stress ΔL_{FBG} is applied to the fiber, then a relative strain $\Delta L_{FBG}/L_{FBG}$ is obtained. When the sensor is subjected to temperature variations, both the aluminum structure and stack PZT suffer an expansion causing a ΔL_{FBG} increase that also increases λ_B as dictated by Eq. (1). At the same time temperature changes will promote the screws expansion, and in this case ΔL_{FBG} will decrease by loosening the FBG and decreasing λ_B . Then the resultant ΔL_{FBG} can be calculated according to Equation (2):

$$\Delta L_{FBG} = [(L_{S1} \cdot \alpha_{S1}) + (L_{S2} \cdot \alpha_{S2})] + [(L_{PZT} \cdot \alpha_{PZT}) + (L_E \cdot \alpha_E)] - [(L_{P1} \cdot \alpha_{P1}) + (L_{P2} \cdot \alpha_{P2})] \cdot \Delta T \quad (2)$$

Where L_{s1} , L_{s2} , L_{PZT} , L_E , L_{P1} , L_{P2} are the length of aluminum parts, PZT, brass electrodes and copper screws respectively, and α_{s1} , α_{s2} , α_{PZT} , α_{sE} , α_{p1} and α_{p2} are the thermal coefficients for aluminum, PZT, brass electrodes and copper screws, respectively. However, the PZT thermal expansion coefficient is not a known parameter. In this paper we developed an experimental procedure for determining the PZT thermal expansion coefficient. In this experiment we positioned an FBG 7 mm long inside the PZT cavity. An Invar piece was used to hold the FBG extremities due to its low thermal expansion coefficient (approximately $1.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Fig. 2 (a) shows the PZT mechanical setup designed to evaluate PZT thermal expansion coefficient. Then the assembly was placed inside a becker with water and the temperature was varied from 25°C up to 90°C . In Fig. 2 (b) we can see the Bragg wavelength shift for the FBG obtaining a slope of $12.88 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. This value can be inserted in Eq. (1) replacing $\Delta\lambda_B/\Delta T$ yielding $\alpha_{FBG} = \alpha_{PZT} = 9.19 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

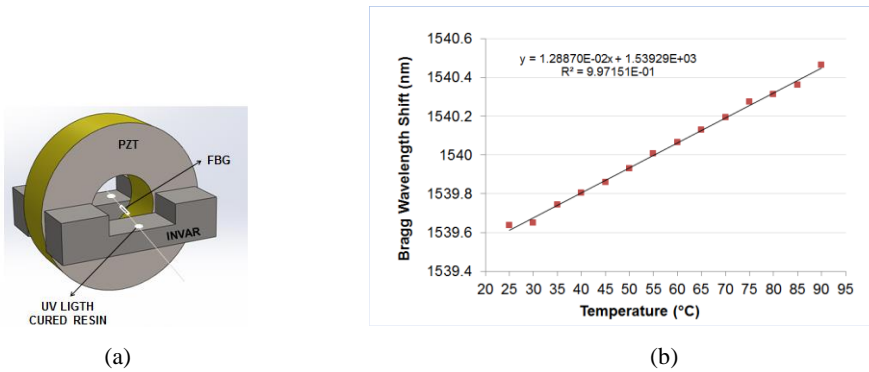


Figure 2. a) PZT+Invar arrangement b) PZT thermal expansion coefficient response.

Now, substituting Table 1 parameters into Equation (2) and considering λ_B to be 1542.05 nm, we obtain the theoretical thermal sensitivity of the FBG-PZT sensor for assembly, shown in Eq. (3).

Table 1. FBG-PZT sensor structure parameters.

	Length	Thermal Expansion Coefficient
Aluminum Structure	20.03 mm (L_{S1})	$23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}^*$
	20.17 mm (L_{S2})	
Cooper Screw	50.11 mm (L_{P1})	$19 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}^*$
	51.43 mm (L_{P2})	
FBG	13 mm	$0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Brass Electrodes	1.65 mm (L_E)	$19 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}^*$
PZT	70.17 mm (L_{PZT})	$9.19 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = -29.39 \text{ pm} / ^\circ\text{C} \quad (3)$$

With this proposed new scheme it is possible to develop a mechanical compensation for the FBG-PZT. The passive compensation is done by manufacturing screw with materials with different thermal expansion coefficients and lengths in order to cancel out Eq. (2) and making FBG-PZT sensor to be insensitive to temperature variations. This is done by setting the first term of Eq. (3) equals to zero and calculating the relationship between screws length and thermal expansion coefficients. Several materials can be used such as aluminum, brass, Invar, cooper or steel.

3. EXPERIMENTS AND RESULTS

To evaluate the accuracy of the developed mechanism the prototype was tested under a temperature variation range from 55°C up to 85°C. The experimental thermal sensitivity of the FBG-PZT sensor was of -27.89 pm/°C as shown in Fig. 3 (a). As for the small difference between experimental and the theoretical value of -29.39 pm/°C presented in Eq. (3) it can be explained due to difference between thermal expansion coefficients values of commercially available materials.

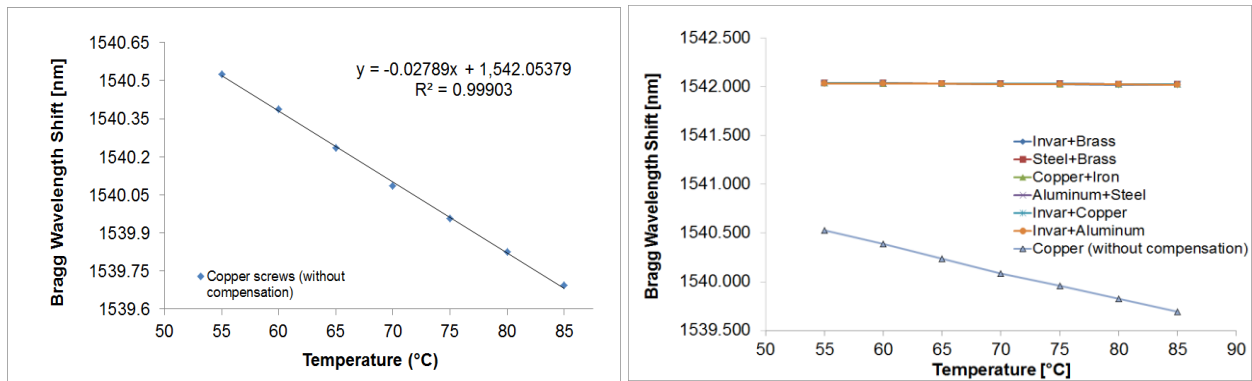


Figure 3. a) Experimental Bragg wavelength variation of the FBG-PZT sensor in relation to temperature with copper screws. b) Theoretical Bragg wavelength variation of the FBG-PZT in relation to temperature by using different materials combination.

By solving Eq. (2) with screws of different materials and different temperature coefficients, one obtains the graph Fig. 3 (b). Note that with different combinations of materials we can obtain several resultants Bragg displacement. Particularly, by using a combination of Invar and cooper one obtains a nearly zero temperature displacement for the sensor. As we can in Fig. 3 (a) and Fig. 3 (b) when temperature is varied from 55°C up to 85°C the λ_B variation was of 0.83 nm/°C with cooper screws in both sides and was of 0.01 nm/°C with Invar and cooper screws combination. Figure 4 (a) and 4 (b) show the results for the FBG-PZT sensor when submitted to DC and AC voltage respectively. Fig. 4 (b) shows the signal after an elapsed time, during the experiment with AC voltage. When the sensor spectrum moves due to input voltage variations, the increase of the temperature moves the operation point away of the linear region. To mitigate this drift effect, the proposed mechanical scheme with screws of different materials must track the λ_B of the FBG-PZT sensor in order to always keeping the optimal demodulation point.

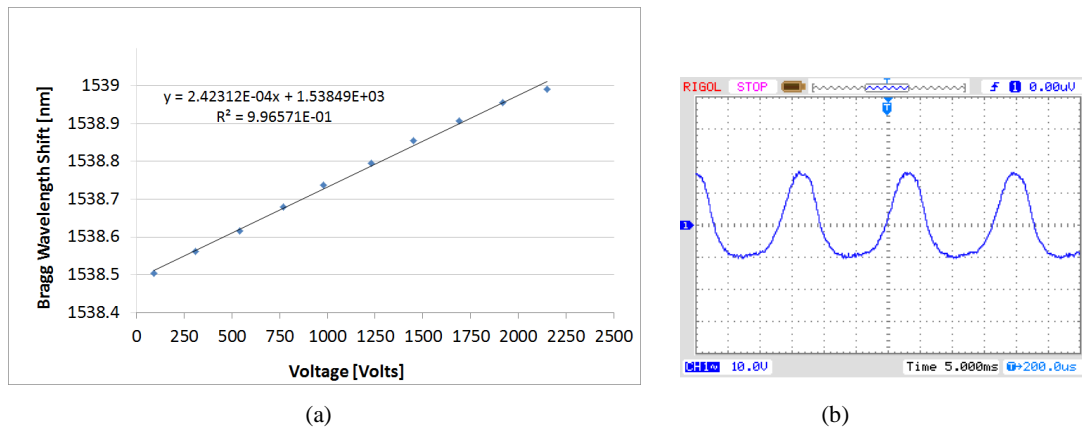


Figure 4. a) Bragg shift versus applied DC voltage. B) Voltage sensor experimental response for an AC voltage. Vertical axis: 10 V/div (equivalent to 2.5 kV/div). Horizontal axis: 5 ms/div.

4. CONCLUSIONS

This paper presents a new scheme to tune the Bragg grating in a high-voltage sensor in order reaching an optimal demodulation point. Besides, the new package allows applying different expansion coefficient materials in order to mechanically compensate the sensor structure so as to make it insensitive to temperature variations.

REFERENCES

- [1] R. C. B. S. Allil and M. M. Werneck, "Optical High Voltage Sensor based in Fiber Bragg Grating and PZT Piezoelectric Ceramics," *IEEE Transactions Instrumentation and Measurements* 60(6), 2118-2125 (2011).
- [2] F. V. B. Nazaré and M. M. Werneck, "Compact Opto-Magnetic Bragg-Grating-Based Current Sensor for Transmission Lines," *IEEE Sensors Journal* 15(1), 100-109 (2014).
- [3] L. Samuel I-En Lin., "Temperature-compensating device with central-wavelength tuning for optical fiber gratings," *Opt. Eng.* 40(5), 698-702 (2001).
- [4] B. A. Ribeiro, M. M. Werneck and J. L. S. Neto, "A Novel Optimization Algorithm to Demodulate a PZT-FBG Sensor in AC High Voltage Measurements," *IEEE Sensors Journal* 13(4), 1259-1264 (2013).
- [5] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *Journal of Lightwave Technology* 15(8), 1263-1276 (1997).

An FBG Based Tunable Filter to demodulate a Piezo-Optical Voltage Sensor

Bessie de Assumpção Ribeiro, Fábio Vieira Batista de Nazaré, Marcelo Martins Werneck and Marcell Nunes Gonçalves

Laboratório de Instrumentação e Fotônica – Programa de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, Brazil
E-mail: bessie@lif.coppe.ufrj.br

Abstract— This work presents an innovative automated Fiber Bragg Grating (FBG) based tunable optical filter (TOF) controlled by temperature to be used in temperature compensating schemes in FBG sensing set-ups. Mechanical and electronic aspects are discussed, and the implemented FBG-TOF viability and reliability in sensing systems are showed. The system was employed to demodulate a high voltage AC signal applied to a FBG-PZT sensor, showing good linearity and sensitivity.

Keywords-Fiber Bragg Grating; Tunable Optical Filter (TOF); Thermoelectric Cell; temperature; twin gratings, piezoelectric ceramic .

I. INTRODUCTION

In the last decades, due to the advantages of optical technology, fiber Bragg grating (FBG) sensors have been highly employed and investigated in the development of sensing devices, telecommunication systems and tunable optical filters (TOFs). FBG sensors have attracted a great interest and are employed in the measurement of a number of physical parameters, playing an important role in high voltage measurements [1- 3].

The advantages of optical technology over the conventional ones include wider dynamic range, smaller size, good linearity, light weight, electric security, multiplexing capability and remote monitoring. Due to the possibility of a digital output, and with digital relays commercially available today, the optical technology is a viable alternative to attend the IEC 61850 specifications inside power facilities [4].

In developing countries, such as Brazil, the deployment of transmission lines and substations in crowded areas is a big challenge. From the electrical industry point of view, the companies are investing on infrastructure and modernization of older plants. The development of new technologies of low socio-environmental impact and the use of emerging

technologies in order to reduce costs with operation and maintenance are required for the electrical industry. Therefore compact and hybrid solutions for transmission lines have been presented as a viable and economic alternative to attend the necessities of vast urban centers that require energy in high quantities [5].

In our previous work we developed a high-voltage measuring system to be used as the core of a 13.8 kV-class Voltage Transformer (VT) for electric power industry application [6]. The sensor used was an FBG together with a PZT transducer to measure high voltage. The optical signal was demodulated by a Fabry-Perot (FP) tunable filter. These optical filters are relevant in demodulation schemes for FBG signals and several TOF implementations have been proposed in literature [7].

Usually, FBG based demodulation systems do not use tunable filters because they are very expensive. Instead, a technique called fixed-filter or twin Bragg gratings demodulation technique is employed, where the filter FBG spectrum is fixed and the measurement information is obtained by exploring the reflected optical power of the intersection region of both FBGs [8]. In this case when the measurement signal from the sensing FBG changes, the twin FBG reflected power varies according to the sensor response. Since FBGs are sensitive to both temperature and strain, these parameters can be controlled in order to implement and develop FBG-TOF devices [9]. Actually, a number of these devices were presented, most of them employing an induced axial strain as the tuning driver [10, 11].

This paper explores another possibility which is the use of the Bragg grating thermal sensitivity as the tuning parameter taking advantage of the linear Bragg wavelength shift when the temperature is varied. Then, the FBG-TOF must be displaced accordingly in order to track the optimum intersection point [12]. This can be done by controlling the FBG temperature through a thermoelectric cell automatically

driven by a controlled power supply. Since temperature variations displace the Bragg wavelength, this work proposes an automated FBG-TOF controlled by temperature variations to demodulate the AC signal from the FBG-PZT sensor. As we are concerned about sensitivity and accuracy, in order to match and tune to the desired wavelength, the FBG based tunable optical filter is thermally stretched to reach the optimal demodulation wavelength.

A temperature control set-up was designed and constructed to actuate over an FBG, which is bonded over a metal plate. This FBG-metal arrangement is heated or cooled and the Bragg wavelength shift range is influenced by the temperature sensitivity, i.e., the Bragg wavelength changes due to the temperature and due to the metal expansion/contraction that strains the fiber. Mechanical design and controlling aspects are presented and discussed, while the FBG response to be used as the tunable filter is studied prior and after the attachment over the metal plate. Thus, the achieved increased tuning range and Bragg wavelength sensitivity are showed. As a result, a Thermoelectric Cell (TEC) driving circuit was developed, making it possible to the user to set a desired wavelength to demodulate the FBG-PZT sensor.

II. THEORETICAL ASPECTS

A. Fiber Bragg Gratings Fundamentals

Fiber Bragg gratings are simple and passive devices, which consist on modulations of the refractive index (RI) of the core of optical fibers. The Bragg wavelength (λ_B) of a grating varies according to:

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

where n_{eff} is the effective refractive index of the optical fiber core and Λ is the periodicity of the grating.

Essentially, any external agent that is capable of changing Λ will displace the reflected spectrum centered at Bragg wavelength. A longitudinal deformation, due to an external force, for instance, may change both Λ and n_{eff} , the latter by the photo-elastic effect and the former by increasing the pitch of the grating. Equally, a variation in temperature can also change both parameters, via thermal dilation and thermo-optic effect respectively.

In order to calculate the sensitivity of the Bragg wavelength with temperature and strain Eq. (1) must be used. By calculating the partial derivatives of the Bragg wavelength with respect to temperature and displacement [13], it is possible to obtain the relation between the Bragg wavelength temperature and strain, which is:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \varepsilon_{FBG} + (\alpha_{FBG} + \eta) \cdot \Delta T \quad (2)$$

where $\Delta\lambda_B$ is the Bragg wavelength shift, ρ_e is the photo-elastic coefficient, ε_{FBG} is the strain of the grating due to the extension of the fiber, ΔT is the temperature variation, α_{FBG} is the silica thermal expansion coefficient and η is thermo-optic

coefficient for Ge-doped silica optical fiber. If a stress ΔL is applied to the fiber, then a relative strain $\Delta L/L$ is obtained. At the same time, if the FBG has a length L_{FBG} it will experience a strain $\Delta L_{FBG}/L_{FBG}$, but since the FBG is inscribed in the fiber, then $\Delta L_{FBG}/L_{FBG} = \Delta L/L$. That is, the FBG strain is the same as the whole fiber strain.

B. The Twin Gratings Demodulation Technique

Usually two fiber Bragg gratings are used in measurement systems that employ the fixed filter technique, that is, the FBG-filter remains fixed, and the two FBGs have almost similar reflectivities. When using this method, in addition to a pair of gratings, a broadband optical source and a photodetector are also needed for a practical implementation.

In Fig. 1 the reflected spectra of the twin gratings are superimposed, and the reflected power (the common area) varies as the central wavelength of one or both FBG vary, due for example, a temperature variation.

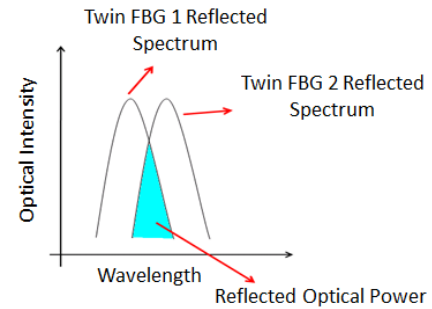


Figure 1. The twin gratings demodulation method (adapted from [8]).

Twin grating technique have been applied in FBG demodulation in many sensing applications [14]–[16], but, these approaches are usually quite empirical. Notice that the twin FBG filter acts now as a dichroic mirror in this scheme, as opposed to the FP filter which acts by light transmission. The optoelectronic setup is shown in Fig. 2 where an Amplified Spontaneous Emission (ASE) broadband light source injects light into port 1 of the optical circulator 1. The light circulates to port 2, illuminating the sensor FBG. The reflection spectrum of this sensor that returns to port 2 is deviated to port 3 and enters port 1 of circulator 2. Optical circulator 2 guides the signal to the filter FBG, through port 2. Only the superimposed wavelengths (inset graphic) reflect back to circulator 2, which diverts the light through port 3. In this setup an OSA is used to measure the reflected FBG spectrum accordingly to the sensor displacement.

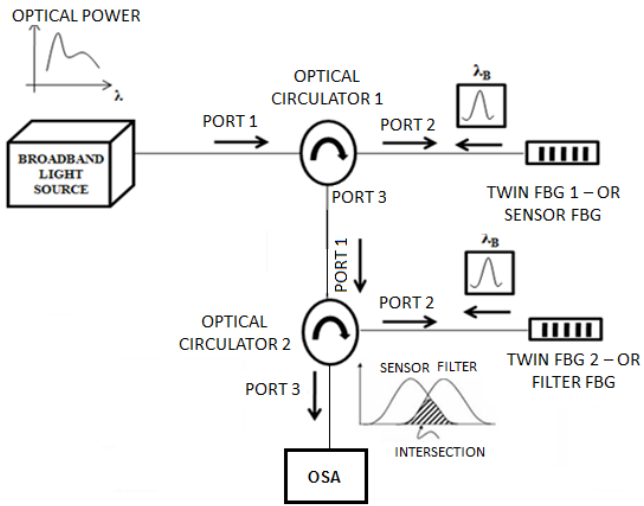


Figure 2. Twin gratings demodulation optical set-up (adapted from [12]).

This demodulation scheme is very simple, and reduces the cost of the setup implementation; however, the twin FBG must be manufactured at an exact wavelength to produce an optimized effect. Another problem with the twin technique is that if the FBG-sensor presents a temperature drift when measuring strain, for instance, the whole system loses calibration because the intersection point changed position so as the gain.

In the proposed tunable FBG-based filter developed in this work, the FBG-filter wavelength is displaced through induced temperature (provided by the TEC) in order to track the optimal position.

III. MATERIALS AND METHODS

This section will describe the manufacturing process of the optical tunable filter. In order to increase the thermal interaction between the TEC and the FBG, an appropriate enclosure was designed. Since, most adhesive glues used to attach the FBG to the structure are not able to resist a TEC temperature range excursion between 0°C and 100°C, in this paper an UV cured resin was used to bond the FBG on the aluminum structure. This section will show theoretical results when the FBG, attached to the mechanical set-up, is submitted to a temperature/strain variation. The final part of this section discusses the development of an electronic control system to induce temperature variations over an FBG by using a TEC.

A. “FBG+TEC” Mechanical Setup Designing

The system consists of an aluminum structure developed to accommodate the FBG and a temperature sensor. The FBG is then bonded to the metal structure, which will expand or contract according to temperature, thus, increasing the Bragg wavelength range. Due to its high thermal expansion coefficient (approximately $24 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), aluminum was chosen as the material used in the construction of the structure that will accommodate the FBG.

The assembly is shown in Fig. 3. The LM35 temperature sensor is a precision integrated circuit whose output voltage varies linearly with temperature. In this experiment, the temperature sensor on its basic configuration is designed to obtain an operation range of +2°C to +150°C. The LM35 and the FBG sensor were attached to an aluminum customized assembly, between an insulating glass plate and the TEC. Metal part 1 and metal part 2 are used to fix the structure.

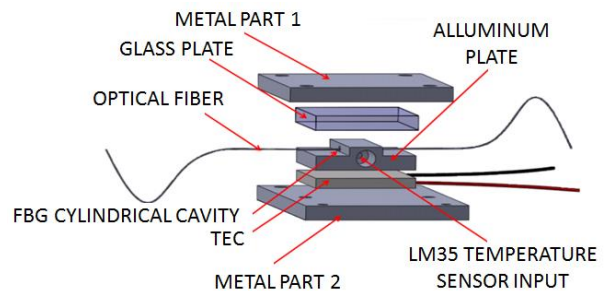


Figure 3. The FBG-filter assembly.

An FBG is then positioned inside a cylindrical cavity on the aluminum plate which ensures a good heat transfer between the TEC and the optical fiber. In this way, it is possible to assure that the aluminum plate, the FBG, and the temperature sensor are all at the same temperature. Fig. 4 shows the complete mechanical setup with a heat sink fixed to metal part 2 and a fan, used to dissipate heat when the FBG is being cooled down.

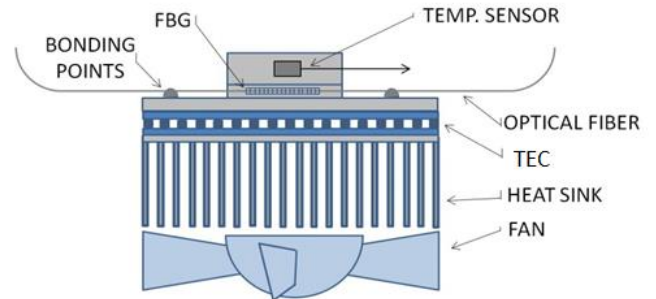


Figure 4. Schematic diagram of the filter mechanical setup.

The FBG shall be mechanically stretched during the bonding process (see Fig. 5) because when the “FBG+metal” is cooled down below room temperature, the FBG must be capable to be contracted without suffering a deformation or a bend.

Since most adhesive previously used were not able to resist the whole temperature range, becoming brittle and fragile, an UV light cured resin was used, providing a proper attachment, being able to tolerate temperatures as high as 100°C and as low as 5°C. The resin is an adhesion material used in filling and restoration of dental structures. The elements in its composition provide physical and mechanical properties, as bond strength and the resistance is higher than that presented by other cementing materials [17].

The resin cure process is done through a light polymerization process. The curing light led used was the Poly 600 (Kavo, DE), with a wavelength range from 450 nm to 460 nm and a light output power of 600 mW/cm². Before bonding the FBG it is necessary to remove the impurities in order to promote a perfect interaction between resin to the fiber surface. This is done by conditioning the aluminum surface with 10% hydrofluoric acid, washing with water and removing the moisture with a heat gun. After that, a silanization process is necessary with an ethanol solution of hydrolyzed 3-Methacrylyoxypropyltrimethoxysilane. Then, the resin is pasted over the fiber and the UV light is applied. The resin begins to harden after 30 seconds with the UV incidence. Fig. 5 shows the setup used to stretch the fiber and the bonding process.

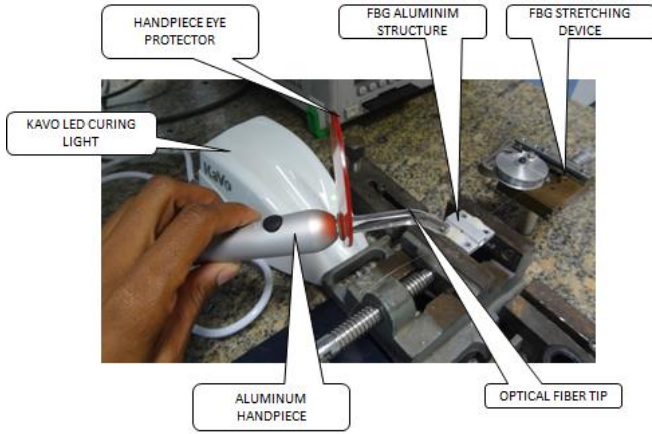


Figure 5. The Poly 600 Curing light from KAVO during the adhesive curing and stretching device process.

B. Principle of Operation

We will here demonstrate the theoretical behavior under temperature variation of a FBG when bonded to an aluminum plate. Table I summarizes the system parameters.

TABLE I. FBG AND ALUMINUM PARAMETERS

Parameter	Value
λ_B , After Stretching ($\Delta T=0$)	1535.54 nm
Silica thermo-optic coefficient	$8.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Silica thermal expansion coefficient	$0.55 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$
FBG length	5 mm
Aluminum plate length (L_{AL})	30 mm
Silica photo-elastic coefficient (ρ_e)	0.22
Aluminum thermal expansion coefficient	$24 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

Since the FBG is bonded between two fixing points in the aluminum plate, we obtain

$$L_{FBG} = L_{AL} \quad (3)$$

where L_{FBG} is the fiber length (i.e., the distance between the two fiber fixing points containing the FBG) and L_{AL} is the aluminum plate length.

In Eq. 2, ϵ_{FBG} is the strain due to mechanical extensions to which the fiber is submitted. In this sense, one can write:

$$\epsilon_{FBG} = \frac{\Delta L_{FBG}}{L_{FBG}} \quad (4)$$

where ΔL_{FBG} is the FBG mechanical extension.

But, in this case, it is important to notice that the optical fiber also suffers a thermal linear expansion/contraction when submitted to temperature variations. Thus,

$$\Delta L_{FBG} = L_{AL} \alpha_{AL} \Delta T - L_{FBG} \alpha_{FBG} \Delta T \quad (5)$$

where α_{AL} is the aluminum thermal expansion coefficient. Thus, substituting Eqs. (3) and (4) in Eq. (5), we have:

$$\epsilon_{FBG} = (\alpha_{AL} - \alpha_{FBG}) \Delta T \quad (6)$$

The negative signal is used because as the aluminum stretches the fiber by temperatures dilation, the fiber also dilates, in the opposite direction losing itself. By substituting Eq. 6 in Eq. 2 and using the constants in Table I, we obtain the sensitivity of the FBG with temperature:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)(\alpha_{AL} - \alpha_{FBG}) \Delta T + (\alpha_{FBG} + \eta) \cdot \Delta T \quad (7)$$

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T} = 42.15 \text{ pm}/^\circ\text{C} \quad (8)$$

Therefore, the Bragg wavelength response for the FBG based filter set-up is approximately 42 pm/°C, instead of the usual 14 pm/°C when the FBG is in an stand-alone operation.

C. Thermoelectric Cell Driving Circuit

A TEC works based on Peltier effect that is, for a positive voltage, while one TEC side is heated the opposite side is cooled; when the voltage is negative, the inverse situation occurs. The TEC must be capable of providing a considerable temperature excursion, sufficient to move the Bragg wavelength to the optimal demodulation position and achieving the desired control. The power supply must be capable to deliver a maximum voltage of approximately 8.5 V at 10 A.

The basic operation principle consists in comparing the actual cell temperature with a temperature value informed by the user, i.e. the desired temperature that will produce the desired FBG central wavelength. The control parameter is the difference between the input and the TEC temperature, provided by the temperature sensor.

A Proportional Integral Derivative (PID) controller was implemented in a DSP (Digital Signal Processor). The derivative term was essential to increasing the stability of the control system, mainly on high temperatures (closer to 100°C) due to the nonlinear behavior of the TEC module. The error signal e_T , after being processed by the PID, controls the PWM power module which drives the TEC. Fig. 6 shows the block diagram of the control software.

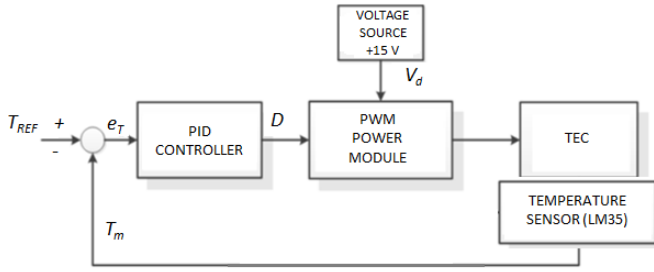


Figure 6. TEC control system block diagram.

Temperature references (T_{ref}) in the range of 10°C to 100°C were supplied in steps of 10°C . Fig. 7 and Fig. 8 show the temperature rise time of the thermoelectric cell ($T_{peltier}$) to a 10°C step for temperatures 20°C and 60°C respectively. Notice, in Fig. 7, the maximum value is 21.16°C , the overshoot is 5.8% and the rise time is 16 s. In Fig. 8, the maximum value is 63.19°C , the overshoot is 5.3% and the rise time is 14 s.

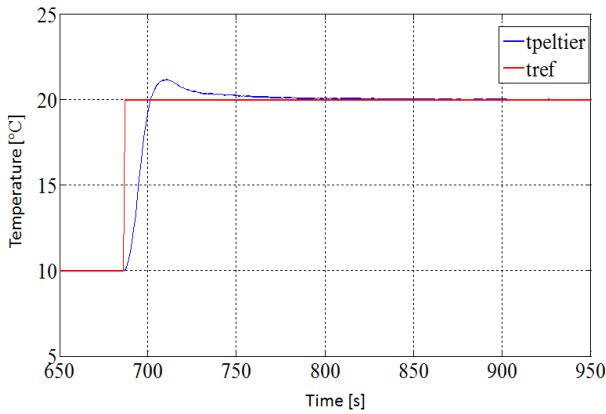


Figure 7. Temperature response to a 20°C step from an initial temperature of 10°C .

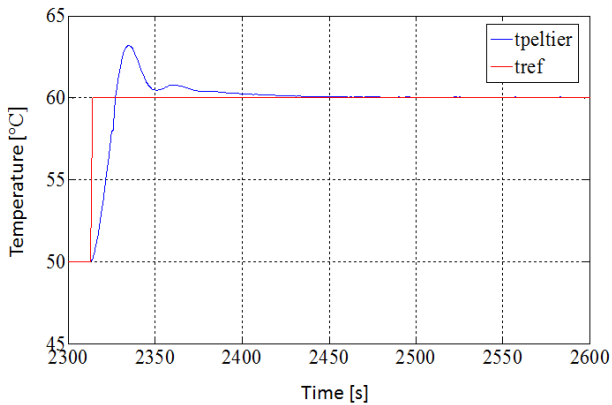


Figure 8. Temperature response to a 10°C step from an initial temperature of 50°C .

The controller objective is to track the reference temperature with an error less or equal to $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$. The controller parameters were adjusted by Ziegler-Nichols method [18]. For this, we applied a voltage step to the TEC

and observed its response in time in an open loop situation. A fine adjustment of the gain and the time constant were necessary in order to obtain a faster response and maintain the error regime within the established range.

IV. EXPERIMENTS AND RESULTS

In order to investigate the control system operation over the FBG-Filter, in this section the FBG experimental sensitivity is evaluated and investigated considering the temperature range provided by the user inputs. An experiment designed to evaluate the efficiency and efficacy of the FBG-TOF will be discussed in the following subsections.

A. FBG-Tunable Optical Filter Evaluation

To evaluate the efficiency and efficacy of the control system the setup shown in Fig. 2 was altered, where the twin FBG 2 (FBG Filter) is substituted by the developed FBG-TOF, as shown in Fig. 9.

As a preliminary experiment, the FBG was tested under temperature variation by the developed FBG-TOF for calibration. The FBG was placed over the TEC and the temperature was varied in a range from 10°C up to 100°C , with steps of 5°C . The Bragg wavelength shift for the loose FBG is showed in Fig. 10.

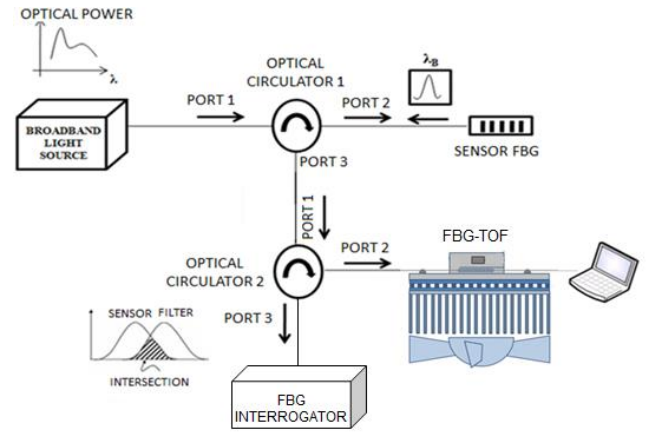


Figure 9. Set-up for the FBG-based tunable optical filter reliability evaluation experiment.

A second experiment consists in stretching the fiber in order to avoid bends, as previously mentioned, and bond the FBG extremities over the aluminum plate. Thus, the same 90°C temperature variation range is applied using the thermoelectric cell driving circuit. The Bragg wavelength shift for the fixed FBG is also shown in Fig. 10.

Linear fittings that adjust each set of data are also presented, while the corresponding adjustment equations and the R-squared values are showed in Table II. It is important to mention that, as it can be seen in Fig. 10, there is an approximately 3 nm difference between the loose FBG response and the fixed FBG response. This happens because the FBG was stretched before the fiber was attached over the aluminum plate.

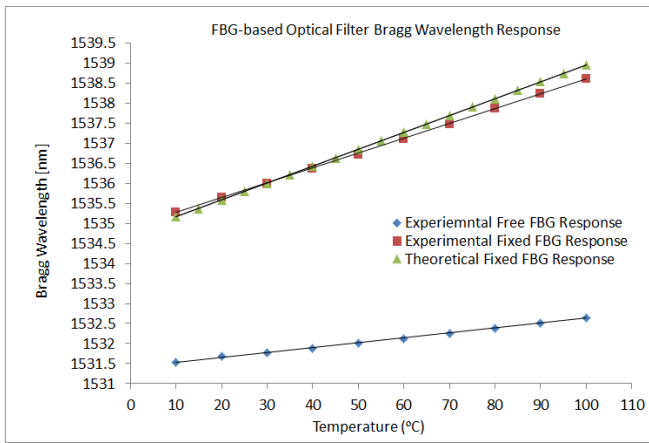


Figure 10. FBG-based optical filter response.

TABLE II. LINEAR FITTINGS

	Linear Fit Equation	Thermal sensitivity (pm/°C)	R ²
Experimental Loose FBG Response	$y = 0.01231x + 1532.553$	12.31	0.9989
Experimental Fixed FBG Response	$y = 0.03702x + 1536.044$	37.02	0.9998
Theoretical Fixed FBG Response	$y = 0.04215x + 1535.517$	42.15	1.0000

As it can be seen in Fig. 10, with the FBG bonded to the aluminum plate, the Bragg wavelength thermal sensitivity increased by approximately 3 times – from 12.31 pm/°C to 37.02 pm/°C, thus obtaining a Bragg wavelength range of about 3.5 nm instead of only 1 nm for the loose FBG. As for the difference between theoretical and experimental responses observed in Fig 10, this is due to a slight difference between expansion coefficients values of aluminum alloys commercially available.

In fact, to operate as a reliable tunable optical filter, the FBG-based set-up response must be known in terms of hysteresis effects. In order to investigate this aspect the Bragg wavelength shift was monitored for a temperature variation range of 95°C (from 5°C up to 100°C), for two cycles. In the first cycle, the temperature was increased, while the second cycle consisted in decreasing the temperature. The Bragg wavelength behavior for both cycles are presented in Fig. 11, and, as it can be seen, hysteric loops are not present and the coefficient of regression (R²) for the fitting equations are near 1, as shown in Table III, where the linear fitting equations for each cycle are also presented; and they are nearly the same.

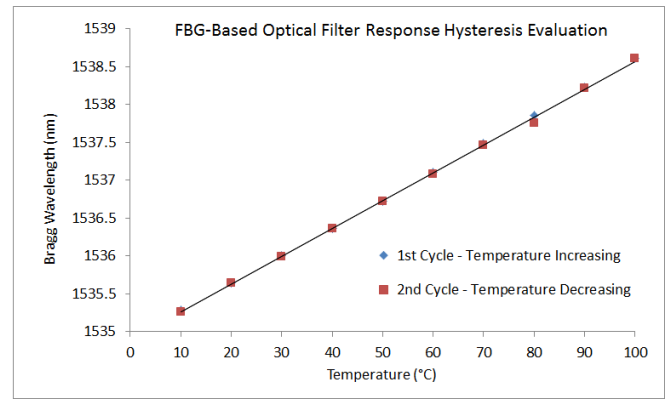


Figure 11. FBG-based filter Bragg wavelength response experiment carried out to evaluate hysteresis effects.

TABLE III. FBG-BASED OPTICAL FILTER RESPONSE HYSTERIS EVALUATION

	Linear Fit Equation	Thermal sensitivity (pm/°C)	R ²
1 st Cycle – Temperature Increasing	$y = 0.03702x + 1534.894$	37.02	0.9998
2 nd Cycle – Temperature Decreasing	$y = 0.03676x + 1534.890$	36.76	0.9992

In Fig. 12 the two FBG spectra are shown, the one on the left is the FBG-Filter spectrum and the one on the right is the FBG-sensor spectrum. In order to achieve a proper demodulation, the filter spectrum must intersect the sensor spectrum at a specific point so as to yield maximum sensitivity [12]. This is done by varying the temperature of the filter using the control system.

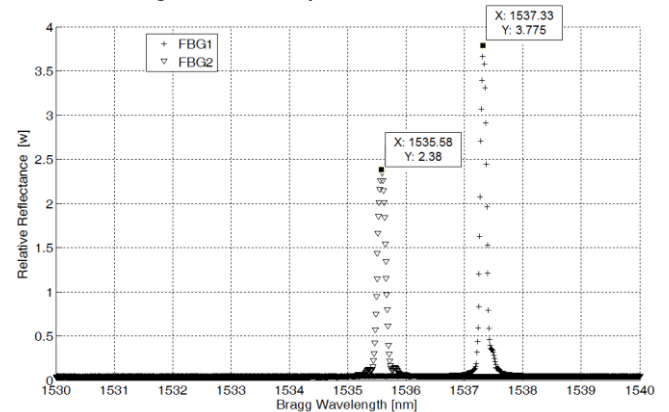


Figure 12. Spectral curves for FBG 1 and FBG 2.

As the TEC temperature is increased by the control system the intersection spectra is monitored by the Optical Spectrum Analyzer (OSA). Commencing from ambient temperature, a demodulation signal starts to appear at 69°C. The reflected spectrum is shown in Fig 13. The output optical power increases until it reaches a maximum, approximately at 71°C. This is the position in which the optical power reaches its peak, when the FBG-Filter Bragg

wavelength displaced 1.282 nm from its original position. If the temperature keeps increasing, the output optical power starts to decrease as shown in Fig 14, for 72°C up to 74°C. The total output optical power can be obtained by integrating each curve.

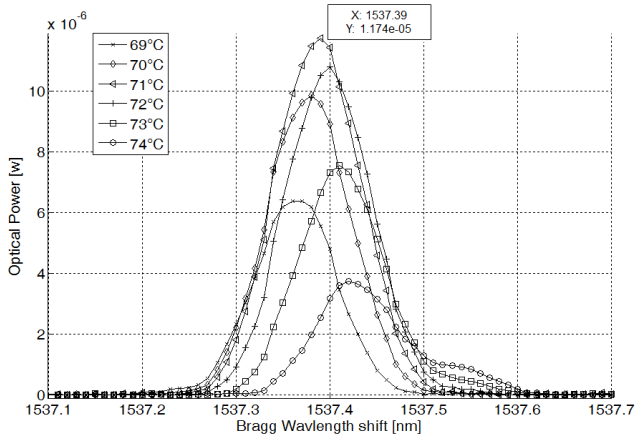


Figure 13. Intersection between the spectra of FBG Filter and FBG-Sensor, as monitored by the OSA. Notice that the maximum reflected power is achieved at 71°C, and decreasing thereafter.

In Fig. 14 the optical power is presented as a function of the FBG-TOF temperature. The maximum output optical power is attained when the temperature reaches 71°C.

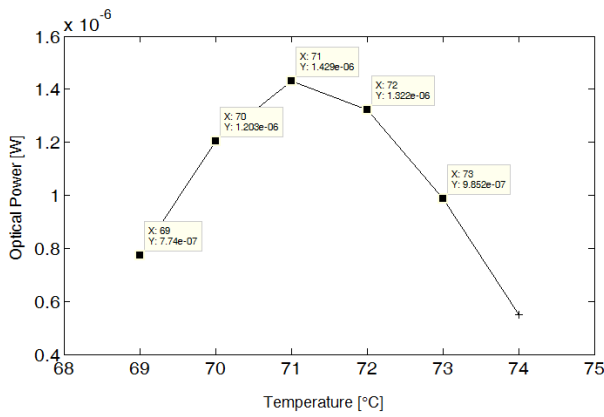


Figure 14. Output optical power values as a function of temperature, showing the point where the optical power is maximum.

B. High Voltage Measurements

An FBG-PZT transducer was built using a scheme similar to the one presented in [6]. It consisted of ten 7-mm-thick PZT rings connected in series, as shown in Fig. 15.

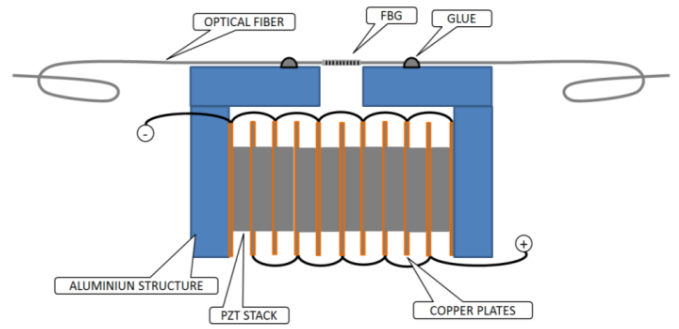


Figure 15. The FBG-PZT mechanical setup (adapted from [12]).

When a PZT is submitted to an electric field, there will be a change in its dimensions, according to thickness displacement constant parameter (d_{33}), in this case $d_{33}=550$ pm/V. In the present case, each PZT ring will increase its width by 550 pm for each volt applied to its electrodes. The electrodes were arranged on both sides of the ceramic discs and were connected in a parallel fashion. An aluminum structure was used to fix the ceramic stack and the FBG sensor was bonded on the top of it. For improving isolation for high voltage, the entire assembly was immersed in a bath of insulating oil.

As commercial OSAs are too slow to respond to the 60-Hz line frequency we used the interrogation system shown in Fig. 16. The optical setup showed was employed to demodulate a 2.5 kV AC voltage signal supplied by an AC high voltage power supply and with the FBG-TOF adjusted by the TEC control. The output signal was fed into an InGaAs photodetector which output was amplified before read by an oscilloscope.

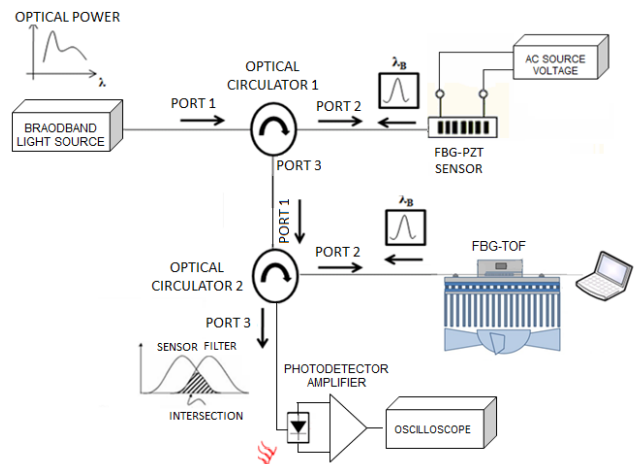


Figure 16. Schematic diagram of experiment for AC high voltage FBG-PZT demodulation system by using FBG-TOF.

Fig. 18 shows the measured AC output voltage, correspondent to the high voltage AC input voltage. The oscilloscope trace is the instantaneous input voltage applied to the FBG-PZT sensor. The intersection point of the two spectra (FBG-Sensor and FBG-Filter) occurs at the linear portion of the convolution function between FBG-PZT

sensor and FBG-TOF curve. When the sensor spectrum moves due to input voltage variations, then the superimposed area varies linearly.

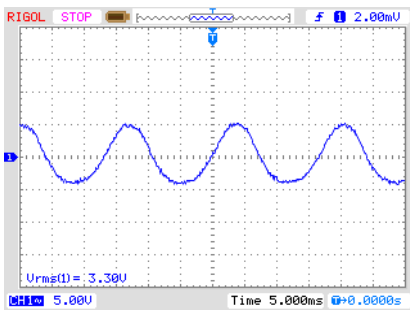


Figure 17. Voltage sensor experimental response for an applied AC voltage using the FBG-based Optical Filter. Vertical axis: 5 V/div (equivalent to 2.5 kV/div). Horizontal axis: 5 ms/div.

Fig. 18 shows the same signal as the one presented in Fig. 17, but after an elapsed time, during the experiment. Notice that the lower semi cycle of the sinusoidal signal is saturated. This occurred due to the increase of the temperature, moving the operation point away of the linear region.

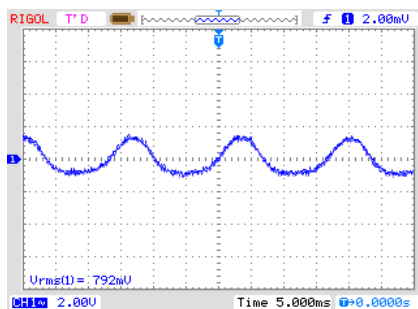


Figure 18. Voltage sensor experimental response for an applied AC voltage with signal distortions due to temperature increase.

V. DISCUSSION

According to Eq. (2), FBG sensors are sensible to temperature and strain simultaneously. Depending on the application, it is difficult to discriminate between shifts due to temperature or to strain. In order to ensure reliability and accuracy in strain measurements it is necessary to compensating the temperature shifts due to the environment where the FBG sensor is located. This effect is clear in Fig. 18, where the FBG-sensor suffered an increase in temperature that displaced the operation point to a non-linear region.

To mitigate this drift effect, the filter center spectrum must track the sensor Bragg wavelength, but always keeping the maximum optical power. This center wavelength displacement can be obtained by measuring the sensor temperature and inputting this signal to the TEC temperature control. In this way, whatever the sensor temperature, the filter will always be at the right operational point thus keeping the system gain and calibration steady.

As mentioned before, since we are concerned about sensitivity and accuracy, it is necessary to optimize the intersection between the two spectra in order to obtain the maximum sensitivity and linearity. By using the optimization algorithm described in [9], is possible to find the optimal operational point. The procedure is done in three steps: first, a numerical convolution between the two spectra was carried out; secondly a derivative of the obtained equation is calculated, and finally, by nulling this last equation, it is possible to determine the displacing wavelength that would yield the maximum sensitivity.

VI. CONCLUSIONS

This work presents an innovative automated FBG-TOF controlled by temperature to be used in temperature compensating schemes in optical fiber sensing set-up. The temperature control set-up drives a TEC to heating or cooling the FBG-TOF thus enabling the system to control both the temperature drift of the FBG-sensor and the tuning of the filter to an optimum position. By applying a large expansion coefficient material to which the FBG-Filter is attached it was possible to achieve an extended tuning range, thus allowing the use of the same FBG-TOF for many different FBG-sensor wavelengths.

An experiment designed to evaluate the reliability of the proposed FBG-TOF filter was carried out, considering the usefulness of such optical filter in twin grating demodulation systems. Finally the system was employed to demodulate a high voltage AC signal applied to the FBG-PZT sensor, demonstrating a good linearity and sensitivity.

REFERENCES

- [1] N. E. Fisher, P. J. Henderson, and D. A. Jackson, "The interrogation of a conventional current transformer using an in-fibre Bragg grating", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 8, pp. 1080-1084, 1997.
- [2] M. Pacheco, F. M. Santoyo, A. Mendez, and L. A. Zenteno, "Piezoelectric-modulated optical fibre Bragg grating high-voltage sensor", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 10, pp. 777-782, 1999.
- [3] P. Niewczas, L. Dziuda, G. Fusiek, and J. R. McDonald, "Design and evaluation of a preprototype hybrid fiber-optic voltage sensor for a remotely interrogated condition monitoring system", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, no. 4, pp. 1560-1564, Aug. 2005.
- [4] R. C. B. S. Allil and M. M. Werneck, "Optical High Voltage Sensor based in Fiber Bragg Grating and PZT Piezoelectric Ceramics", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 6, pp. 2118-2125, Jun. 2011.
- [5] F. V. B. Nazaré and M. M. Werneck, "Compact Opto-Magnetic Bragg-Grating-Based Current Sensor for Transmission Lines", *IEEE Sensors Journal*, v. 15, n. 1, pp. 100 - 109.
- [6] B. A. Ribeiro and M. M. Werneck, "FBG-PZT sensor system for high voltage measurements", 2011 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1 - 6, Hangzhou-China, 2011.
- [7] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter", *Optics Letters*, 1993.
- [8] L. C. S. Nunes, L. C. G. Valente and A. M. B. Braga, "Analysis of a demodulation system for Fiber Bragg Grating sensors using two fixed filters", *Optics and Lasers in Engineering* 42, pp. 529 - 542, 2004.
- [9] Y. Zhao and Y. Liao, "Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors", *Optics and Lasers in Engineering* 41, pp. 1- 18, 2004.

- [10] N. Mohammed, W. Szyszkowski, W. J. Zhang, E. I. Hadda, J. Zou, W. Jamroz and R. Kruzelecky, "Analysis and Development of a Tunable Fiber Bragg Grating Filter Based on Axial tension/Compression", *Journal of Lightwave Technology*, pp. 2001 – 1259, v. 22, n. 08, August 2004.
- [11] D. Yeom, H. S. Park and B. Y. Kim, "Tunable Narrow-Bnadwidth Optical Filter Based on Acoustically Modulated Fiber Bragg Grating", *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 16, n; 5, May 2004.
- [12] B. A. Ribeiro, M. M. Werneck and J. L. S. Neto, "A Novel Optimization Algorithm to Demodulate a PZT-FBG Sensor in AC High Voltage Measurements", *IEEE Sensors Journal*, v. 13, n. 4, pp. 1259 – 1264.
- [13] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, n. 8, pp. 1263 – 1276, 1997.
- [14] Y. Zhan, S. Xue, and Q. Yang, "Multiplexed reflective-matched optical fiber grating interrogation technique", *Chinese Optics Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 135-137, March 2007.
- [15] Z. Jian, and Z. Hong, "Matched FBG application research on dynamic sensing and demodulation", *Symposium on Photonics and Optoelectronic*, pp. 1-5, August 2009.
- [16] Y. Zhan, M. Yu, J. Pei, X. Yang, and S. Xiang, "A linearity interrogation technique with enlarged dynamic range for fiber Bragg grating sensing", *Optics Communications Journal*, vol. 283, pp. 3428-3433, Sept. 2010.
- [17] A. Prakki, R.M. Carvalho, "Dual cure resin cements: characterisites and clinical considerations", *Pós-Grad Rev Fac Odontol São José dos Campos*, v. 4, n.1, pp. 22-27, Jan-April., 2001.
- [18] K. J. Åström, B. Wittenmark, "Computer Controlled Systems: Theory and Design", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 3rd ed., 1997.

coordinator of the Instrumentation and Photonics Laboratory at the Electrical Engineering Program of UFRJ. His research interests include fiber optics, sensors, transducers and instrumentation.



Marcella Nunes Gonçalves was born in Rio de Janeiro, Brazil. She graduated as an Electrical Engineer from Federal University of Rio de Janeiro, in 2013. She is currently pursuing the M.Sc. degree with the Electrical Engineering Program, Photonics and Instrumentation Laboratory (LIF), Federal University of Rio de Janeiro. Her current research interests include fiber optics sensors applied to electric power systems.



Bessie was born in Rio de Janeiro, Brazil. She graduated as a Telecommunications Engineer from Estácio de Sá University in 2008, and then obtained an M.Sc. degree from the Electrical Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, in 2011. Currently, she is a D.Sc student at the Electronic Engineering Program in the Photonics and Instrumentation Laboratory (LIF) at the Federal University of Rio de Janeiro. Her research interest lies in fiber optics sensors and

electronic instrumentation.



Fábio Vieira Batista de Nazaré was born in Maceió, state of Alagoas, Brazil, on February 10th, 1984. He graduated in electronic engineering from Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), in Recife, state of Pernambuco, Brazil (2007). Acted as research engineer at the Nuclear Instrumentation Laboratory – Regional Center of Nuclear Sciences, in Recife, Brazil. He has an M.Sc. degree in electrical engineering from COPPE/UFRJ (2010), and an D.Sc. deggre in electrical engineering from COPPE/UFRJ (2014), with the Instrumentation and Photonics Laboratory, in Rio de Janeiro, Brazil.

Currently, he acts as an electronic engineer at Universidade Federal do Rio de Janeiro.



Marcelo Martins Werneck was born in Petrópolis, state of Rio de Janeiro, Brazil. He received a degree in Electronic Engineering from the Pontifícia Universidade Católica of Rio de Janeiro, Brazil in 1975, and an M.Sc. degree from the Biomedical Engineering Program at the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Brazil, in 1977. He received his Ph.D. degree from the University of Sussex, Brighton, U.K., in 1985. Currently, he is a lecturer and researcher at UFRJ, where he has been since 1978, and he is the