



COPPE/UFRJ

SENSORES A FIBRA ÓPTICA COM TECNOLOGIA FBG PARA MEDIDA DE TEMPERATURA E ALTA TENSÃO

Regina Célia da Silva Barros Allil

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
Setembro de 2010

SENSORES A FIBRA ÓPTICA COM TECNOLOGIA FBG PARA MEDIDA DE
TEMPERATURA E ALTA TENSÃO

Regina Célia da Silva Barros Allil

TESE 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. Walter Suemitsu, Dr.Ing.

Prof^a. Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi, D.Sc.

Prof^a. Maria José Pontes, D.Sc.

Prof. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
SETEMBRO DE 2010

Allil, Regina Célia da Silva Barros

Sensores a fibra óptica com tecnologia FBG para medida de temperatura e alta tensão/Regina Célia da Silva Barros Allil.- Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

IX, 140 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 133-139.

1. Sensores a fibra óptica. 2. Fibras ópticas. 3. Redes de Bragg. 4. Cerâmicas Piezoelétricas. I. Werneck, Marcelo Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título

Agradecimentos

Meu sincero agradecimento ao Prof. Werneck pela orientação e apoio.

Às Profs. Maria Thereza Rocco e Maria José Pontes pela participação da banca e pela relevante contribuição através da iniciativa da capacitação tecnológica, na área de sensores a fibra óptica, que resultou neste trabalho.

Aos Profs. Walter Suemitsu e Marcos Tadeu de Azeredo pela participação da banca.

Ao comandante (Gen Minnicelli) e sub-comandante (Cel Prado) do Centro Tecnológico do Exército (CTEx) pela dispensa para a realização desta tese.

Aos colegas do LIF e do CTEx que contribuíram diretamente ou indiretamente.

À minha família pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Sobretudo a Deus pela realização deste trabalho, onde ELE se fez sempre presente nesta jornada através de todas as pessoas acima citadas. Meu profundo e eterno agradecimento.

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

SENSORES A FIBRA ÓPTICA COM TECNOLOGIA FBG PARA MEDIDA DE TEMPERATURA E ALTA TENSÃO

Regina Célia da Silva Barros Allil

Setembro/2010

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a aplicação de sensores ópticos baseados em Redes de Bragg na medida de temperatura em gerador hidroelétrico e na medida de tensão na classe de 15 kV para o desenvolvimento de Transformador de Potencial (TP) óptico.

O sistema de monitoramento de temperatura consiste de quatro transdutores baseados na tecnologia de rede de Bragg (FBG), interligados com cabo a fibra óptica que conduz as informações ópticas ao quadro de controle do gerador até um interrogador óptico. As informações podem ser acessadas remotamente visando a análise dos dados adquiridos para processamento e acompanhamento. Os sensores foram instalados no estator da Máquina 5 da UHE de Samuel em Porto Velho.

O sensor óptico de tensão consiste de uma FBG e uma cerâmica piezoelétrica à qual foi aplicada tensão na faixa de 1 kV a 7 kV. A cerâmica piezoelétrica utilizada é baseada em titanato zirconato de chumbo (PZT - Pb Zr Ti).

Os resultados foram considerados satisfatórios, comprovando a aplicação de sensores ópticos baseados na técnica de rede de Bragg, para medida de temperatura de geradores de potência em usina hidroelétrica e com cerâmicas piezoelétricas na medida de tensão.

Com relação à inovação da tese, não se tem informação da aplicação de sensores FBG aplicados na medida de temperatura em geradores hidroelétricos, nem tampouco na aplicação com cerâmicas PZT para medida de tensão no uso em TPs ópticos.

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

FIBER OPTIC SENSORS WITH FBG TECHNOLOGY FOR MEASURING
TEMPERATURE AND HIGH VOLTAGE

Regina Célia da Silva Barros Allil

September/2010

Advisor: Marcelo Martins Werneck

Department: Electrical Engineering

This work aims to demonstrate the application of optical sensors based on fiber Bragg gratings in temperature measurement in hydroelectric generator and in the voltage measurement of 15 kV class for the development of potential transformer (PT) length. The monitoring system consists of four temperature transducers based on fiber Bragg grating (FBG) technology, interconnected with a fiber optical cable which guides the optical information to the generator control board by/until an optical interrogator. Information can be accessed remotely in order to analyze the acquired data for processing and monitoring. The sensors were installed in the machine stator 5 UHE Samuel, in Porto Velho. The optical voltage sensor consists in a FBG and a piezoelectric ceramic which has been applied a voltage in the range 1 kV to 7 kV. Piezoelectric elements have the property of producing a mechanical stretch when an electrical signal (Reverse Effect or actuator) is applied. The piezoelectric ceramic used is based on lead zirconate titanate (PZT - Pb Zr Ti). The results were satisfactory, demonstrating the application of optical sensors based on fiber Bragg grating technique to measure temperature, of power generators in hydroelectric and piezoelectric ceramics in the tension measurement. According to thesis innovation, there is no information about the application of FBG sensors used in temperature measurement in hydroelectric generators nor in the application with PZT ceramics to measure voltage in use in optical TPs.

Capítulo 1. Introdução	3
1.1. Objetivo	
1.2. Motivação	
Capítulo 2. Estudo Bibliográfico	7
2.1. Sensores ópticos baseados em FBG	
2.2. Métodos convencionais para medida de temperatura	
2.3. Módulo de Young	
2.4. Propriedades da sílica	
2.5. Sensores ópticos para medida de tensão elétrica	
2.6. Cerâmicas piezoelétricas	
Capítulo 3. Aspectos Teóricos	25
3.1. Teoria sobre Rede de Bragg	
3.2. Princípio de Funcionamento das Redes de Bragg	
3.2.1. Sensibilidade para medida de temperatura na fibra óptica	
3.2.2. Sensibilidade para tensão longitudinal na fibra óptica	
3.3. Características de Redes de Bragg	
3.3.1. Tipos de Rede de Bragg	
3.3.2. Estruturas de uma Rede de Bragg	
3.3.3. Propriedades de uma FBG	
3.3.4. Atenuação	
3.4. Técnicas de gravação de Rede de Bragg	
3.5. Sistemas de Interrogação	
3.5.1. Estudo do processamento e análise do espectro óptico na determinação da variação do comprimento de onda de Bragg	
3.5.2. Cálculo dos centróides e software de cálculo	
3.5.3. Exemplo de aplicação da teoria dos centróides	
3.6. Teoria sobre cerâmica piezoelétrica	
3.7. Fabricação de cerâmica tipo PZT	
3.7.1. Definição do coeficiente de deslocamento piezoelétrico: d_{31}	
3.7.2. Definição do coeficiente de deslocamento piezoelétrico: d_{33}	
3.8. Parâmetros piezoelétricos	
Capítulo 4. Desenvolvimento do sensor de temperatura	59
4.1. Caracterização espectral das FBGs	
4.2. Caracterização espectral de seis FBGs em função da variação térmica	
4.3. Calibração dos sensores	
4.4. Desenvolvimento de hardware	
4.5. Instalação em campo	
4.5.1. Usina Hidroelétrica de Samuel	
4.5.2. Etapas da instalação	
4.6. Resultados e discussão do sensor de temperatura	
4.7. Recalibração dos sensores	
Capítulo 5. FBG e PZT como sensor de alta tensão	99
5.1. Deslocamento de Bragg com tensão Mecânica	
5.2. Set up elétrico	
5.3. Técnicas utilizadas nos experimentos com FBG PZT e seus resultados	
5.3.1. FBG colada e enrolada em torno da cerâmica PZT	

5.3.1.1. Resultado	
5.3.2. FBG colada longitudinalmente na cerâmica PZT	
5.3.2.1. Resultado	
5.3.3. Técnica com amplificador mecânico, Protótipo #1	
5.3.3.1. Resultado	
5.3.4. Técnica com amplificador mecânico, Protótipo #2	
5.3.4.1. Resultado	
5.3.5. Técnica com amplificador mecânico, Protótipo #3	
5.3.5.1. Resultado	
5.3.6. Técnica com STACK	
5.3.6.1. Resultado	
5.3.6.2. Técnica com stack submerso em óleo	
5.3.6.3. Resultado	
5.3.6.4. Stack aplicando tensão nos PZTs separadamente	
5.3.6.5. Resultado	
5.3.6.6. Discussão	
Capítulo 6. Conclusão	130
6.1. Sensor de temperatura	
6.2. Sensor de alta tensão	
Capítulo 7. Trabalhos Futuros	132
7.1. Medida de temperatura	
7.2. Medida de alta tensão	
Capítulo 8. Referências	133
8.1. FBG	
8.2. FBG e PZT	
ANEXOS:	140
1. Processamento de sinais e software – Sensor Bragg	
2. Artigos em congressos	
3. Publicações em periódicos internacionais	
4. Tabelas	
5. Manual de operação do sistema de interrogação	

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI – *American National Standards Institute*

ASE – *Amplified Spontaneous Emission* (amplificação por emissão espontânea)

DCP – Divisor capacitivo de potencial

DTG – Draw-Tower Grating (rede gravada na torre de puxamento da fibra)

FBG – *Fiber Bragg Grating* (rede de Bragg em fibra óptica)

IEC – Norma IEC (*International Electrotechnical Commission*)

ONS – Organizador Nacional do Sistema

OSA – *Optical Spectrum Analyzer* (analisador de espectro óptico)

OTDR – Optical Time Domain Reflectometry (reflectometria óptica por divisão do tempo)

PEPD – Programa Eletronorte de Pesquisa e Desenvolvimento

PZT- *Lead Zirconium Titanate*, Pb Zr Ti (Transdutor piezoelétrico de Titanato Zirconato de chumbo)

QCC – Quadro central de controle

QLC – Quadro local de controle

SIN – Sistema Interligado Nacional

T_c – Temperatura de Curie

TC – Transformador de corrente

TIA/EIA – *Telecommunication Industry Association/ Electronic Industry Association*

TP – Transformador de potencial

TRIP = *shut down* (desligar)

TV – Transformador de Tensão

UHE – Usina Hidroelétrica

Prefácio

Este trabalho descreve o desenvolvimento e aplicação de sensores ópticos baseados na tecnologia de rede de Bragg em duas relevantes grandezas da área de Energia Elétrica, temperatura e alta tensão.

O desenvolvimento dos sensores ópticos para medida de temperatura em gerador hidroelétrico baseado na tecnologia de rede de Bragg foi realizado através do Programa Eletronorte de Pesquisa e Desenvolvimento (PEPD), como Projeto “Desenvolvimento de Tecnologia Óptica de Medição de Temperatura de Geradores de Potência“. Este projeto teve como objetivo desenvolver sensores ópticos para medida de temperatura para aplicação em local hostil. A instalação dos sensores de temperatura foi realizada na Usina Hidroelétrica de Samuel (Porto Velho, RO). O interesse por esta usina foi despertado pela possibilidade do agendamento para paralisação das máquinas para testes, poder ser aliado com o planejamento anual para manutenção. Desta forma, foi possível a instalação e a realização dos testes necessários para a validação do sistema.

Hoje estão instalados quatro sensores ópticos na Máquina 5 da UHE de Samuel. O monitoramento da temperatura é realizado remotamente por um sistema de interrogação, que está localizado no Quadro de Controle Local (QLC) situado no piso superior do local onde se encontram os sensores. Atualmente, nós podemos acompanhar o desempenho do sistema através dos dados enviados para a Regional de Belém e para o LIF/COPPE/UFRJ.

O sensor óptico para a medida de alta tensão foi desenvolvido com a colaboração da Petrobras, Sociedade Fluminense de Energia-Usina Termoelétrica Barbosa Lima Sobrinho (Seropédica, RJ) através do Projeto “Pesquisa Básica de Tecnologia Óptica para Medida em Média Tensão utilizando rede de Bragg e cerâmicas Piezoelétricas“. Este projeto consiste no desenvolvimento de um protótipo de um transformador de potencial (TP) para a classe de 15 kV (13,8 kV) para possível substituição aos TPs convencionais que apresentam alto peso e volume provenientes do ferro, cobre e cerâmica utilizados em grandes quantidades.

Esta tese está estruturada da seguinte maneira:

Capítulo 1 - Descreve uma breve introdução referente aos transdutores a fibra óptica para medida de temperatura, quando comparados aos sensores convencionais. Neste capítulo também é descrita uma sucinta introdução sobre a função relevante de um

transformador de potencial e uma analogia é feita entre os sistemas convencionais e os sensores ópticos para aplicação no setor elétrico.

Capítulo 2 - Apresenta o estudo bibliográfico do estado da arte de sensores ópticos baseados em rede de Bragg para medida de grandezas. Uma discussão sobre a tecnologia de rede de Bragg (FBG-Fiber Bragg Grating) é apresentada para diversas aplicações em sensoriamento. Este capítulo também apresenta alguns métodos convencionais para a medida de temperatura.

Neste capítulo também é apresentado o estudo bibliográfico sobre sensores ópticos para medida de tensão em rede de Bragg e cerâmicas piezoelétricas do tipo PZT a partir de um *strain*. Uma discussão sobre sensores ópticos para medida de tensão elétrica e cerâmica piezoelétrica do tipo PZT como transdutor é apresentada. São descritas as tecnologias convencionais de TCs aplicados à alta tensão, como também as tecnologias ópticas aplicadas em TCs comerciais.

É aconselhável que se leia primeiramente o Capítulo 3 (teoria sobre FBG e cerâmica piezoelétrica) antes da revisão bibliográfica, uma vez que está última contém termos técnicos, até então não definidos.

Capítulo 3 - Descreve a teoria da tecnologia de rede de Bragg, o princípio de funcionamento, as características principais, as estruturas, as propriedades de uma FBG e a atenuação óptica. São apresentados os sistemas de interrogação mais utilizados nos sistemas de FBG e o estudo realizado no processamento e análise do espectro óptico na determinação do deslocamento do comprimento de onda de Bragg, através do cálculo do centróide.

Neste capítulo também é apresentada a teoria de cerâmicas piezoelétricas, o princípio de funcionamento do efeito piezoelétrico, como se obtém uma cerâmica PZT e seus principais parâmetros e constantes piezoelétricas.

Capítulo 4 - FBG como sensor de temperatura, resultados e discussão.

Capítulo 5 - FBG com PZT como sensor de alta tensão, resultados e discussão.

Capítulo 6 - Conclusões.

Capítulo 7 - Trabalhos futuros.

Capítulo 8 - Referências bibliográficas.

ANEXOS

Capítulo 1. Introdução

Este capítulo descreve o objetivo desta tese e a motivação referente aos transdutores a fibra óptica para medida de temperatura e a função relevante de um transformador de potencial. Uma analogia também é feita entre os sistemas convencionais e os sensores ópticos para aplicação no setor elétrico.

1.1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a aplicação de sensores ópticos baseados em Redes de Bragg em duas vertentes da área elétrica: medida de temperatura e alta tensão.

Na medida de temperatura foram desenvolvidos sensores a fibra óptica multiplexados utilizando a técnica de FBG (*Fiber Bragg Grating*), instalados em pontos estratégicos dentro de um gerador hidroelétrico.

Na medida de tensão na classe 15 kV, através de FBG e cristais piezoelétricos do tipo PZT, visamos o desenvolvimento de um protótipo de Transformador de Potencial (TP).

1.2. Motivação

O sensoriamento de grandezas físicas tem sido objeto de estudo desde a pré-história com o reconhecimento pelo homem de seus próprios órgãos sensores. Com a Revolução Industrial os sensores se tornaram imprescindíveis para controlar as máquinas e as mais diferentes tecnologias começaram a ser pesquisadas, inventadas e desenvolvidas.

Atualmente, existem sensores para medida de várias grandezas e com a sensibilidade, repetibilidade, confiabilidade e largura de faixa, apropriados para cada necessidade. Entretanto, existem algumas aplicações em que os sensores convencionais (eletro-eletrônicos) não atendem, como por exemplo, ambientes inflamáveis, determinados exames médicos, multiplexação, sensoriamento remoto, ambientes com excessiva radiação eletromagnética e ambientes de alta tensão.

Para estes casos, os transdutores a fibra óptica se tornam a opção preferencial, pois eles dispõem de características específicas que nenhuma outra tecnologia pode oferecer. Podemos citar: completa imunidade à interferência eletromagnética (EMI), total isolamento galvânico, possibilidade de realizar sensoriamento remoto, realização

de medidas distribuídas, medidas utilizando sensores passivos, acesso em ambientes exíguos (baixo peso e pequenas dimensões) e excelente largura de faixa (Udd, 1991).

Sensores a fibra óptica têm se mostrado uma ótima alternativa para o monitoramento de diversos parâmetros físicos encontrados no mundo industrial. Em razão disto, os sensores ópticos se tornaram robustos e confiáveis. Aliando estas características às vantagens já citadas desta tecnologia, estes sensores passaram a ser atrativos também à área de energia elétrica.

A temperatura é um importante parâmetro na área elétrica através do monitoramento em isoladores, condutores de cobre, núcleos de ferro de transformadores, óleo isolante e equipamentos sensíveis à temperatura que devem ser mantidos sob rigoroso controle (Werneck e colaboradores, 2009). Esta grandeza também é muito relevante nas usinas hidroelétricas, sendo considerada um dos principais sinais de controle. Uma vez ocorrendo excessos dos valores limites, vários danos podem ser causados nos isoladores, condutores ou em equipamentos, comprometendo o funcionamento adequado e seguro de uma usina.

São vários os pontos críticos de um gerador hidroelétrico, onde a temperatura (de ar quente e ar frio) deve ser constantemente monitorada. Atualmente, a usina hidroelétrica de Samuel, localizada em Porto Velho (RO) utiliza vários sensores de temperatura convencionais, onde cada ponto de medida exige uma caixa de comando e pelo menos três cabos elétricos interligando o ponto de medida e o QLC (quadro de controle local) da máquina, com o sistema de supervisão geral.

Neste caso, os sensores a fibra óptica para a medida de temperatura e tensão elétrica são vantajosos, pois não necessitam de caixa de comando local, podem operar em contato físico com alta tensão e a não necessidade de energia elétrica no elemento sensor, permite o desenvolvimento de sistemas de monitoramento de máquinas elétricas em pontos de difícil acesso e em potencial, através do sensoriamento remoto. Além disso, os sensores são acionados por uma única fibra óptica que pode interligar inúmeros sensores, conduzindo seus respectivos sinais a um ponto de monitoramento remoto no supervisão.

Dessa forma, há uma substancial diminuição do número de cabos elétricos que trafegam dentro da usina, com evidente economia de custo, espaço e praticidade.

Os sensores ópticos baseados em rede de Bragg para a medida e monitoramento de temperatura, vêm sendo atualmente alvo de grande interesse por apresentarem soluções para aplicações onde ocorrem restrições ao uso de sensores convencionais,

além de apresentarem características de desempenho ou custo/benefício competitivos com outras técnicas (da Silva e colaboradores, 2003).

Esses sistemas vêm sendo pesquisados e desenvolvidos no monitoramento de estruturas, com aplicações específicas, em locais com substâncias inflamáveis, explosivas, em ambientes de alta tensão ou com alta presença de campo magnético.

O sensoriamento de tensão e corrente em linhas de alta tensão tem sido um problema complexo que acompanha a tecnologia de sistemas de potência, desde seu surgimento até os dias de hoje. Podemos destacar, primeiramente, o fato de que não se pode utilizar o mesmo sistema da área de baixa tensão na área de alta tensão. O segundo aspecto, é que o número elevado de usuários de sistemas de baixa tensão é muito maior e se justifica pela falta de recursos tecnológicos para a alta tensão. Outro ponto a ser mencionado é o fator segurança, que exige uma distância mínima do ser humano ao trabalhar com alta tensão, em torno de 10 cm para cada 10 kV, necessitando o uso de determinadas técnicas (varas de manobra ou desligamento de rede) para possível conexão dos equipamentos. Como nenhuma técnica é ideal, torna-se necessário adaptar ou desenvolver novas tecnologias para medidas de tensão e corrente em linhas de alta tensão (Werneck, 1996).

Nas linhas de distribuição de energia elétrica existe a necessidade constante de se monitorar tensão e corrente. A maioria dos equipamentos usados está conectado à linha de alta tensão, desta forma, ficam energizados, dificultando a medida por dispositivos eletrônicos e também o acesso do operador.

Os transformadores de potencial têm a função estratégica de prover medidas acuradas e confiáveis. A tecnologia convencional, utilizada por mais de um século, teve uma evolução substancial e hoje os transformadores de medida são as ferramentas disponíveis para as concessionárias de energia elétrica. Entretanto, novas tecnologias de sensores estão melhor atendendo aos desafios hoje exigidos pelas concessionárias. São os equipamentos optoeletrônicos com tecnologia à fibra óptica, que apresentam cada vez mais vantagens que as tecnologias convencionais. Testes de laboratório e exemplos disponíveis de aplicação desta tecnologia mostram simplicidade de funcionamento, factibilidade e principalmente confiabilidade (Werneck, 1996).

Os equipamentos existentes com tecnologia convencional como, por exemplo, os Divisores Capacitivos de Potencial (DCPs), apresentam grande peso e volume.

A pesquisa de uma nova técnica óptica permitirá o desenvolvimento de um protótipo que não utilizará ferro nem cobre, alguns dos elementos mais pesados

encontrados nestes equipamentos.

Capítulo 2. Estudo Bibliográfico

Este capítulo apresenta o estudo bibliográfico do estado da arte de sensores ópticos baseados em FBG para medida de grandezas e alguns métodos convencionais utilizados para a medida de temperatura.

Será abordado também o estudo de sensores ópticos para medida de tensão baseado em FBG e cerâmicas piezoelétricas do tipo PZT, a partir de um *strain*, assim como a pesquisa realizada sobre o módulo de Young e as principais propriedades da sílica.

2.1. Sensores ópticos baseados em FBG

O uso de sensores ópticos baseados em rede de Bragg para medida de temperatura, requer basicamente, a iluminação da rede com fonte óptica de largura espectral suficiente para cobrir toda a faixa esperada de deslocamento e sistema para demodular a informação contida no espectro refletido pela rede (da Silva e colaboradores, 2003).

As Redes de Bragg escritas em fibras ópticas constituem-se em uma modulação axial (ao longo da fibra) do índice de refração do núcleo e foram acidentalmente descobertas (Hill e colaboradores, 1978). Posteriormente, foi criado um método holográfico de escrita perpendicular à fibra, sendo então possível escrever a FBG na faixa de telecomunicações (Lam e Garside, 1981).

As FBGs podem ser escritas com o método holográfico transversal (Meltz e colaboradores, 1989) ou através da técnica de máscara de fase (Kashyap, 1994). Ambos os métodos constituem de um laser na faixa do UV (180 - 220 nm) com potência adequada (Askins e colaboradores, 1992). Para aumentar a fotosensibilidade das fibras e conseqüentemente, construir redes de Bragg mais eficientes e mais rapidamente, é recomendável recorrer à técnica da hidrogenação (Lemaire e colaboradores, 1993).

As redes de Bragg gravadas em fibras ópticas constituem-se em dispositivos relevantes para o sensoriamento de grandezas (Rao, e colaboradores, 1997). Uma rede de Bragg pode tornar-se um sensor de temperatura em função da variação térmica a qual a rede é submetida, resultando na alteração do seu comprimento de onda central de Bragg (λ_{Bragg}), (LeBlanc e colaboradores, 1996). Ou seja, o período (Λ) da modulação do índice de refração terá uma variação e o comprimento de onda de Bragg (λ_{Bragg}) refletido terá seu pico deslocado espectralmente.

No caso de um sistema composto por várias redes de Bragg, com diferentes comprimentos de onda de Bragg inseridas espaçadamente em uma mesma fibra óptica monomodo, com diversos pontos de sensoriamento distintos, denomina-se multiplexação em comprimento de onda (Rao e colaboradores, 1996).

O elemento relevante de um sistema baseado em FBG é o interrogador óptico. O sistema de interrogação é responsável pela leitura e a demodulação através do deslocamento do espectro refletido pela rede, devido à variação da grandeza a ser medida ou monitorada. A demodulação pode ser realizada por várias técnicas, podendo-se citar:

- A utilização de um analisador espectral óptico (OSA), que consiste na utilização de uma fonte de grande largura espectral, um circulador óptico ou um acoplador óptico direcional (Barbosa e colaboradores, 2000) e (Cazo e colaboradores, 2000).
- Pelo método do cálculo do centróide de massa, onde o cálculo de λ_c (comprimento de onda do centróide) em função de T (temperatura) é obtido a partir do cálculo do centro de massa (Carneiro e Girão, 2004) e (Paterno e colaboradores, 2005).
- A utilização de redes gêmeas, que consiste na utilização de uma segunda rede com comprimento de onda próximo daquela a ser monitorada, medindo a potência no espectro de correlação entre as duas (Cazo, 2001).
- Filtro óptico sintonizado, que baseia-se na utilização de um filtro óptico para cada rede de Bragg. Porém, pelo fato de cada rede ter seu filtro, torna o sistema caro, caso haja um número grande de redes (Morikawa e colaboradores, 2002).
- Filtro óptico eletricamente sintonizável é a melhor solução. Desta forma, a interrogação das redes é feita individualmente pelo próprio sistema, que sintoniza o filtro em cada comprimento de onda de cada FBG e lê o desvio espectral respectivo de cada rede (Kersey e colaboradores, 1997).

Este estudo pode ser finalizado com algumas citações da aplicação de sensores ópticos baseados em FBG para medida de temperatura.

1- Um sistema composto por uma fonte de banda larga iluminando uma rede de FBG e a demodulação da informação contida no espectro refletido pela rede, realizada através da configuração que utiliza uma segunda rede, visando medir a potência no espectro de correlação entre as duas FBGs (da Silva e colaboradores, 2003). O esquema descrito nesta referência apresenta algumas limitações. Uma delas deriva do baixo tempo de resposta do sistema controlador de temperatura no termo-elemento, que impede medidas

onde a variação de temperatura é rápida. Tipicamente, o intervalo de tempo necessário para estabilizar o termo-elemento quando a temperatura varia de alguns graus é da ordem de uma dezena de segundos. Outra limitação é decorrente do próprio esquema sensor utilizado. Como a demodulação é realizada por uma rede de Bragg idêntica à rede sensora, a faixa dinâmica de medida está limitada pela faixa dinâmica do controlador de temperatura. A primeira limitação pode ser relaxada em vários sistemas de instrumentação onde a medida e controle de temperatura não necessitam de tempos de resposta muito curtos (por exemplo, em reações onde a capacidade térmica envolvida é muito alta). Quanto à segunda, sua solução requer uma ampliação da faixa dinâmica da rede em função da temperatura, o que pode ser implementado de maneira simples, colando a rede sobre um substrato com diferente coeficiente de expansão térmica (Kalinowski e colaboradores, 2003).

2- O princípio básico de operação dos sensores ópticos baseados em rede de Bragg baseia-se na medição dos desvios em comprimento de onda induzidos por variação das principais grandezas: temperatura, deformação mecânica (Morey e colaboradores, 1989), pressão (Xu e colaboradores, 1993) e campos magnéticos (Kersey e colaboradores, 1994). No entanto, dada a importância da prática atribuída aos sensores de temperatura e de deformação, a maioria das demonstrações com base nos sensores de Bragg tem sido centrada nessas duas aplicações (Melle e colaboradores, 1993 e Rao e colaboradores, 1997).

3- A implementação de um instrumento de medição usando sensores de Bragg em fibra óptica, para serem utilizados na análise de desempenho de motores de indução é descrito em Grabarski e colaboradores, 2000. O sistema é capaz de executar medidas de temperatura e deformação (estáticas e dinâmicas), onde o principal componente é um dispositivo óptico integrado comercial, fabricado pela Santec (OWL-10-WT). O dispositivo opera como um transdutor de sinais ópticos e pode ser considerado de baixo custo comparado a outros instrumentos similares.

4- Uma contribuição relevante é apresentada através do estudo sobre as principais técnicas de leitura de sensores de FBG, aplicados nas medidas de temperatura e deformação, enfatizando parâmetros como a capacidade de multiplexação, faixa de frequência de aplicação e custo. São apresentadas as técnicas que permitem, a realização de leituras multiplexadas (16 canais) de deformação com exatidão de 0,03% do fundo de escala, numa faixa dinâmica de 6000 $\mu\text{m}/\text{m}$ e em banda de frequência de até 200 Hz. Também são discutidos alguns aperfeiçoamentos em curso e resultados preliminares de

medições com equipamentos comerciais de reflectometria óptica no domínio do tempo, que podem permitir a interrogação estática de centenas de sensores em uma mesma fibra óptica com excelente precisão (Valente e colaboradores, 2002).

A literatura apresenta inúmeras aplicações da tecnologia de FBG na área de sensoriamento (Betz e colaboradores, 2003). Para um maior aprofundamento, segue a discussão abaixo com algumas referências que podem ser consultadas.

- Pesquisa relacionada na área de sensoriamento óptico baseado em redes de Bragg é demonstrada para medida de *strain*, sistemas com redes aperiódicas (*chirped gratings*), sensores baseados em rede de período longo (LPG) e sistemas com sensores interferométricos (Kersey e colaboradores, 1997).

- A técnica de FBG é recomendável na aplicação de WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) em redes ópticas na frequência nominal de 193,1 THz, em atendimento a ITU (*International Telecommunication Union*). É descrito também um método preciso de ajuste fino do comprimento de onda de Bragg durante o processo da escrita (Grosso e colaboradores, 2002).

- Uma nova técnica é descrita para detecção simultânea de *strain* e temperatura. O sistema utiliza dois tipos diferentes de redes a fibra óptica (FBG e filtro de polarização). As duas medidas podem ser determinadas pelo comprimento de onda ressonante de cada rede (Soliris e colaboradores, 1995).

- A capacidade de utilização de sensores à fibra óptica para medidas de alta potência em linhas de transmissão aérea é descrita através de um sistema experimental com três redes de Bragg, incluindo a temperatura como referência, instalado em uma linha de 60 kV com um sistema de interrogação sintonizável (Leif, 2000).

- A evolução dos sensores à fibra óptica baseados em FBG e na técnica da modulação de intensidade é demonstrada através das medidas de deslocamento, *strain*, pressão e temperatura para aplicação na engenharia civil e minas. Visando o controle da estabilidade das estruturas para a segurança dos trabalhadores, bem como para as questões ambientais. A precisão e a estabilidade dos sensores ópticos desenvolvidos também são discutidas (Jobmann e colaboradores, 1998).

- Um sensor de FBG para medida de temperatura estática e flutuante é apresentado. Os resultados demonstram que o sensor de FBG pode ser usado para medir a temperatura estática e flutuante. É demonstrado que o sensor de FBG, devido a sua singularidade, tem uma excelente perspectiva na medição desta grandeza (Wang e colaboradores, 2003).

- Redes de Bragg em fibra óptica de baixa refletância podem ser interrogadas em tempo real com alta resolução óptica usando de reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR). A técnica permite a interrogação de uma série de FBGs para a medição de temperatura distribuída. Este sistema reduz a influência da flutuação da fonte de alimentação (Zhang e colaboradores, 2003).
- Um método simples de caracterizar a sensibilidade dos modos de propagação da casca da fibra óptica, é proposto em função das condições ambientais. Estas sensibilidades para condições tais como, temperatura, pressão e índice de refração do meio externo são de particular relevância para a fabricação de redes de período longo (LPG) (Besley, e colaboradores, 2003).
- O desenvolvimento de um sensor de FBG para medida de pressão e temperatura é apresentado. Os autores mostram resultados simulados que indicam a sensibilidade na medida de pressão e temperatura estimadas para 8,5 pm/MPa e 27,5 pm/°C, respectivamente (Zhao, e colaboradores, 2002).
- Técnicas ópticas para medidas interferométricas, espectrométricas e polarimétricas vêm sendo utilizadas em materiais de medidas e avaliação ambiental. A fibra óptica auxilia na aplicação destes conceitos básicos. Os autores retratam que a tecnologia óptica tem por mais de trinta anos, feito contribuições importantes para a ciência das medidas. Este artigo apresenta uma perspectiva sobre estas contribuições e destaca a importância conceitual dos avanços da tecnologia óptica e na amplitude de aplicações (Culshaw, 2000).
- O excelente desempenho das redes de período longo (LPG) é apresentado e o mecanismo fundamental para a formação das redes é proposto. O comportamento térmico e o efeito da fibra com pré-recozimento antes da escrita têm sido investigados. Os autores (Rego e colaboradores, 2001) demonstraram uma boa estabilidade destas redes em temperaturas elevadas.
- O uso de FBGs como sensores ultra-sônicos em monitoração apresenta muitas vantagens em relação às soluções eletro-eletrônicas, como os extensômetros (Paulo de Tarso, 2008), podendo-se citar: tamanho reduzido, imunidade a interferência eletromagnética, além de facilidade de integração às estruturas. (Othonos e Kali, 1999)
- A análise do comportamento temporal do espectro refletido pelas FBGs pode ser de grande utilidade na prevenção de abalos sísmicos e atividades vulcânicas, substituindo com sucesso os acelerômetros convencionais (Laudati e colaboradores, 2007), na

estimativa do tempo de resposta em moduladores acusto-ópticos (Delgado-Pinar, e colaboradores, 2006).

2.2. Métodos convencionais para medida de temperatura

O sensor óptico proposto baseado em FBG apresenta algumas vantagens quando comparado aos sensores de temperatura comerciais que utilizam métodos convencionais, tais como:

- Transdutores resistivos: os transdutores de temperatura mais utilizados em equipamentos comerciais e científicos são os sensores resistivos, cujo princípio de funcionamento é baseado na variação de resistência de condutores elétricos com a temperatura. Para qualquer material condutor podemos relacionar a resistência em função de suas dimensões físicas e de sua resistividade.

1- RTD (Resistance Temperature Detectors): se medirmos a resistência de um fio de platina, podemos saber a sua temperatura caso conheçamos suas dimensões. Aproveitando-se dessa linearidade da resistividade da platina aliada ao grande range de temperatura, desenvolveram-se sensores de temperatura conhecidos como RTD ou detectores resistivos de temperatura. São sensores do tipo PTC (coeficiente de temperatura positivo), geralmente confeccionados com platina. As vantagens desses dispositivos são linearidade, repetibilidade de valores e rapidez de resposta. Podendo-se citar como exemplo, Pt-100.

Pt-100 é um transdutor de temperatura resistivo composto de platina pura (100 Ω a 0 °C). Estruturalmente, é uma resistência feita com um fio bastante fino de platina ligado em dois lides, sendo suportada em uma base de cerâmica. A resistência da platina varia de forma diretamente proporcional com a temperatura como todos os metais, mas a platina é utilizada devido a sua alta condutibilidade. Emprega-se muito Pt-100 na indústria para sensoriamento de temperatura de processos por alguns motivos: possui boa linearidade, suporta temperaturas de até 600 °C e é fácil desenvolver dispositivos eletrônicos para monitorá-lo, ao contrário dos termopares. O Pt-100 também possui todos os seus parâmetros pré-definidos e bastante confiáveis, facilitando validações de técnicas e processos. Os dispositivos para monitorá-lo podem ser por corrente (em série com o sensor), tomando cuidado para que a corrente mantenha-se em valores muito baixos para não promover aquecimento "*in loco*" e, conseqüentemente erro na medição, ou por tensão, utilizando um divisor resistivo e um circuito que se comporte como um voltímetro (picoTechnology, 11/08/09 e directindustry, 11/08/09).

2- Termistor: aproveitando-se da propriedade da variação da resistividade de algumas ligas e óxidos metálicos com a temperatura, o termistor foi inventado. Ele é um dispositivo cuja resistência é variável com a temperatura de seu material, seja essa variação devido a uma causa externa (uma elevação de temperatura ambiente, por exemplo) ou interna (o calor devido à sua própria dissipação térmica por efeito Joule). Os termistores são em sua grande maioria tipo NTC (coeficiente de temperatura negativo) existindo também termistores tipo PTC (coeficiente de temperatura positivo) para aplicações especiais. Os termistores são fabricados a partir de uma mistura de óxidos metálicos (manganês, cobre, níquel, titânio, cobalto, lítio ou ferro) sinterizados sob pressão e altas temperaturas (Werneck, 1996). O termistor é muito utilizado para medidas de baixas temperaturas, 0 °C a 150 °C. Tem como vantagem seu tamanho reduzido, no entanto não apresenta resposta linear.

- Semicondutores: a resposta dos termistores não é linear e isso pode ser um problema para algumas aplicações. Uma alternativa é o uso das junções semicondutoras. Em uma junção PN, para uma tensão V_{be} fixa, a corrente varia exponencialmente com a temperatura ou para uma corrente fixa, a tensão V_{be} varia linearmente com a temperatura. O uso dos transistores para medição de temperatura partiu da casualidade. Depois da sua invenção, descobriu-se que os seus parâmetros variavam com a temperatura. Atualmente, alguns pesquisadores tentam fabricar transistores de características independentes da temperatura, outros aproveitam esse fato para desenvolver dispositivos para medir temperatura. Desta forma, os fabricantes de transistores otimizaram a variação de certas características de tais dispositivos com a temperatura para vendê-los especialmente para esse fim. Surgindo os sensores de temperatura de junção semicondutora (Werneck, 1996).

- Termopares: ao colocarmos dois metais diferentes em contato elétrico, haverá uma diferença de potencial entre eles, que é função da temperatura. Esse fenômeno tem o nome de efeito termoelétrico e é utilizado para medir temperaturas num espectro amplo. A junção é feita soldando-se dois fios de metais diferentes por suas pontas, sem utilizar na solda nenhum outro material que não seja os dois metais, que é usualmente obtido por um arco elétrico dentro do qual os dois fios são colocados. Tendo por objetivo uma implementação do método de medir temperaturas, foram pesquisados diferentes tipos de metais e ligas para se obter linearidade, acurácia, grandes coeficientes de temperatura e repetibilidade. Assim chegou-se a uma largura de espectro que vai desde alguns Kelvin (cerca de -270 °C) até cerca de 2500 °C e a uma razoável resolução de 0,5 °C a 2 °C,

com coeficientes de temperaturas de 5 a 50 $\mu\text{V}/\text{K}$. Dependendo dos metais da junção, obtêm-se características diferentes que caracterizam a aplicação da junção (Werneck, 1996).

- Pirômetro óptico: um método um pouco mais sofisticado de medir a temperatura é utilizado pelo pirômetro óptico, que mede temperatura de altos-fornos ou de tochas de maçarico de temperaturas elevadas. Esse método utiliza a Lei de Planck, que prevê o fluxo radiante de energia por unidade de área de um corpo negro em função da temperatura. Estende-se esse princípio a todas as substâncias que podem emitir luz ao se tornarem incandescentes (Werneck, 1996).

Determinados sensores comerciais necessitam que o módulo de detecção do sinal fique nas suas proximidades, em virtude das perdas por transmissão inerente aos sinais elétricos. Já o sistema proposto de demodulação permite que o módulo de detecção possa ficar até a alguns quilômetros do local da medida (Kalinowski e colaboradores, 2003).

2.3. Módulo de Young

Neste item será abordado o estudo sobre sensores ópticos para medida de tensão baseado em rede de Bragg e cerâmicas piezoelétricas do tipo PZT, a partir de uma deformação. Entretanto, primeiramente, será mostrada a pesquisa realizada sobre Módulo de Young e as principais propriedades da sílica.

Para descrever as propriedades elásticas de objetos tais como bastões, arames, colunas, vigas etc, que podem ser alongados ou comprimidos, foi definido o Módulo de Young (Y).

O módulo de Young é definido como a razão entre o *stress* e o *strain*, ou seja, entre a tensão e o alongamento.

$$\text{Tensão (stress): } \sigma = F/A \quad (1)$$

$$\text{Alongamento (strain): } \epsilon = \Delta L/L \quad (2)$$

$$\text{Módulo de Young: } Y = \sigma/\epsilon \quad (3)$$

Nas equações acima, F é a força, A é a área da seção reta e ΔL é o alongamento de uma peça de comprimento L. O módulo de Young pode ser utilizado para prever o alongamento ou compressão de um objeto quando sujeito a uma força, desde que essa

força seja menor do que uma força limiar (*yield strength*) do material. A força limiar ou tensão limiar é a força a partir da qual o material não apresenta mais propriedades elásticas.

A Figura 2.1 mostra que existe um comportamento linear entre a tensão (eixo vertical) e o alongamento (eixo horizontal) entre o ponto 1 e o ponto 2. A partir daí, entre os pontos 2 e 3 o comportamento não é mais linear. A partir do ponto 3, entretanto, quando a força volta a zero o alongamento não retorna a zero e a peça não retorna ao comprimento original, ou seja, houve uma extensão caracterizando um comportamento plástico. Assim, o ponto 3 indica o valor da força limiar ou *yield strength*.

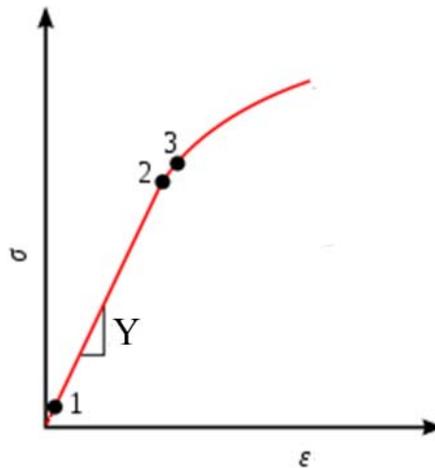


Figura 2.1 Definição do módulo de Young.

A Tabela 2.1 apresenta o módulo de Young juntamente com outras propriedades físicas de vários materiais para comparação com o vidro (Iupac, 2009, Glassproperties, 2009 e Engineeringtoolbox/Young-modulus, 2009).

Tabela 2.1 Propriedades físicas de alguns materiais

Material	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Tensão de Ruptura 10 ⁶ N/m ²	Yield Strength 10 ⁶ N/m ²
Aço	7,86	200	400	250
Aço inoxidável (AISI 302)	*	*	860	520
Ferro	*	211	350	*
Liga de Titânio (6%Al-4%V)	*	*	900	830
Alumínio	2,71	70	110	95
Cobre (99%)	8,92	110-130	220	70
Latão (Cu + Zn)	5,3	103-124	550	200
Tungstênio	19,3	411	1510	
Aramid (Kevlar)	1,44	*	*	3620
Silício monocristalino (m-Si)	2.33	107	7000	*
Carbeto de silício (SiC)	*	450	3440	*
Safira (Al ₂ O ₃)	*	435	1900	*
Vidro	2,19	65	50	*
Concreto	2,32	30	40	*
Madeira	0,53	13	50	*
Poliestireno	1,05	3	48	*
Polietileno (High density polyethylene - HDPE)	0.95	0,8-1,38	37	30
Polipropileno	0.91	*	19.7-80	*
PTFE (Teflon)	*	0,5	*	*
Polypropylene	*	1,5-2	40	*
Polystyrene	*	3-3,5	40	*
Nylon	*	2-4	75	45
MDF (compósito de madeira)	*	3,654	*	*
Madeira de Pinho (ao longo da fibra)	*	8,963	*	*
Concreto (compressão)	*	30-100	*	*
Fibra de carbono	*	125-150	*	*
Diamante	*	1220	*	*
Plástico ABS	*	2,3	40	*
Acrílico	*	3,2	70	*
Policarbonato	*	2,6	70	*
Polyethylene Terephthalate (PET)	*	2-2,7	55	*

* Dados indisponíveis.

Nota 1: $1 \text{ N/m}^2 = 1 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ Pa} = 1.4504 \times 10^{-4} \text{ psi}$
 $1 \text{ psi (lb/in}^2) = 6,894.8 \text{ Pa (N/m}^2) = 6.895 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$

Nota 2: O módulo de Young varia de amostra para amostra e com o tipo de teste.
 Por esta razão os valores apresentados nesta tabela são aproximados.

A Tabela 2.2 apresenta a composição química de alguns tipos de vidros (Doremus, 1994 e Britglass, 2009).

Tabela 2.2 Composição percentual de alguns tipos de vidros.

Substância	Soda Lime	Borosilicato	Lã de Vidro	Vidro com chumbo	Sílica	Vidro de germânio	Vidro de seleneto de germânio	BK7
SiO ₂	74	81	63	41,2	100			X
Na ₂ O	13	4	16					
CaO	10,5	0,02	8	2,5				
Al ₂ O ₃	1,3	2,2	5					
K ₂ O	0,3	0,06	0,8	3,0				X
SO ₃	0,2		0,2					
MgO	0,2		3,5					
TiO ₂	0,01							
Fe ₂ O ₃	0,04		0,3					
B ₂ O ₃		12,5	3,3					X
PbO				34,1				
BaO				12,4				X
ZnO				6,3				X
SbO ₃				0,35				
As ₂ O ₃				0,2				
GeO ₂						100		
GeSe ₂							100	
P ₂ O ₅								X
CaF ₂								X

A Tabela 2.3 apresenta algumas propriedades físicas dos tipos de vidro mais comuns (Doremus, 1994).

Tabela 2.3 Propriedades físicas de alguns tipos de vidro

Propriedade	Soda Lime	Borosilicato	Lã de Vidro	Vidro com chumbo	Sílica	Vidro de germânio	Vidro de seleneto de germânio	BK7
Aplicação	Garrafas e vidros de janela	Pyrex	Isolação térmica	Lentes	Fibras ópticas	Objetivas fotográficas e de microscópio, janelas para infravermelho	Janelas para infravermelho distante	Lentes de precisão guias de luz
Temperatura de transição vítrea, T _g [°C]	573	536	551	540	1140	526	395	*
Coefficiente de expansão térmica [ppm/K]	9	3,5	10	7	0,55	7,3	*	5
Densidade [g/cm ³]	2,52	2,24	2,55	3,86	2,20	3,65	4,16	*
Índice de refração @550 nm	1,518	1,473	1,531	1,650	1,459	1,608	1,7	1,52
Módulo de Young [GPa]	72	65	75	67	72	43,3	*	*
Temperatura de liquefação [°C]	1040	1070	*	*	1715	1115	*	*
Capacidade térmica [J/(mol K)]	49	50	50	51	44	52	*	*
Viscosidade na temperatura de liquefação [Pa s]	8,46E+02	1,25E+04	*	*	1,92E+06	6,70E+04	8,46E+02	*

* Dados indisponíveis.

Podemos tirar algumas conclusões da Tabela 2.3:

A sílica é o vidro que apresenta a maior temperatura de transição vítrea e de liquefação entre todos os outros vidros. Por isso, adicionam-se alguns produtos na sílica para abaixar a temperatura de fusão, produzindo assim vidros mais fáceis de serem trabalhados. Em torno de 500 °C pode-se derreter os vidros usando-se chama de gás comum. A sílica é também o vidro com a maior transparência adequada para fibras ópticas.

A viscosidade dinâmica é medida em Poise (P) com a seguinte equivalência no sistema SI:

$$10 \text{ P} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}, \text{ logo, } 1 \text{ cP} = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$$

Sendo que a água tem uma viscosidade de 1,0020 cP a 20 °C.

A viscosidade dos vidros, em suas temperaturas de liquefação, é muito grande. Podemos comparar com a viscosidade da água ou a de um óleo lubrificante que tem a viscosidade em torno de 150 Pa.s.

A viscosidade diminui com o aumento da temperatura. Veja, por exemplo, a sílica que tem uma viscosidade de $1,92 \times 10^6$ Pa.s em sua temperatura de liquefação que é de $1715 \text{ }^\circ\text{C}$. Elevando-se a temperatura para $2000 \text{ }^\circ\text{C}$, obtemos uma viscosidade de $33,2 \times 10^3$ Pa.s e $1,22 \times 10^3$ a $2300 \text{ }^\circ\text{C}$. Subindo mais a temperatura, a viscosidade chega a 10 Pa.s. Por esta razão, o puxamento de fibras ópticas é um processo complexo, já que a viscosidade grande pode facilmente causar o rompimento da fibra. Mesmo assim, o puxamento comercial de fibras ópticas é efetuado em até 20 m/s (72 km/h). Isso porque alguns dopantes, como o GeO_2 , por exemplo, são utilizados para ajustar o índice de refração e ao mesmo tempo diminui a temperatura de fusão. Fibras ópticas de núcleo de sílica pura tem mais viscosidade e por isso devem ser puxadas com velocidade menores, até 2 m/s.

O vidro borossilicato (Pyrex) é fabricado para ir ao fogo e então é usado para tubos de ensaio, painéis etc. O segredo é o coeficiente de expansão térmica que é o menor de todos os tipos de vidro ($5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) e assim ele suporta bem choques térmicos (Iki, 2009).

2.4. Propriedades da sílica

A sílica é o constituinte básico da fibra óptica. Assim, apresentamos suas principais propriedades.

A Tabela 2.4 mostra as propriedades da sílica obtidas de diversas referências (Weast, 1988 e Zirtec, 2009).

Tabela 2.4 Propriedades da sílica

Propriedade	Valor
Energia de Fratura	3.7 J/m ² (NIST)
Densidade	2,2 g/cm ³
Dureza	4,9 Mohs
Resistência à Tração	7.000 psi=48,26 MPa
Módulo de Bulk	5,3x10 ⁶ psi=36,54 GPa
Módulo de Rigidez	4,5x10 ⁶ psi=31.03 GPa
Módulo de Young	10,4x10 ⁶ psi=71,71 GPa
Módulo de Young (NIST)	72.1 GPa
Módulo de Poisson	0,16
Coefficiente de Expansão Térmica	0,55x10 ⁻⁶ /°C
Condutividade Térmica	0,0033 cal.cm ⁻¹ .s ⁻¹ .°C ⁻¹ .cm ⁻¹
Calor Específico	0,18 cal/g
Ponto de Amolecimento	1665°C
Constante Dielétrica	3,75 @20 °C, 1 MHz
Velocidade do Som	Onda de Corte: 3,75x10 ⁵ cm/s
Velocidade do Som	Onda de compressão: 5,90x10 ⁵ cm/s
Atenuação do Som	0,33 dB/ft/MHz

O *Yield strength* da sílica é estimado ser 5 GPa, mas a resistência real observada é normalmente 100 vezes menor, devido a micro-rachaduras na sua superfície (Kuide Qin, 1986).

Yield strength da sílica, 10^{10} dynes/cm² = 1 GPa (Sun et al, 1992).

Para utilizar uma FBG para medir extensão, obtem-se um range desde zero a cerca de 1000 μ strain (Platt e Woodhead, 2008). Entretanto, as normas IEC estipulam em 5% o strain máximo que uma fibra óptica pode suportar (IEC 60793-1, *Optical Fibres*, 2008).

2.5. Sensores ópticos para medida de tensão elétrica

As principais desvantagens dos transdutores de tensão e corrente convencionais, responsáveis pela atual busca de novos métodos são as dimensões e pesos elevados que dificultam, principalmente o transporte e a instalação.

Na área elétrica, sistemas ópticos de medida de tensão e corrente têm sido descritos. A literatura explora o isolamento dielétrico que fibras ópticas propiciam. Desta forma, o sensor óptico colocado no potencial de alta tensão fica isolado do sistema de leitura e aquisição de dados. Nos últimos anos, entretanto, o uso de transdutores de fibras ópticas tem revolucionado vários ramos da ciência e da indústria.

Exemplos de transdutores ópticos para medida de tensão são citados abaixo:

1- Transdutores ópticos para medida de tensão foram desenvolvidos evitando-se a complexidade de controle de fase e micro-posicionamento inerentes aos sistemas intrínsecos, para aplicação em linhas de alta tensão de até 34,5 kV e 1000 A, utilizando-se técnicas de transdutores extrínsecos. Os transdutores foram desenvolvidos para serem conectados à rede sem necessidade de desligamento ou interrupção da rede. A energia necessária ao seu funcionamento é proveniente de três fontes alternativas: a primeira a partir da própria rede sendo medida, a segunda através de baterias convencionais e a terceira através de uma segunda fibra óptica, responsável pelo guiamento da luz proveniente de uma fonte óptica para o sensor (Chaves e colaboradores, 2003).

2- Um sensor óptico de tensão conectado à linha de distribuição e a um ponto de terra próximo ou à outra fase é descrito. O potencial elétrico da linha é convertido em informação luminosa e conduzido por um cabo óptico até o dispositivo de armazenamento de dados. Pelo fato da fibra óptica ser puramente dielétrica, o dispositivo armazenador de dados não fica energizado, podendo ser acessado com segurança pelo operador (D. Bull e colaboradores, 2005).

3- Um transdutor óptico de alta tensão foi desenvolvido, utilizando um divisor resistivo de precisão para gerar uma tensão de alguns volts pico-a-pico, proporcional à tensão da rede. A corrente que passa no divisor resistivo é de alguns microampéres, não causando nenhum aquecimento significativo nos resistores. As tensões amostradas são injetadas num modulador do tipo VCO (*voltage controlled oscillator*), que gera pulsos que alimentam o amplificador de um LED infravermelho. Ligada ao LED está uma fibra óptica que conduz o sinal ao ponto de recepção. Na outra extremidade da fibra óptica está um fotodiodo que converte os pulsos luminosos em sinais elétricos. Através de um PLL (*phase locked loop*), o sinal é reconvertido em sinal senoidal, passando em seguida por um circuito de escalonamento para ser armazenado ou processado (Rahmatian e colaboradores, 2002).

2.6. Cerâmicas piezoelétricas

A descoberta da piezoeletricidade pelos irmãos Curie, em 1880 estabeleceu uma relação entre campo elétrico e vibrações mecânicas. Entretanto, nenhum uso importante foi realizado durante quase 35 anos. Somente em 1912, iniciou-se o estudo para detecção de objetos submersos (Jaffe e colaboradores, 1971).

O primeiro uso efetivo da piezoeletricidade verificou-se em 1917, quando Paul Langevin desenvolveu um método para detectar submarinos usando o som produzido na

água, através de um dispositivo empregando um material piezoelétrico no casco do navio, o qual convertia sinais elétricos em vibrações acústicas (Buchanan, 1986).

Após a primeira guerra mundial, devido à dificuldade de se excitar transdutores construídos com cristais de quartzo, iniciou-se o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos. Estes esforços levaram à descoberta e aperfeiçoamento nas décadas de 40 e 50, das cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário pela então URSS e Japão e das cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZTs) pelos EUA (Suslick, 1989 e Cady, 1964).

A descoberta em 1946, dos efeitos piezoelétricos em cerâmicas deu início ao desenvolvimento da moderna tecnologia das cerâmicas piezoelétricas e ao aperfeiçoamento dos transdutores eletroacústicos, para uso na conversão dos sinais acústicos produzidos no mar (Barros, 1991).

Em 1985, produtos de cerâmica eletrônica foram estimados em mais de 85% do mercado mundial de venda, estabelecendo a tecnologia da indústria eletrônica. Em 1994, o mercado americano de componentes de cerâmicas piezoelétricas foi estimado em 120 milhões de dólares e o mercado japonês, em mais de 500 milhões de dólares. Nos últimos anos, dispositivos piezoelétricos, ocupam a quarta posição de manufaturados. Os primeiros são os substratos (óxido de alumínio), capacitores (titanato de bário modificado) e ferritas (macia e dura) (Santos, 1998).

Para entendermos o funcionamento desses transdutores piezoelétricos, devemos primeiramente compreender o princípio de funcionamento deste efeito. O nome piezoelétrico vem do grego *peizin*, que significa esmagar, achatar. Os elementos piezoelétricos têm a propriedade de produzir uma tensão elétrica em determinado eixo quando comprimidos em outro. E vice-versa, se aplicarmos um sinal elétrico no eixo elétrico, ele vai produzir um alongamento mecânico no eixo mecânico.

Em qualquer escala de frequência ou potência, o elemento ativo da maioria dos transdutores ultra-sônicos é um material piezoelétrico, que pode pertencer a um dos seguintes grupos: cristais de quartzo, monocristais piezoelétricos, semicondutores piezoelétricos, cerâmicas piezoelétricas, polímeros piezoelétricos e compósitos piezoelétricos (Gallego, 1989 e ATPC do Brasil). Destes grupos, as cerâmicas piezoelétricas são as que apresentam a maior flexibilidade de formato e de propriedades, sendo amplamente utilizadas, podendo citar, na construção de equipamentos industriais, que vão desde sistemas de limpeza até sistemas de solda por ultra-som, passando pelos ensaios não destrutivos, de controle e vibração.

Esta pesquisa pode ser finalizada com algumas citações de cerâmicas piezoelétricas como transdutores.

Alguns exemplos de transdutores que utilizam cerâmica piezoelétrica são descritos:

- Transdutor eletro-acústico

O elemento ativo da maior parte dos transdutores acústicos é a cerâmica piezoelétrica. A cerâmica piezoelétrica é o elemento principal do transdutor, que converte energia elétrica em energia mecânica de vibração de um meio acústico e vice-versa. O sinal elétrico é convertido em vibração mecânica, a qual é transmitida a uma superfície radiante produzindo um campo sonoro. O transdutor recebe energia elétrica e a transforma em mecânica. A energia mecânica devido ao acoplamento com o meio dá origem as vibrações no próprio meio, que se transformam em vibrações sonoras (Santos, 1998).

- Transdutores hidro-acústicos

A partir da década de 60, a maioria dos transdutores hidro-acústicos começaram a ser desenvolvidos utilizando cerâmicas policristalinas como elementos piezoelétricos, devido a flexibilidade de forma e tamanho na confecção deste tipo de material. Em aplicações onde os comprimentos de onda acústicos transmitidos ou recebidos são da ordem de grandeza dos componentes irradiantes do transdutor, o acoplamento com a água é feito através de uma membrana de um polímero especial com impedância acústica, aproximadamente igual a da água. Este material deve apresentar uma propriedade acusticamente transparente, de modo a não sofrer reflexões internas em função da diferença dos meios. Transdutores hidro-acústicos são relevantes para muitos sistemas aplicados em sonares (Santos, 1998).

- Acelerômetro piezoelétrico

A última palavra em transdutores de aceleração são os que utilizam o efeito piezoelétrico. Um acelerômetro piezoelétrico basicamente consiste de um cristal de um lado apoiado no corpo do transdutor e do outro fixado à uma massa. Qualquer aceleração sofrida pelo transdutor obrigará a massa a comprimir ou alongar o cristal piezoelétrico, que produzirá um sinal elétrico proporcional à força gerada na massa (Werneck, 1996).

A literatura também retrata a aplicação de um sistema de demodulação utilizando a tecnologia de FBG com cerâmicas piezoelétricas:

1- Um sistema de leitura de redes de Bragg derivado da técnica por filtro Fabry-Perot sintonizável é implementada através de um sistema atuador piezoelétrico, que modula mecanicamente uma rede de Bragg de referência, com seu espectro de reflexão convoluído com o espectro de reflexão de uma rede sensora (Oliveira, 2005).

2- Um sistema de interrogação de redes de Bragg multiplexadas, através de varredura espectral do sinal produzido por um laser a fibra dopada com Érbio é descrito. O sistema mecânico de tração consiste em um atuador piezoelétrico sobre o qual a rede é colada e que também promove a varredura em comprimento de onda do sinal do laser. O resultado da convolução do sinal laser com os espectros de reflexão das redes sensoras é fotodetectado e processado por filtros digitais (Haramoni, 2007).

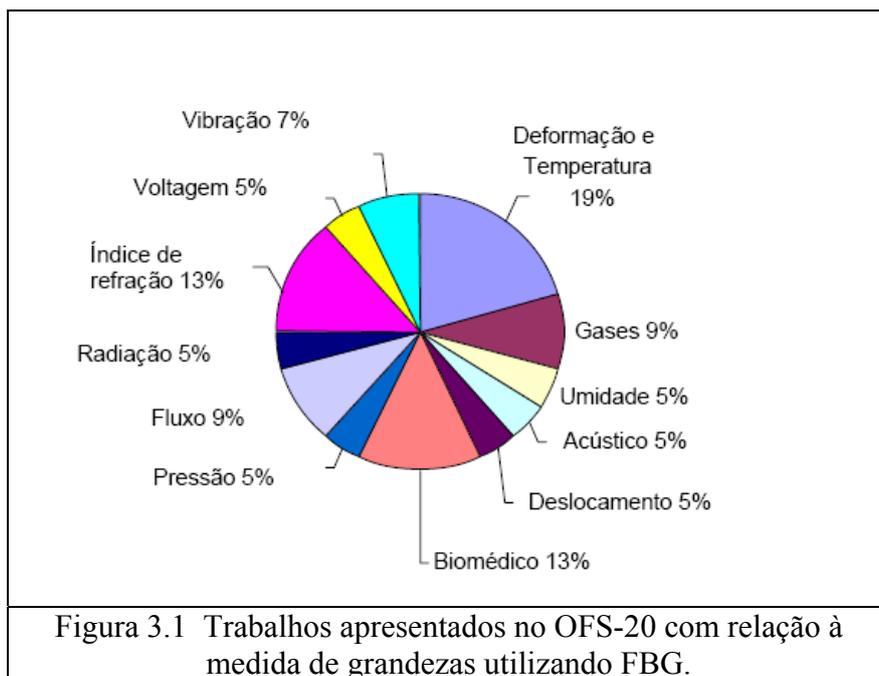
Capítulo 3. Aspectos Teóricos

Neste capítulo serão abordados os principais aspectos teóricos sobre redes de Bragg e cerâmicas piezoelétricas.

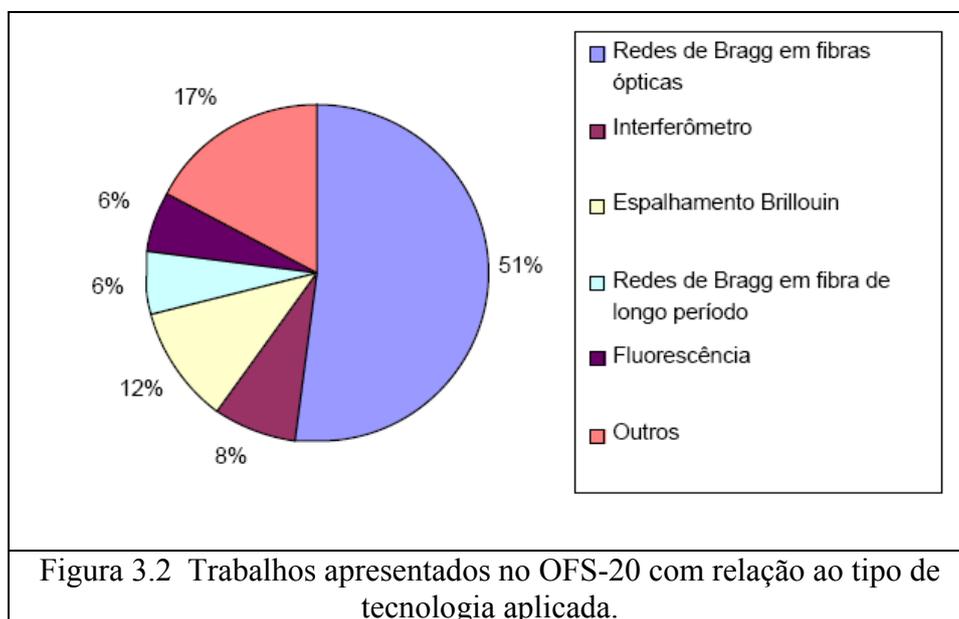
3.1. Teoria sobre Rede de Bragg

Sir William Lawrence Bragg descreveu o fenômeno da difração por estruturas periódicas há quase 100 anos. Em 1978, Hill e colaboradores descobrem esse efeito em fibras ópticas, casualmente, num experimento na faixa do ultravioleta (UV) (Hill e colaboradores, 1978). Na época o resultado deste experimento, uma rede de Bragg no UV, não passou de uma curiosidade científica, pois somente grades para o ultravioleta eram fabricadas daquela maneira e não havia aplicações em telecomunicações, que operam estas no outro lado do espectro. Em 1981 foi criado um método holográfico perpendicular e externamente à fibra para gravar as grades em fibras (Lam e Garside, 1981). A partir daí foi possível escrever redes em comprimentos de onda na região espectral das telecomunicações (800 a 1600 nm) (Lam e Garside, 1981).

Hoje as FBGs constituem-se um elemento relevante para telecomunicações e sensoriamento a fibra óptica com centenas de publicações anuais envolvendo chaves ópticas, *add/drop*, compensação de dispersão cromática e sensores de diversas grandezas físicas, incluindo temperatura, pressão, *strain*, índice de refração, entre outros. Na Figura 3.1 é mostrada a distribuição de trabalhos apresentados no congresso *Optical Fiber Sensor* (OFS-20, 2005), com a classificação relacionada à medida de grandezas utilizando a tecnologia de FBG.



Na Figura 3.2 é mostrada a distribuição de trabalhos também apresentados no OFS-20, porém com a classificação relacionada ao tipo de tecnologia aplicada.



Do ponto de vista da instrumentação, uma vantagem no uso de FBG como transdutor é o fato de que a informação a respeito do agente atuando sobre a rede está codificada espectralmente (Hill e Meltz, 1997) e (Kashyap, 1999). Isso permite determinar a magnitude desse agente sem sistemas de referência para a potência óptica, que requerem calibração periódica. Outra vantagem é a possibilidade de multiplexar em

comprimento de onda um grande número de sensores, permitindo medições multi-pontuais ou quase distribuídas.

No caso da rede de Bragg o elemento sensor é intrínseco, localiza-se no núcleo de uma fibra óptica monomodo, sendo portanto completamente integrado. A tecnologia com redes de Bragg confere uma medição auto-referenciada da temperatura em diversos pontos discretos em tempo real, simultaneamente e de alta confiabilidade mesmo estando o sensor operando num ambiente de condições severas.

Um sistema FBG destinado a medir a temperatura de apenas um ponto apresenta um custo relativamente barato. No entanto, quando se aumenta o número de pontos sensorizados por FBG, o custo da unidade de interrogação/demodulação aumenta significativamente.

3.2. Princípio de Funcionamento das Redes de Bragg

Redes de Bragg em fibra óptica (um caso particular de redes foto-refrativas) são formadas por uma modulação periódica no índice de refração da fibra, ao longo da direção longitudinal (Othonos e Kalli, 1999, Meltz e colaboradores, 1989 e Culshaw, 2000) e podem ser produzidas por diversas técnicas. A estrutura provoca um acoplamento ressonante entre diferentes comprimentos de onda propagantes na fibra, que se traduz pela rejeição de uma banda de frequências ópticas no espectro da luz transmitida. Basicamente, tais dispositivos comportam-se como filtros ópticos seletivos, conhecidos na óptica como espelhos dicróicos. As Figuras 3.3 e 3.4 mostram a estrutura de uma fibra óptica com uma FBG e várias FBGs escritas em uma única fibra, respectivamente.

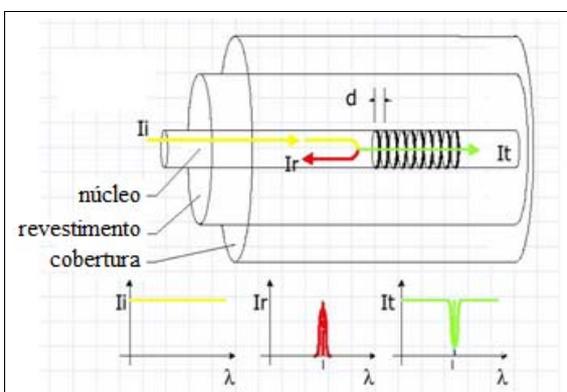


Figura 3.3 Estrutura básica de uma fibra óptica com FBG.

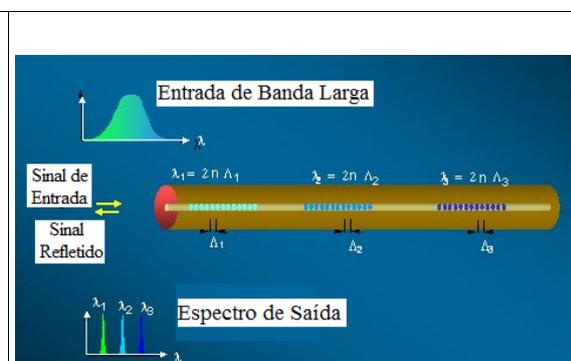
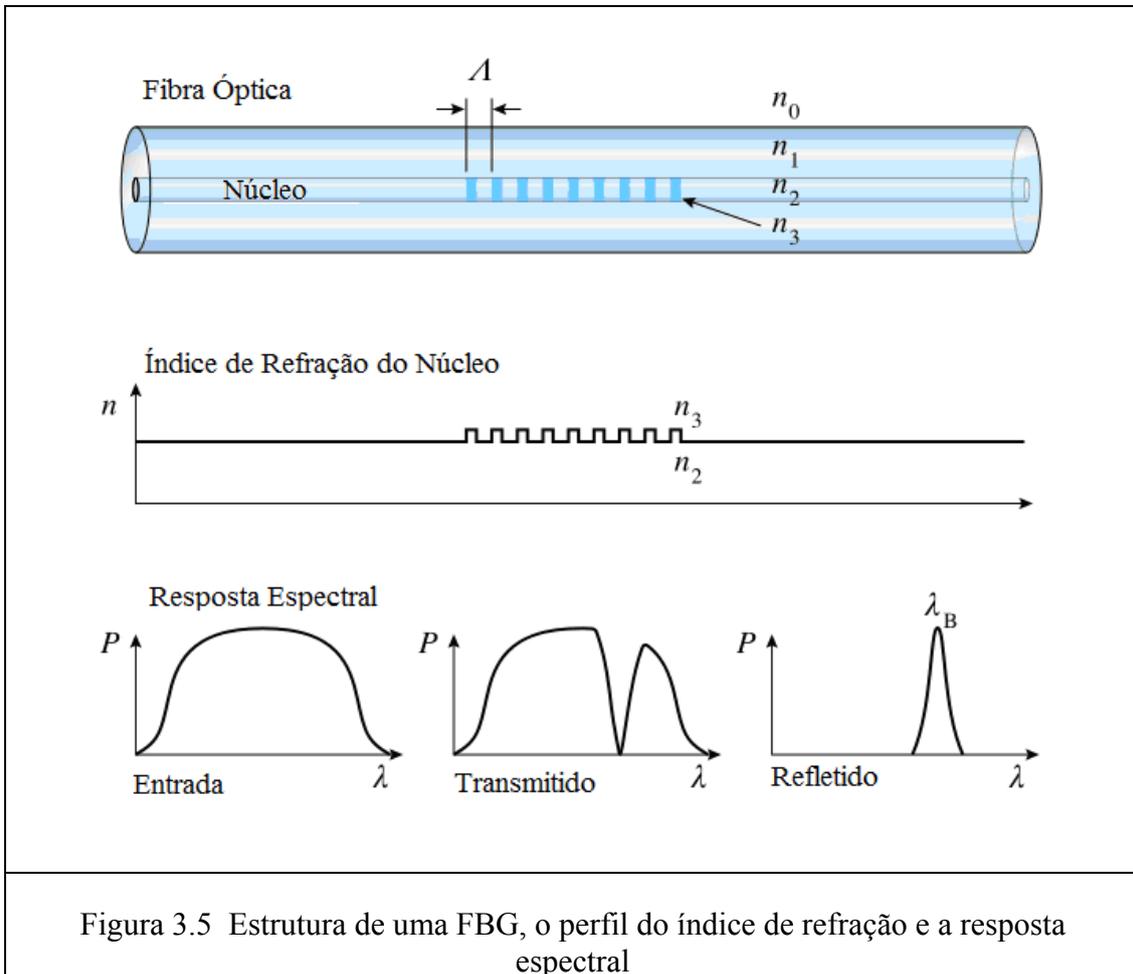


Figura 3.4 Várias FBGs escritas em única fibra óptica.

A Figura 3.5 mostra a representação da resposta espectral dos sinais de entrada, transmissão e reflexão.



Na FBG, o acoplamento se dá entre um comprimento de onda e outro similar, contrapropagante, causando uma interferência construtiva ou destrutiva. No cômputo final surge uma reflexão seletiva de uma banda estreita de luz, centrada no comprimento de onda de Bragg, λ_B , da rede.

O comprimento de onda de Bragg é dado por (Othonos e Kalli, 1999):

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (4)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo (média dos índices) do modo de propagação da luz e Λ é o período da modulação do índice de refração (Othonos e Kalli, 1999).

O comprimento de onda de Bragg muda, quando a rede é submetida a agentes externos, tais como deformação longitudinal ou temperatura. Devido aos efeitos foto-

elástico e termo-óptico, o índice de refração da sílica varia com esses agentes, resultando em um deslocamento do comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda_B$), que pode ser então usado como parâmetro transdutor.

O deslocamento espectral ($\Delta\lambda_B$), devido a efeitos de tensão longitudinal, ε_z , e temperatura, ΔT , podem ser descritos pela equação (Othonos e Kalli, 1999):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon_z + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (5)$$

Onde,

$\Delta\lambda_B$ é o deslocamento espectral do comprimento de onda de Bragg (sensibilidade) e λ_B é a representação espectral do comprimento de onda de Bragg.

Onde p_e representa o coeficiente efetivo para o efeito foto elástico, α é o coeficiente de expansão térmica e η é o coeficiente termo-óptico. Para fibras de sílica com núcleo dopado com germânio na região espectral de 1550 nm temos os seguintes valores: $p_e=0,22$, $\alpha=0,55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $\eta=8,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (Othonos e Kalli, 1999).

3.2.1. Sensibilidade para medida de temperatura na fibra óptica

Neste caso, o interesse específico é o sensoriamento somente da temperatura sem efeitos de tensão longitudinal (*strain*), então $\varepsilon_z=0$ e a Equação (5) fica:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta)\Delta T \quad (6)$$

Sendo assim, podemos calcular o deslocamento espectral do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura. Partindo da Equação (6) e substituindo as constantes, teremos para um comprimento de onda de 1550 nm, considerando a temperatura constante:

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

$$(\alpha + \eta) = 9,15 \times 10^{-6}$$

$$\Delta\lambda_B = 1550 (9,15 \times 10^{-6}) \Delta T$$

$$\Delta\lambda_B = (14,18 \times 10^{-3}) \Delta T$$

Logo:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 14,2 \text{ pm}/^\circ\text{C} \quad (7)$$

Assim para uma variação de 1°C o deslocamento do comprimento de onda de Bragg apresenta uma variação de 14,2 pm. Como consequência, uma variação de 75 °C (da temperatura ambiente de 25°C até atingir a temperatura de alarme da UHE de 110°C, de um hidrogerador, por exemplo) apresenta um deslocamento do comprimento de onda de Bragg na ordem de 1070 pm.

3.2.2. Sensibilidade para tensão longitudinal na fibra óptica

O valor teórico da sensibilidade para a aplicação de tensão longitudinal para redes de Bragg em fibras de sílica, com núcleo dopado com germânio, na região espectral de 1550 nm (Meltz, 1997 e Culshaw, 2000) pode ser obtida a partir da Eq (5).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \varepsilon \quad (8)$$

Onde:

p_e = coeficiente efetivo para o efeito foto elástico (0,22)

$$\varepsilon = \text{longitudinal strain} \left(\frac{\Delta L}{L} \right)$$

λ_B = comprimento de onda (1550 nm)

Substituindo as constantes, obtemos:

$$\Delta\lambda_B = (1 - 0,22) \cdot 1550 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} = 1,2 \text{ pm}/\mu\varepsilon. \quad (9)$$

Desta forma, na região espectral de 1550 nm a sensibilidade para a aplicação de tensão longitudinal é de aproximadamente 1,2 pm para uma deformação relativa de 1 μ -strain (isto é, 1 μ m por metro).

3.3. Características de redes de Bragg

3.3.1. Tipos de rede de Bragg

Os tipos de FBGs se referem ao mecanismo básico da fotosensibilidade, pelo qual as redes são produzidas na fibra. Os diferentes métodos de criação das redes têm um efeito físico significativo na produção da FBG. Neste item serão apresentados os dois tipos de FBGs mais utilizados (Tipos de FBG, 2007).

- FBG Tipo I

Rede padrão escrita em fibra hidrogenada ou não hidrogenada de todos os tipos:

As redes Tipo I são geralmente conhecidas como redes padrão e são fabricadas em fibras de todos os tipos e em todas as condições de hidrogenação. O espectro de transmissão e reflexão são complementares e existe perda de luz através da reflexão na casca ou por absorção. Redes Tipo I são as mais usadas e somente esse tipo de rede é possível na produção em série no momento da escrita.

- FBG Tipo II

Redes confeccionadas com falhas (*Damage written gratings*) inscritas através de laser pulsado de alta potência, formando mudanças físicas na grade.

Foi demonstrado que é possível inscrever redes com reflexão de aproximadamente 100% (>99,8%) com um simples pulso de UV durante o puxamento da fibra (Archambault e colaboradores, 1993). As redes resultantes mostraram ser estáveis para altas temperaturas em torno de 800 °C. As redes foram inscritas usando um pulso de 40 mJ de um laser em 248 nm. Foi demonstrado que uma forma limiar foi evidente em torno de 30 mJ, acima deste nível o índice de modulação aumentou por mais que duas ordens de magnitude, considerando abaixo de 30 mJ, o índice de modulação cresceu linearmente. Para facilitar a identificação e o reconhecimento foi definido que redes fabricadas abaixo do limiar, como rede do Tipo I e acima, como rede do Tipo II. Avaliações microscópicas destas redes mostraram uma trajetória com falhas periódicas no local da rede dentro da fibra. (Erdogan, 1997), conseqüentemente redes do Tipo II também são conhecidas como redes com falhas (*damage gratings*) (Dong e colaboradores, 1993 e Archambault e colaboradores, 1993).

3.3.2. Estruturas de uma rede de Bragg

A estrutura de uma FBG está diretamente relacionada com a variação do índice

de refração em função do período da rede.

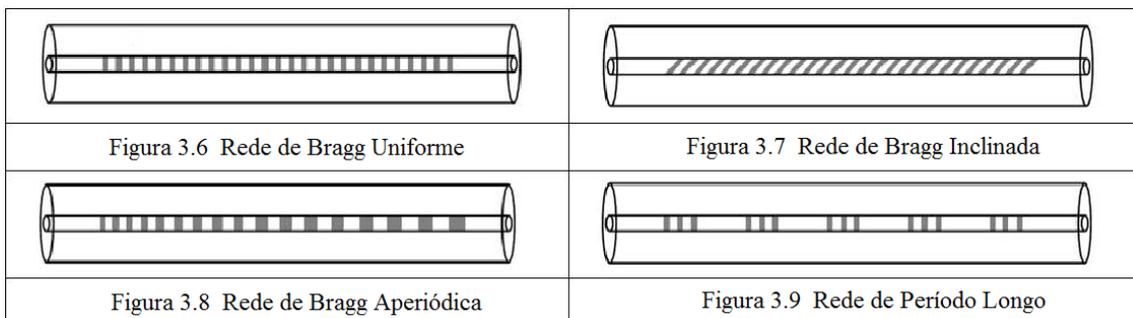
As FBGs apresentam diferentes tipos de estruturas: a rede de Bragg uniforme (*common Bragg reflector grating*), a rede de Bragg inclinada (*tilted FBG*), a rede de Bragg aperiódica (*chirped FBG*) e a rede de período longo (*LPG-long period grating*). As redes de Bragg são distinguidas também pelo seu passo, ou seja, pelo espaçamento entre planos da rede ou inclinação (Andreas e Kyriacos, 1999).

A rede de Bragg uniforme é a mais utilizada e apresenta um passo constante e uniforme, como pode ser observada na Figura 3.6.

A rede de Bragg inclinada tem fase inclinada com relação ao eixo da fibra, que é o ângulo entre os planos da rede e o eixo da fibra inferior a 90° , como mostrada na Figura 3.7.

A rede de Bragg aperiódica apresenta um passo aperiódico, apresentando um aumento no espaçamento entre planos da rede, mostrada na Figura 3.8.

A rede de período longo pode ser localizada e distribuída em uma longa estrutura da fibra, como mostra a Figura 3.9.

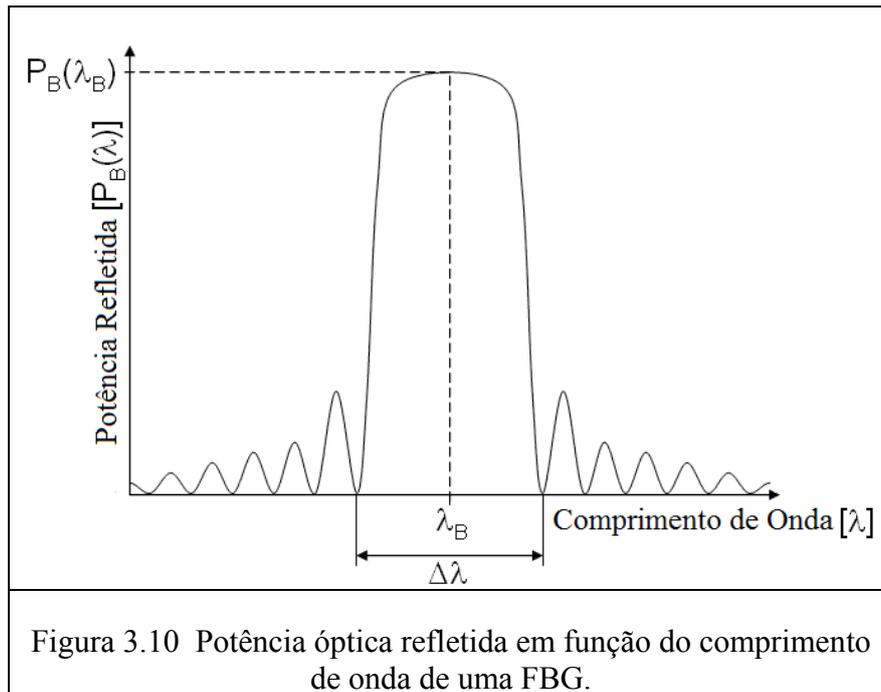


3.3.3. Propriedades de uma FBG

Duas propriedades necessitam ser controladas em uma FBG: refletividade, e a largura de banda (FWHM).

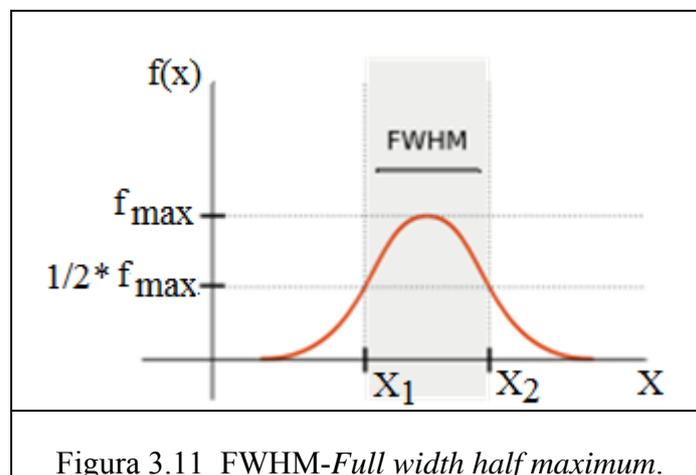
- Refletividade de uma FBG

Podemos considerar que a reflexão é mais forte, quanto mais uniformemente estiverem espaçadas as linhas e quanto maior for o número de linhas inscritas na fibra. As fibras do Tipo II apresentam maior refletância, pois são gravadas com maior potência, resultando em uma maior variação do índice de refração. A Figura 3.10 mostra a potência óptica refletida em função do comprimento de onda de uma FBG.



- Largura de Banda - FWHM-*full width at half maximum*

A largura de banda a meia altura é uma expressão referente à extensão de uma função, dada pela diferença entre dois valores extremos da variável independente, em que a variável dependente é igual à metade do valor máximo. Na Figura 3.11 é mostrada esta propriedade.



3.3.4. Atenuação: perda de inserção e perda de retorno

A atenuação representa a perda de potência óptica dentro da fibra, do ponto de transmissão ao ponto de recepção do sinal óptico. A atenuação na fibra óptica é dependente do seu comprimento de onda (Murata, 1987).

Podemos detectar com o aumento da atenuação, dois tipos de perdas: a perda de inserção e perda de retorno.

A perda de inserção, ou atenuação, é a perda de potência luminosa que ocorre na passagem da luz nas conexões/terminações ópticas. Geralmente é causada por irregularidades no alinhamento dos conectores e irregularidades intrínsecas às fibras ópticas.

A perda de retorno, ou reflectância, é a quantidade de potência óptica refletida na conexão. A luz refletida retorna até a fonte luminosa, cuja causa principal está na face dos ferrolhos dos conectores, que refletem parte da luz que não entra no interior da fibra óptica no conector do lado oposto. Esta perda não influi diretamente na atenuação total, contudo, pode degradar o funcionamento da fonte luminosa e assim, afetar a comunicação.

A norma (TIA/EIA 568-A (TSB-72)) indica que a atenuação máxima de emendas ópticas por fusão ou mecânicas não podem exceder o valor de 0,3 dB. A atenuação por inserção deve ser inferior a 0,75 dB por conector. A perda de retorno deve ser acima de 20 dB para fibras multimodo e 26 dB para fibras monomodo (IEEE/ANSI/TIA/EIA-568-A, 1995 e EIA TSB-72, 1995).

Os sensores baseados em redes de Bragg em fibra apresentam pouca perda de inserção, uma vez que a radiação UV não prejudica nem destrói a sílica.

3.4. Técnicas de gravação de rede de Bragg

Existem duas principais técnicas de gravação de rede de Bragg em fibra óptica: Interferométricas e não interferométricas.

O sistema mais comum de uma técnica interferométrica é a holográfica (Metz, e colaboradores, 1989) que consiste na modulação espacial de intensidade da luz ultravioleta, através da interferência de dois feixes coerentes. Para essa técnica é necessária uma fonte ultravioleta com coerência temporal e espacial, tais que tornem possível a construção de um interferômetro (Silva, 1995). As características da FBG gravada com essa técnica estão fortemente relacionadas com as características da fonte de luz.

A técnica mais utilizada é baseada no uso da máscara de fase. Essa técnica tem inúmeras vantagens como uma relativa simplicidade na montagem para a gravação, boa reprodutibilidade e ser menos dependente da coerência da fonte de luz UV usada no ato da gravação (Hill, e colaboradores, 1993 e Paulo de Tarso, 2008).

Nesta técnica a rede é construída pela alteração da estrutura interna da fibra óptica fazendo-se incidir sobre ela um feixe de laser focado que marca periodicamente

uma pequena parte do núcleo da fibra.

Inicialmente, a fibra óptica dopada que será submetida à gravação de uma FBG deve passar por um processo de hidrogenação. O processo de hidrogenação visa tornar a fibra óptica mais sensível através da fotosensibilização (hidrogenação) por incidência do feixe ultravioleta (UV). Este processo consiste em inserir a fibra óptica em um sistema composto por um cilindro de H₂ de alta pureza, com pressão típica de até 2000 Pa. Conectado ao cilindro há uma válvula de controle que regula a pressão dentro da câmara de hidrogenação que é um tubo de aço inox de diâmetro interno igual a 4 cm e comprimento de 1 m, aproximadamente, (Barbosa e colaboradores, 2000).

A montagem experimental para inscrição da FBG consiste em utilizar um laser de Argônio com um comprimento de onda de 248 nm com um dobrador de frequência intra-cavidade. Este sistema é equipado com um cristal não-linear de BBO (beta borato de bário: BaB₂O₄) para produzir a geração de segunda harmônica, gerando um feixe de saída no ultravioleta (124 nm).

Uma máscara de fase com grade de transmissão e período com comprimentos de onda adequados é colocada na saída do feixe da radiação UV. O feixe de radiação UV atravessa a máscara e se difrata em primeira ordem em duas direções simétricas com a mesma potência. Com dois espelhos, torna-se possível a recombinação destes dois feixes resultantes através de reflexão segundo o ângulo determinado pela máscara de fase. Estes dois feixes, após incidirem nos espelhos, sofrem interferência segundo o ângulo formado pelos espelhos. Estes espelhos são fixos em placas móveis e os posicionadores são controlados por um motor de passo que permite o ajuste do movimento angular dos espelhos.

A combinação dos feixes de radiação UV, após sofrerem reflexão nos espelhos, se recombinam no plano onde a fibra é posicionada. A superposição dos dois feixes gera um padrão de interferência periódica, o qual se reproduz no núcleo da fibra previamente preparada, ou seja, descascada e hidrogenada (Hill e colaboradores, 1993 e Lemaire e colaboradores, 1993).

A FBG mais simples de ser fabricada é através da técnica da máscara de fase (Kashyap e colaboradores, 1993, Othonos e Kalli, 1999).

A inscrição de grades de Bragg em fibra óptica é feita em tempo real e conseqüentemente sua caracterização é imediata, podendo ser observada através de um analisador de espectro óptico de alta resolução.

As Figuras 3.12 e 3.13 apresentam a gravação de uma FBG em destaque, o

diagrama em blocos e a fotografia do *set up* para gravação das redes de Bragg usando máscara de fase, respectivamente.

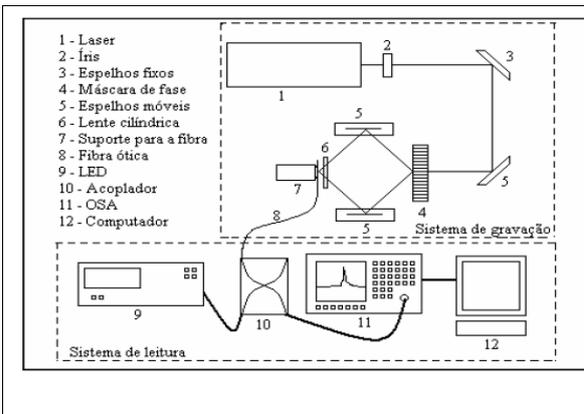


Figura 3.12 Diagrama em blocos do *set up* para gravação de FBG com máscara de fase.

Figura 3.13 Fotografia do *set up* para gravação de FBG com máscara de fase.

As dimensões das FBGs são:

- Para fibra de sílica (Si):

Comprimento de onda $\lambda = 1500 \text{ nm}$ e $\Lambda = 535 \text{ nm}$

- Para fibra de polímero (POF):

Comprimento de onda $\lambda = 550 \text{ nm}$ e $\Lambda = 170 \text{ nm}$

A Figura 3.14 mostra em detalhe uma FBG em uma fibra óptica.

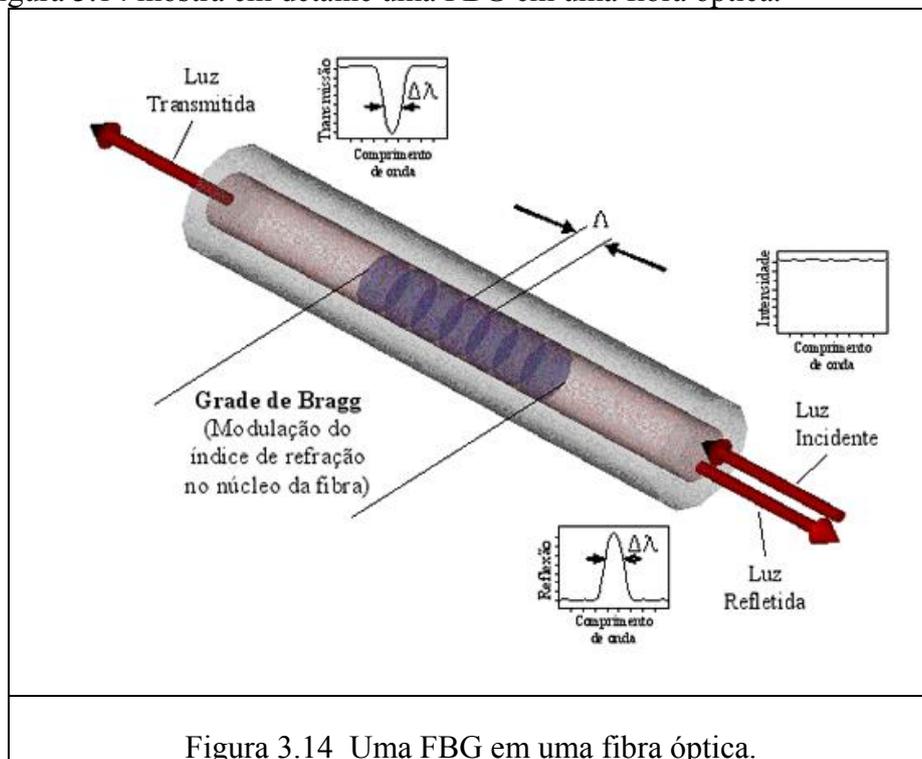


Figura 3.14 Uma FBG em uma fibra óptica.

Vale mencionar também a técnica de escrita, denominada Ponto-a-Ponto. Este método é especialmente aplicável na fabricação de redes de período longo (LPG), mas também pode ser utilizada na fabricação de *tilted* FBGs.

3.5. Sistemas de Interrogação

Neste item serão abordados os principais sistemas de interrogação, que podem ser adotados para a realização da medida e monitoramento de temperatura.

O método mais simples, mas também o mais caro é a utilização de um analisador de espectro óptico (OSA) com uma fonte de luz tipo ASE, que mostrará o deslocamento do espectro devido a variação de temperatura. Com o OSA várias redes de Bragg podem ser monitoradas simultaneamente, permitindo a medida distribuída de vários pontos de temperatura. Como o OSA é um equipamento muito caro, a relação custo-benefício não se justifica para algumas aplicações. Mas, quanto maior a quantidade de pontos melhor a relação custo-benefício. Um exemplo a ser citado se refere a um número limitado de FBG em cada linha, onde se pode utilizar diversas linhas idênticas na mesma aplicação e chaveá-las uma a uma com uma chave óptica, dessa forma monitorando qualquer quantidade de pontos (Kalinowski, 2003), como pode ser observado na Figura 3.15.

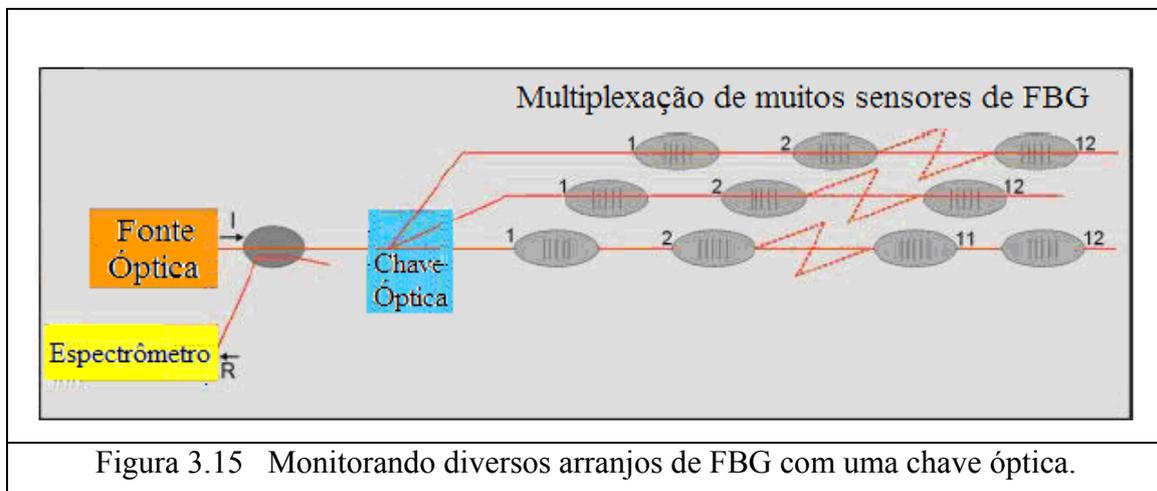
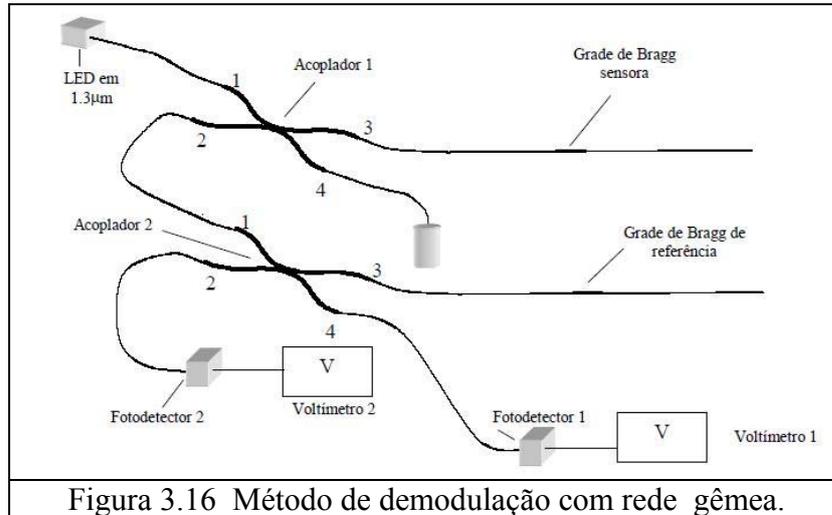


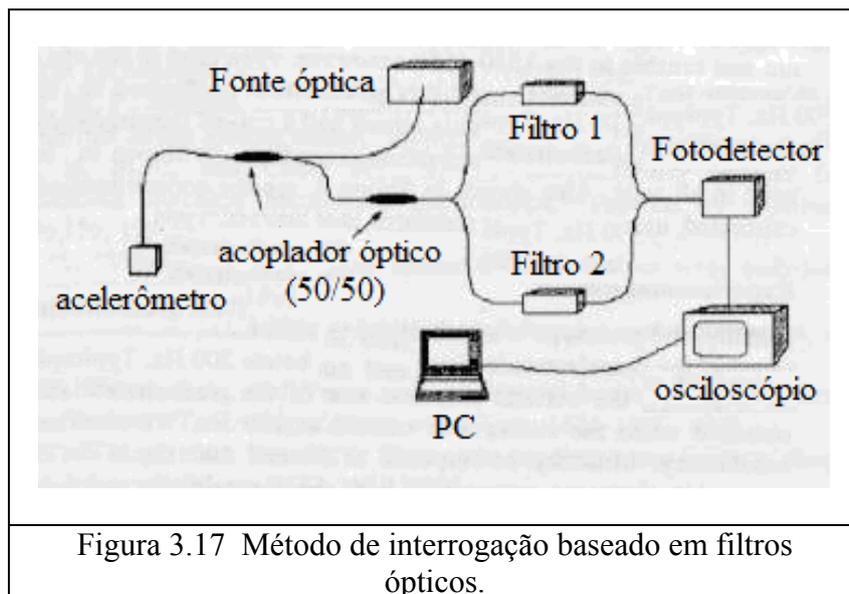
Figura 3.15 Monitorando diversos arranjos de FBG com uma chave óptica.

Podemos eliminar o OSA e demodular as informações das FBG de diversas maneiras. Diversos métodos de demodulação de maior ou menor complexidade têm sido demonstrados na literatura. Um método bastante simples que tem sido utilizado com sucesso, se resume na utilização de uma segunda rede semelhante àquela sendo monitorada (Cazo, 2001), conforme mostra a Figura 3.16.



Medindo-se a potência no espectro de correlação entre as duas FBGs, ela será proporcional ao deslocamento da rede sendo monitorada. No caso de utilizar várias redes, cada rede do sistema deverá ter sua rede gêmea, pois a faixa dinâmica de medida está limitada pela largura de cada rede.

Um outro método de interrogação consiste em utilizar um filtro óptico sintonizado em cada rede, conforme Morikawa e colaboradores, 2002, cujo esquema é mostrado na Figura 3.17.



Neste caso, cada rede deverá ter seu filtro o que encarece o protótipo, caso haja um número grande de FBG. Pode-se utilizar um filtro óptico eletricamente sintonizável, (Kersey e colaboradores, 1997), mostrado na Figura 3.18. Desta forma a interrogação das redes é feita uma a uma sintonizando o filtro em cada comprimento de onda de cada FBG e lendo o desvio em comprimento de onda respectivo daquela rede.

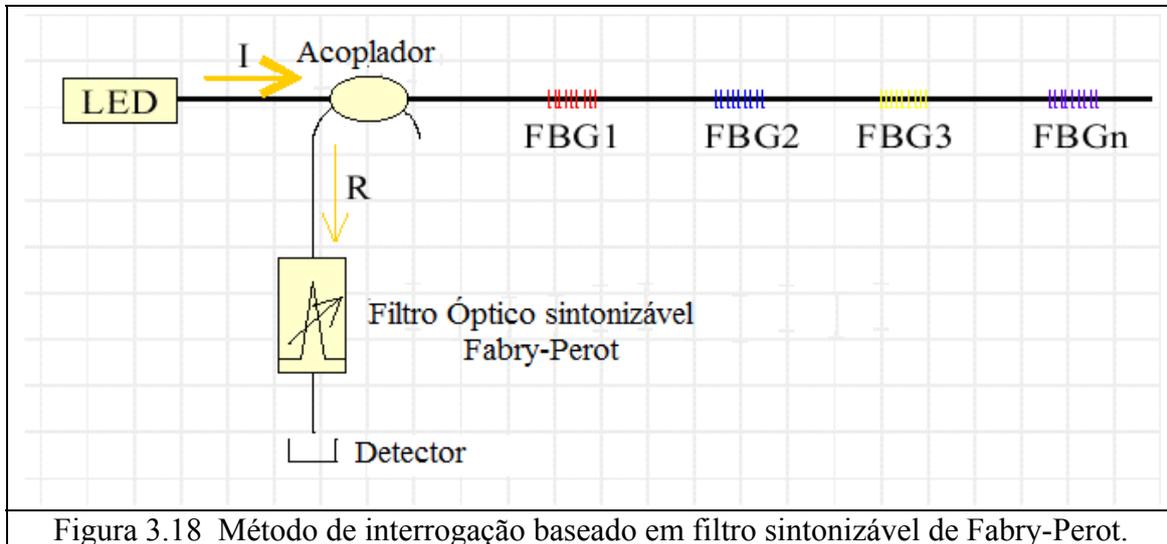


Figura 3.18 Método de interrogação baseado em filtro sintonizável de Fabry-Perot.

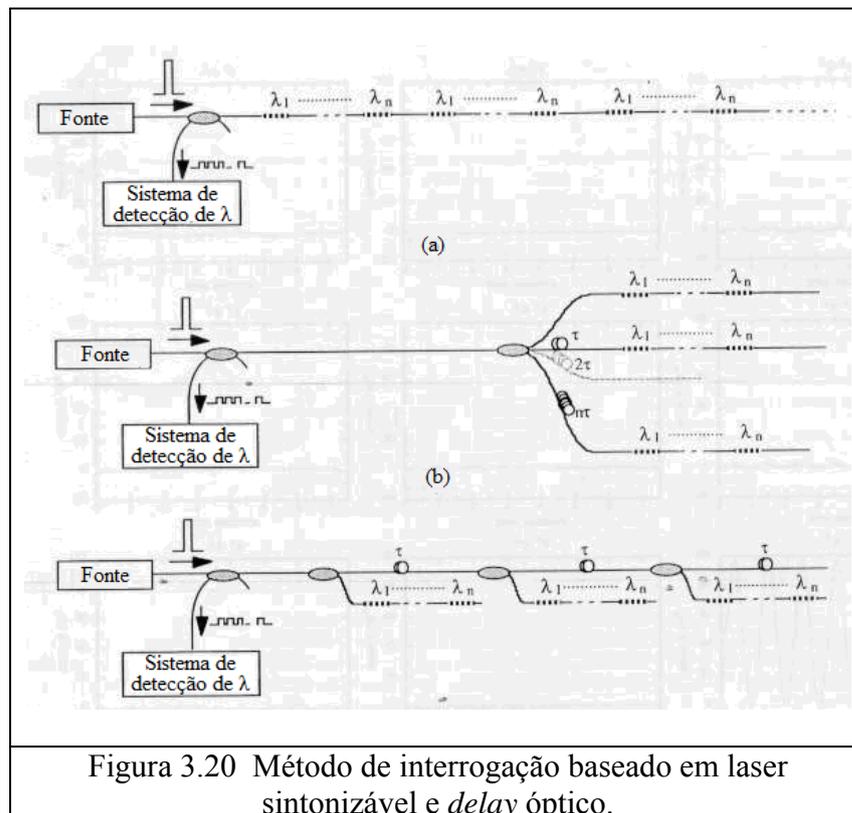
Para sensoriamento a longa distância (várias dezenas de km) com muitas redes de Bragg, a transparência dessas redes pode ocasionar problemas como, por exemplo a atenuação da luz ao longo da linha. Isso ocorre porque as fontes de espectro largo utilizadas para iluminar as redes não dispõem de tanta potência quanto um laser convencional.

Para contornar esse problema pode-se utilizar um laser sintonizável para iluminar as redes. Neste caso o sistema de interrogação sintoniza o laser para cada um dos comprimentos de onda de cada FBG, disparando um ou mais pulsos e lendo a resposta da FBG.

Outra técnica para se utilizarem mais redes do que a linha permite é combinar WDM (*wavelength division multiplex*) com TDM (*time division multiplex*), ou seja, ler redes iguais em tempos diferentes. Pode-se montar uma cadeia longa com grupos de redes repetidas e abrir janelas no tempo para cada grupo, conforme mostrado na Figura 3.20 (a).

Esta mesma técnica pode ser utilizada com várias linhas de FBG idênticas entre si, mas, separadas em tempo por *delays* ópticos (bobinas de fibras ópticas). O sistema de interrogação agora abre uma janela no tempo para cada pulso do laser, já que o *delay* vai atrasar no tempo os reflexos dos sensores da linha mais distante. Dependendo da

topologia do processo temos duas arquiteturas básicas. A arquitetura estrela (Figura 3.20 (b)) é utilizada quando o processo é bi-dimensional com os pontos de medida espalhados numa determinada área, por exemplo o monitoramento de uma coluna de concreto. E a estrutura barramento é utilizada em processos lineares, como dutos, por exemplo, em que cada sensor está a uma distância progressivamente maior (Figura 3.20(C)) (Kersey e colaboradores, 1997).



3.5.1. Estudo do processamento e análise do espectro óptico na determinação da variação do comprimento de onda de Bragg

Dado o espectro, existem diversas soluções na literatura para determinação do deslocamento do comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda_B$), podendo citar: a técnica de demodulação pela auto-correlação, a técnica que utiliza a demodulação pela correlação cruzada, cálculo do centróide, técnicas de filtragem do espectro baseadas em aproximações paramétricas e técnicas não paramétricas.

1- Técnica de demodulação pela auto-correlação

É uma técnica de demodulação muito simples e precisa para sensores de FBG. A técnica é adequada na utilização de grades, individual e dupla. Uma grade dupla é

composta por duas grades idênticas localizadas em diferentes posições na mesma fibra monomodo. A técnica de demodulação demonstrada (Christophe e colaboradores, 2004) avalia a posição do comprimento de onda de um espectro de reflexão de um sensor. Para calcular o desvio do espectro a técnica calcula a auto-correlação entre os dois espectros de reflexão. Este método é muito rápido e tem sido testado experimentalmente em sensores de temperatura. A técnica fornece medições absolutas e permite alta precisão comparada aos sistemas convencionais.

2- Técnica de demodulação usando algoritmo da correlação cruzada

Esta técnica apresenta um algoritmo para demodulação de sensores de FBG. O algoritmo de demodulação avalia o desvio do comprimento de onda no espectro refletido de um sensor de FBG. Um estudo mostra a comparação do algoritmo proposto com outros três algoritmos (algoritmo na detecção do centróide (*CDA- centroid detection algorithm*) (Atkins e colaboradores, 1995), algoritmo dos mínimos quadrados (*LSQ-least squares algorithm*) (Ezbiri e colaboradores, 1998) e o algoritmo da auto-correlação (Caucheteur e colaboradores, 2004). Os resultados experimentais são discutidos com relação à reflexão das FBGs e outros fatores que devem influenciar na resolução do sensoriamento. Este trabalho apresenta a resolução para sensor de *strain* de 0,4 e 1,5, em grades com alta refletividade e em grades com baixa refletividade, respectivamente (Cen e colaboradores, 2007).

3- Medição direta do pico pelo cálculo do centróide

Outras técnicas também foram pesquisadas podendo citar: a medição direta do pico através do cálculo do centróide do espectro, determinação do comprimento de onda associado nas aproximações paramétricas do espectro (na determinação do pico destas funções), que podem ser polinomiais ou gaussianas (Klembla, 2005, Nunes e colaboradores, 2004, Ricetti e colaboradores, 2006 e Niewczas e colaboradores, 2003) e por fim, as aproximações não-paramétricas baseadas em técnicas de inteligência artificial, como redes neurais (Paterno e colaboradores, 2005). Esta última apresenta elevado custo computacional, o que compromete a sua utilização em aplicações em tempo real, sendo desta forma desconsiderada neste trabalho.

Medição direta do pico do espectro e estimativa do comprimento de onda central através do cálculo do centróide do espectro são de simples implementação, porém com aplicabilidade e precisão comprometidas na presença de ruído, verificado especialmente em Redes de Bragg não-apodizadas (Kashyap, 1999), evidenciando assim a necessidade de tratamento do sinal espectral.

O cálculo do centróide λ_c de um dado espectro óptico é dado pela seguinte equação:

$$\lambda_c = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i R(\lambda_i)}{\sum_{i=1}^N R(\lambda_i)} \quad (10)$$

Na equação acima, λ_i representa o i-ésimo comprimento de onda e $R(\lambda_i)$ é o valor do espectro associado ao comprimento de onda λ_i .

Determinado o centróide λ_c de um espectro óptico de um sensor com comprimento de onda de Bragg (λ_B), está estimada a variação $\Delta\lambda_B$ associada à variação de temperatura ΔT desejada. Para determinação da variação de temperatura ΔT , é necessária a estimação da curva de calibração do sensor, exemplificada na Figura 2 do Anexo 1. Esta curva pode ser estimada utilizando um modelo de regressão linear ou através da interpolação de uma tabela de calibração específica para cada sensor.

Definido o sistema de processamento e análise do espectro óptico a ser utilizado, pode-se incluir a filtragem dos dados, o algoritmo para cálculo da variação $\Delta\lambda_B$ e as técnicas para estimação da curva de calibração. O algoritmo desenvolvido pode ser resumido de forma sucinta, conforme apresentado no Anexo 1.

4- Técnicas de filtragem do espectro baseadas em aproximações paramétricas

Técnicas de filtragem do espectro óptico baseadas em aproximações paramétricas, através de funções polinomiais ou gaussianas, não são eficientes devido às restrições impostas pela própria estrutura. Especificamente, o ajuste gaussiano utiliza uma estrutura fixa contendo apenas dois parâmetros (média e variância), o que limita a capacidade de aproximação do espectro no caso deste apresentar assimetrias, característica constante nos espectros tratados neste trabalho.

5- Técnicas não paramétricas

Técnicas não-paramétricas apresentam maior flexibilidade e maior robustez na presença de dados ruidosos. Conforme citado anteriormente, aproximações baseadas em redes neurais requerem um elevado custo computacional. Uma técnica não-paramétrica, comumente utilizada para filtragem espectral consiste no filtro de *Savitzky-Golay* (Masters, 1995). Este filtro assume que os vizinhos ao ponto a ser filtrado possuem informação relevante em virtude do comportamento suave do espectro em estudo. Para

filtragem de um dado ponto, este filtro examina o comportamento dos pontos vizinhos ao ponto em questão. O número de vizinhos a serem avaliados é chamado de comprimento médio do filtro. Determinado o número de vizinhos, o filtro realiza uma aproximação funcional destes pontos, utilizando um polinômio, cuja ordem varia tipicamente entre dois e seis, e cujos parâmetros são estimados via mínimos quadrados. O polinômio estimado é então avaliado no ponto central do intervalo definido pelo ponto a ser filtrado e seus respectivos vizinhos, dando origem ao valor filtrado desejado. Maiores detalhes sobre este filtro podem ser encontrados em (Flannery, 1992). Diante da flexibilidade apresentada por este filtro para aproximação espectral, juntamente com o reduzido custo computacional requerido para implementação e operação do mesmo, foi implementado para filtragem dos espectros ópticos oriundos das Redes de Bragg, um filtro de *Savitzky-Golay* de segunda ordem e comprimento médio igual a 16.

A partir dos dados filtrados, foram testadas duas técnicas (Pinto, 2007) para estimação do comprimento de onda de Bragg $\Delta\lambda_B$, mais especificamente a medição direta e o cálculo do centróide. A técnica baseada no cálculo do centróide foi a que apresentou melhor desempenho em relação ao ajuste da reta de calibração, sendo então escolhida para ser implementada no software final.

3.5.2. Cálculo dos centróides e software de cálculo

Definiremos o centro de massa de um sistema como sendo o ponto (x,y) tal que:

$$x = (m_1 * x_1 + m_2 * x_2 + \dots + m_n * x_n) / M ; \quad (11)$$

$$y = (m_1 * y_1 + m_2 * y_2 + \dots + m_n * y_n) / M \quad (12)$$

onde:

m_i é o valor de cada uma das massas e

$M = m_1 + m_2 + \dots + m_n$ é a massa associada a ele;

x_i e y_i representam os componentes da distância.

Assim o centro de massa é:

$$C_{\text{massa}} = \Sigma (m * d) / \Sigma m \quad (13)$$

onde:

m: massa

d: distância

A proposição acima nos dá um algoritmo para calcular o centro de massa de um sistema de n pontos. O centro de massa é o ponto onde podemos, fisicamente, considerar que é a concentração de toda massa distribuída. Assim, por analogia, consideramos o λ_c como sendo o ponto onde, geometricamente, está o centro da curva. A massa seria análoga à potência óptica e a distância ao comprimento de onda, assim:

$$\lambda_c = \Sigma (\lambda * y) / \Sigma y \quad (14)$$

onde:

y: Potência Óptica (mW)

λ : Comprimento de Onda (nm)

Assim, o Centro de massa é uma aplicação à geometria do λ_c que fornece um algoritmo para calcular o centro da curva de cada FBG e aplicá-lo em um determinado software.

Foram discutidas e testadas algumas metodologias existentes na literatura para estimação do deslocamento do comprimento de onda de Bragg, sendo escolhida a técnica do cálculo do centróide do espectro, que apresentou melhor desempenho no que tange à implementação em tempo real e precisão.

3.5.3. Exemplo de aplicação da teoria dos centróides

Neste item é apresentado o ensaio de caracterização de uma FBG, visando o estudo da reflexão da rede em função da variação térmica e a aplicação do cálculo de λ_c através da teoria dos centróides.

A Figura 3.21 mostra a caracterização espectral da FBG com seu comprimento de onda de Bragg, $\lambda_B=1536,01$ nm (temperatura ambiente), submetida à variação térmica na faixa de 5,0 °C a 95,0°C, onde λ_c foi obtido através da teoria dos centróides. Podemos observar o deslocamento dos picos em função da variação térmica.

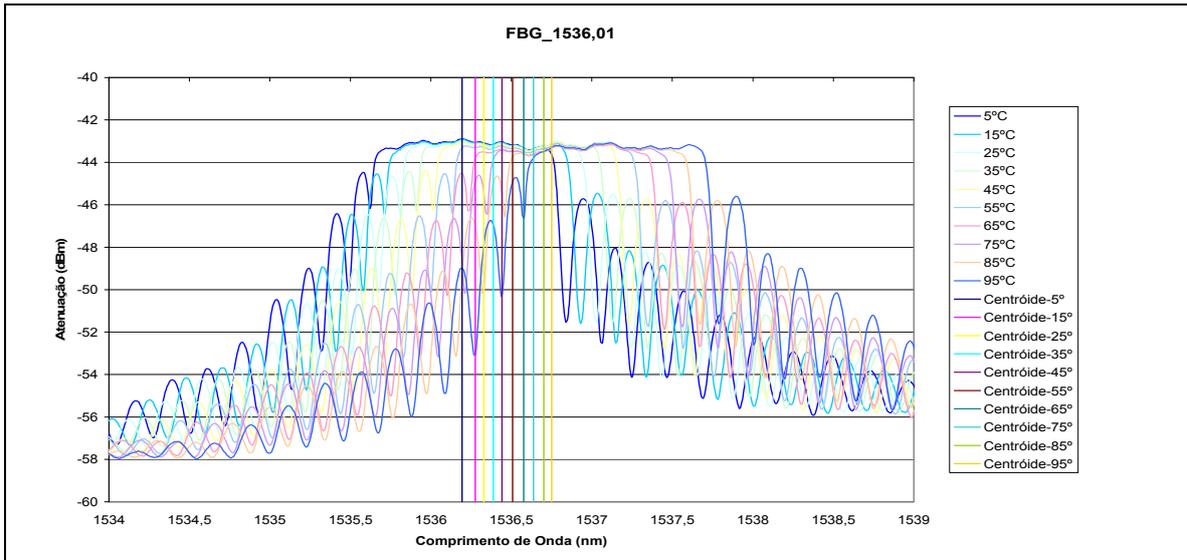


Figura 3.21 Caracterização espectral do sensor óptico com a FBG 1536,01 nm em função da variação térmica.

Na Figura 3.22 é mostrada a curva do λ_c (nm) da referida rede em função de T (°C).

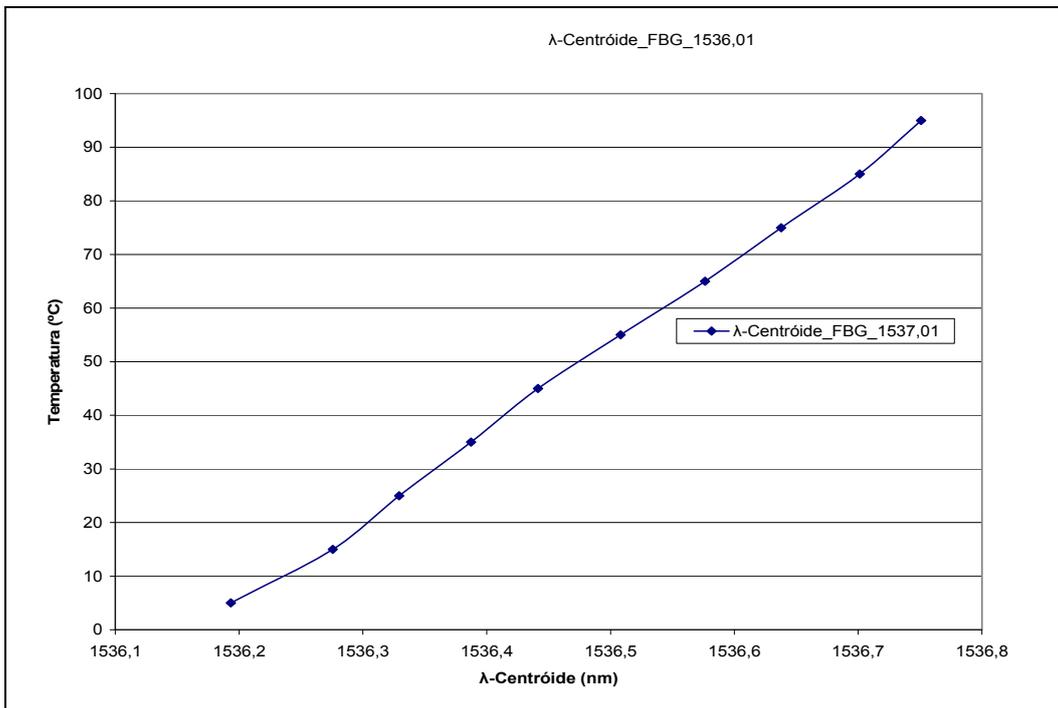


Figura 3.22 Deslocamento do λ_c da FBG 1536,01 nm em função da variação térmica.

Vale mencionar que alguns equipamentos comerciais desempenham a função do cálculo dos centróides.

3.6. Teoria sobre cerâmica piezoelétrica

O efeito piezoelétrico foi descoberto em certos cristais assimétricos como o cristal de quartzo (dióxido de silício), a turmalina, o sal de Rochelle e o sulfato de lítio.

Estes materiais geram uma diferença de potencial quando comprimidos em certas direções e vice-versa, ou seja, sob a aplicação de uma tensão elétrica apresentam uma distorção mecânica.

A interação piezoelétrica existe em todas as classes cristalinas que possuem eixos polares e a condição exigida pelo efeito piezoelétrico é a ausência de um certo tipo de simetria.

Quando o cristal é excitado na sua frequência de ressonância principal, correspondente ao modo de vibração desejado, um estado de máxima conversão de energia elétrica em energia dinâmica é produzido. Neste momento ocorre uma variação das dimensões físicas destes materiais e o seu formato é alterado, conforme a necessidade.

No caso de modos espessurais de uma lâmina piezoelétrica, as frequências de ressonância são definidas a partir da espessura do cristal.

Neste sentido, para um mesmo tipo de cristal, quanto maior a espessura menor a frequência de ressonância principal espessural. Quanto menor for a espessura, maior será a frequência (Jaffe, B. e colaboradores, 1971).

O cristal deve ser cortado de acordo com seus eixos, dependendo do principal modo de vibração desejado.

A Figura 3.23 (Santos, 1998) mostra o corte de um cristal de quartzo de acordo com seus eixos.

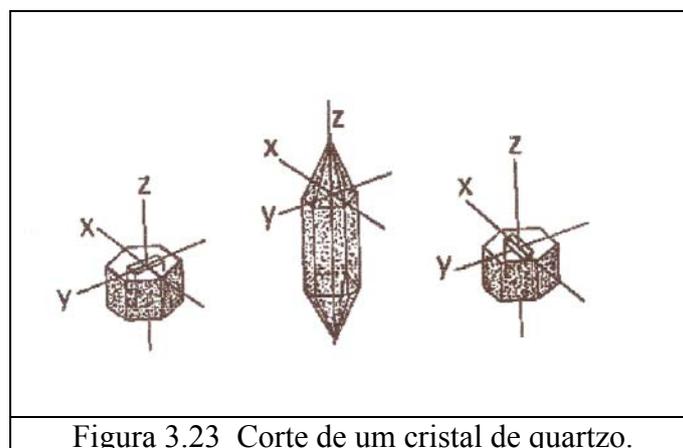


Figura 3.23 Corte de um cristal de quartzo.

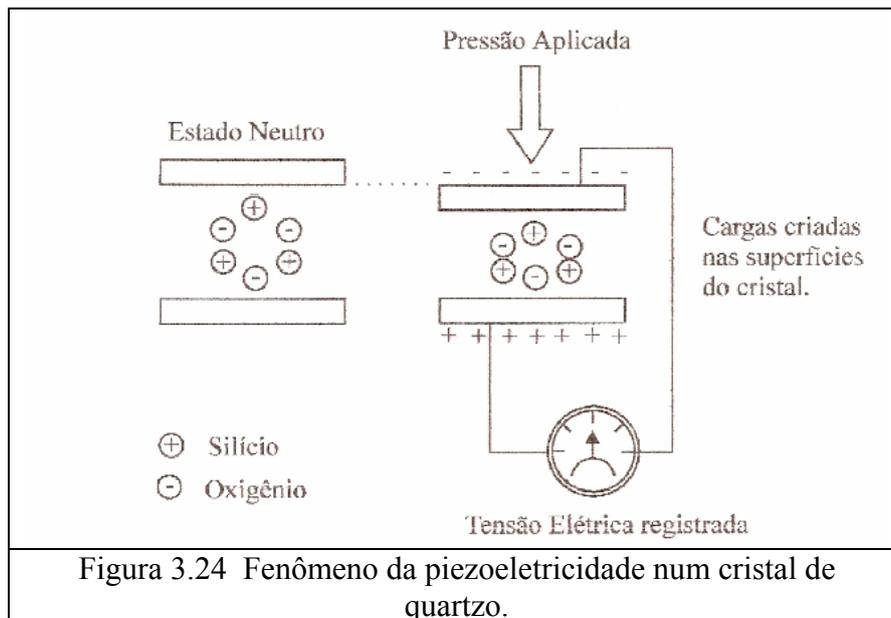
As cerâmicas piezoelétricas são corpos maciços semelhantes às utilizadas em isoladores elétricos, constituídas de inúmeros cristais ferroelétricos microscópicos, sendo denominadas como policristalinas. Particularmente, nas cerâmicas do tipo PZT, estes pequenos cristais possuem estrutura cristalina tipo Perovskita, que apresenta diferentes simetrias, dependendo da temperatura em que o material se encontra. Estando abaixo de uma determinada temperatura crítica, conhecida como temperatura de Curie, a estrutura Perovskita apresenta a simetria em que o centro de simetria das cargas elétricas positivas não coincidem com o centro de simetria das cargas negativas, dando origem a um dipolo elétrico.

O princípio de funcionamento está relacionado com a existência deste dipolo, que faz com que a estrutura cristalina se deforme na presença de um campo elétrico e gere um deslocamento elétrico, quando submetida a uma deformação mecânica. Desta forma, elementos piezoelétricos têm a propriedade de produzir uma tensão elétrica, quando submetidos a uma ação mecânica (Efeito Direto). E vice-versa, produzir um alongamento mecânico, quando aplicado um sinal elétrico (Efeito Inverso). A deformação mecânica ou a variação do dipolo elétrico da estrutura cristalina da cerâmica não implica, necessariamente em efeitos macroscópicos, visto que os dipolos se arranjam em domínios, que por sua vez se distribuem aleatoriamente no material policristalino. Para que ocorram manifestações macroscópicas é necessária uma orientação preferencial destes domínios, conhecida como polarização. Vale ressaltar, que esta polarização se esvai com o tempo e uso, inutilizando o material (Jaffe, B. e colaboradores, 1971).

Um entendimento de piezoelectricidade deve começar no interior da estrutura do material (monocristal ou uma cerâmica policristalina).

Esse cristal tem uma composição química definida, feito de íons que são forçados a ocupar posições que se repetem para cada íon, formando assim a estrutura ou a rede de cristal. A menor unidade que se repete é chamada de célula unitária da rede, e a existência ou não de uma simetria específica determina se é possível ou não a piezoelectricidade existir no cristal.

A Figura 3.24 mostra o fenômeno da piezoelectricidade num cristal de quartzo.



3.7. Fabricação de Cerâmicas tipo PZT

Para utilização em transdutores eletroacústicos, os monocristais PZT (PZT representa a abreviação de PbZrTi , titanato zirconato de chumbo) apresentam algumas desvantagens: constante dielétrica, capacitância com baixos valores e limitações de formato e tamanho.

A fim de serem contornadas tais dificuldades, pode-se optar pelo emprego de materiais cerâmicos da forma policristalina, a qual permite a confecção de transdutores PZT com diferentes configurações para diversas aplicações.

A fabricação de cerâmicas tipo PZT se dá através do seguinte procedimento:

1. Escolha da matéria-prima

A matéria-prima se constitui de óxidos comercializados a base de Titanato Zirconato de Chumbo (PbZrTi) e preparado pela técnica convencional de mistura de óxidos. Outros materiais utilizados neste processo são álcool isopropílico PA (como meio de moagem) e álcool polivinílico PVAL (como ligante).

2. Preparação do pó

A preparação do pó é responsável pela determinação de tamanho da estrutura cristalina. Seu processo se dá através de moagem (mistura), dopagem (% de Sr, Nb ou Fe) e calcinação.

Os insumos comerciais de PbO , ZrO_2 e TiO_2 nas proporções adequadas para obtenção da composição com o dopante desejado são misturados em moinho de bolas

de zircônia, em meio à álcool isopropílico, por 24 horas. Depois de seco em estufa à 70 °C, o pó é triturado em gral (de ágata) e peneirado em malha (60 mesh).

As amostras são retiradas para estudo de calcinação à temperatura de 500, 600, 700, 750 e 800 °C por 3,5 horas.

Após as calcinações são feitas análises em sedígrafo para determinação do tamanho de partícula e DRX para determinação da estrutura cristalina e da seqüência de reações durante a calcinação.

Ao pó calcinado à 750 °C por 3,5 horas, adiciona-se como ligante 2% em peso de álcool polivinílico e o pó com ligante incorporado é seco em estufa a 60°C e depois peneirado em malha 60 *mesh*.

3. Compactação

Processo de prensagem (densificação e crescimento grão) com objetivo de obter um corpo uniforme e denso.

4. Sinterização (densificação e crescimento do grão)

Cerâmicas a base de PZT estão sujeitas a formação de defeito e desvios de estequiometria, quando sinterizadas às temperaturas convencionais (~1200 °C) devido a alta volatilização do óxido de chumbo, o que altera sensivelmente as propriedades físicas do PZT.

O percentual de PbO em cerâmicas de PZT pode ser conservado durante a sinterização através do pó de PZ + Z colocado em cadinhos abaixo e ao redor da amostra de PZT. Este cadinho é então vedado com uma massa de alumina e álcool polivinílico.

Desta forma, a atmosfera do cadinho, rica em óxido de chumbo, evita a volatilização do PbO das amostras.

Uma vez pronta a montagem da amostra com pó em cadinho bem vedado, passa-se então para a fase de sinterização em forno com tempo e temperatura determinados, além da taxa de aquecimento e resfriamento.

A retirada do ligante deve ocorrer antes do sistema ser fechado para sinterização, a uma taxa de aquecimento de 4 °C/min até 400 °C por 30 min.

As sinterizações ocorrem após a retirada do ligante, à uma taxa de aquecimento de 8 °C/min, nas temperaturas e tempos descritos.

5. Polimento

As faces das amostras são polidas com alumina, carvão de silício e diamante em politriz. Obtém-se assim, paralelismo entre as faces e dimensões precisas e superfícies lisas das amostras.

6. Deposição de eletrodos

Após a sinterização, as amostras são pintadas por *silk-screen* para a obtenção de uma camada condutiva na superfície, através do processo de pintura de uma camada com tinta de prata e depois curada à 590 °C por 1 hora cada lado do cristal.

7. Polarização

O efeito piezoelétrico em cerâmicas policristalinas só é obtido através da orientação dos domínios ferrelétricos pela aplicação temporária de um forte campo elétrico. Este processo é conhecido como polarização (*pooling*) e se dá através da aplicação temporária de campo elétrico intenso aos eletrodos.

Para a polarização é necessário uma fonte de tensão contínua e um banho térmico com óleo de silicone.

8. Caracterização piezoelétrica

Processo que mede a frequência de ressonância e antirressonância, capacitância e constante de perda. A caracterização piezoelétrica é feita por meio de um analisador de impedância.

A partir destes dados, utilizam-se as seguintes fórmulas para fazer (Santos, 1998):

$$K_p^2 = \frac{f_a^2 - f_r^2}{0,8 f_a^2} \quad (15)$$

$$K_{33} = \frac{C_p \cdot d}{A \cdot \epsilon_0} \quad (16)$$

$$N_p = D \cdot f_r \quad (17)$$

Onde:

C_p = capacitância

K_p = fator de acoplamento planar

K_{33} = constante dielétrica

f_a = frequência de anti-ressonância

f_r = frequência de ressonância

N_p = constante de frequência

D = diâmetro

d = espessura

A = área

ϵ_0 = permissividade do vácuo.

As medidas devem ser feitas 10 dias após a polarização, visando observar o processo de envelhecimento, ou seja, o desalinhamento dos domínios ferroelétricos.

Na Figura 3.25 é mostrado o fluxograma do processo de obtenção de cerâmicas tipo PZT.

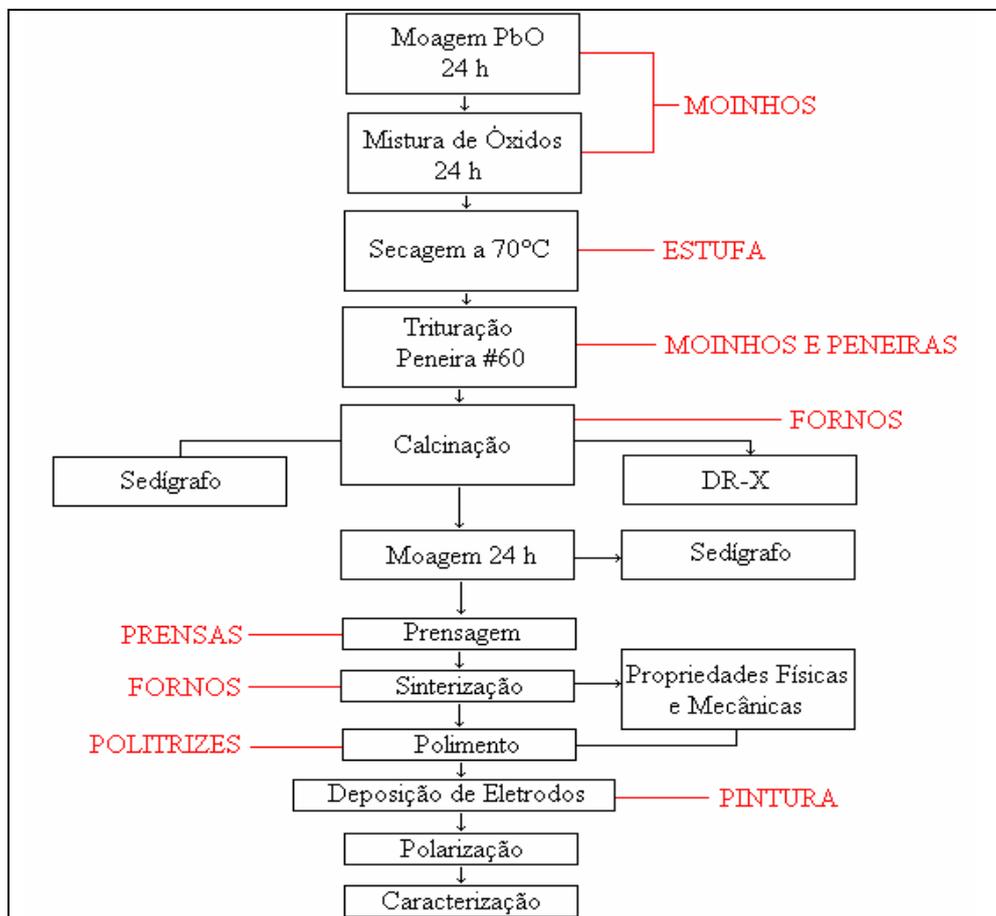


Figura 3.25 Fluxograma do processo de obtenção de cerâmica tipo PZT.

A Tabela 3.1 apresenta a classificação das cerâmicas tipo PZT (Santos, 1998).

Tabela 3.1 Classificação das cerâmicas tipo PZT

Tipo I - Sr	Tipo II - Nb	Tipo III - Fe
Modificado com estrôncio (Sr)	Modificado com nióbio (Nb)	Modificado com ferro (Fe)
PZT duro	PZT macio	PZT muito duro
$T_c > 310^\circ\text{C}$	$T_c > 330^\circ\text{C}$	$T_c > 290^\circ\text{C}$
Alto campo coercitivo	Baixo campo coercitivo	Alto campo coercitivo
Alto fator de acoplamento eletromecânico	Alto fator de acoplamento piezoelétrico	Alto fator de qualidade mecânica
Aplicações acústicas de média e alta potência	Aplicações em hidrofones de alta sensibilidade ou dispositivos de recepção	Aplicações em projetores acústicos de alta potência

A Tabela 3.2 apresenta os principais parâmetros piezoelétricos de duas cerâmicas PZTs (*PIceramic*, 2009).

Tabela 3.2 Principais parâmetros piezoelétricos de duas PZTs

Principais parâmetros	Cerâmicas	
	SP-8 (Fe)	SP-4 (Sr)
Temperatura Curie ($^\circ\text{C}$)	330	325
Deformação Piezoelétrica (pm/V ou pC/N)	$d_{31} = -97$ $d_{33} = 215$	$d_{31} = -122$ $d_{33} = 300$
Coefficiente de acoplamento piezoelétrico	$K_p = 0,50$ $K_{33} = 0,63$	$K_p = 0,60$ $K_{33} = 0,68$
Peso específico ρ (g/cm^3)	7,6	7,6
Campo elétrico máximo (kV/mm)	1 a 2	1 a 2

Os cristais piezoelétricos também são utilizados como nano-atuadores, particularmente aplicados em experimentos ópticos, podendo citar, interferômetro óptico por efeito de Sagnac. O efeito Sagnac pode ser observado em um *set up*

interferométrico em forma de anel, quando um feixe de luz é dividido em dois, onde cada caminho segue trajetórias em direções opostas. Um dos caminhos a fibra óptica pode ser enrolada ao redor de um cristal PZT cilíndrico conduzido por um sinal de tensão senoidal, a fim de induzir uma variação periódica de comprimento no caminho da luz. Esta técnica é chamada de demodulação super-heteródina e pode ser usada em giroscópios a fibra óptica, por exemplo. Foi com esta idéia que foi desenvolvido este sistema em que o sensor baseado em FBG fica enrolado ao PZT, com objetivo de medir sua deformação a partir da aplicação de um campo elétrico.

Uma demonstração da utilização de PZT juntamente com uma FBG pode ser citada para o controle da tensão em unidades de bombas elétricas aplicadas no setor de petróleo e gás, por Niewczas e colaboradores, 2005. Nosso caso especificamente está voltado para aplicação desta técnica no setor elétrico e conseqüentemente, estamos preocupados com o cumprimento das normas IEC (*International Eletrotechnical Commission*) para transformadores.

3.7.1. Definição do coeficiente de deslocamento piezoelétrico: d_{31}

A Figura 3.26 mostra a estrutura do PZT (D é o diâmetro, d é a distância entre os eletrodos, h é a espessura do tubo e a deformação da cerâmica d_{31} (coeficiente de extensão) a partir da incidência de campo elétrico.

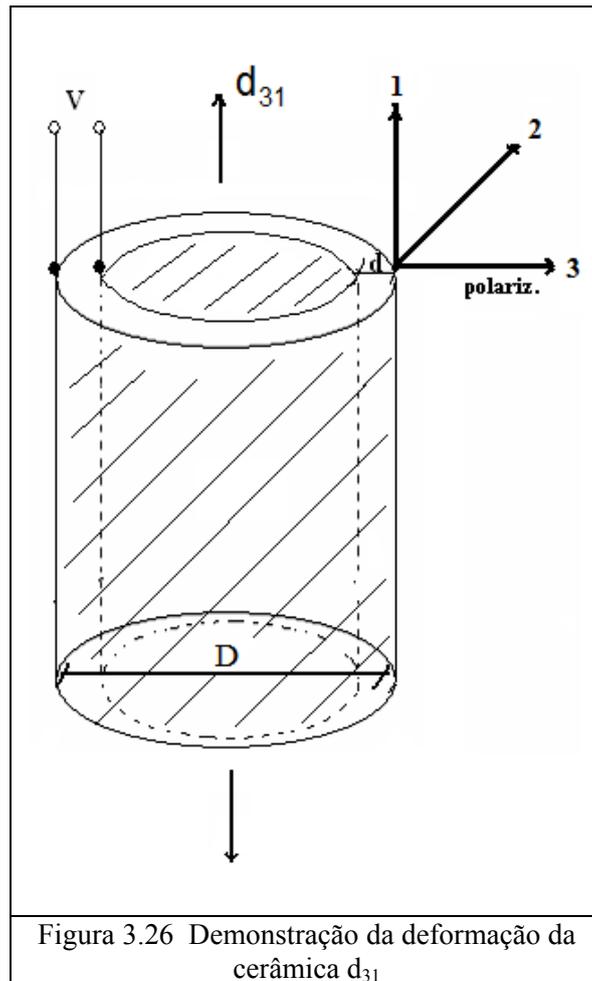


Figura 3.26 Demonstração da deformação da cerâmica d_{31}

A equação de base eletromecânica para uma cerâmica piezoelétrica, pode ser obtida (PI *Ceramics*, 2010):

$$\frac{\Delta X}{X} = d_{ij} E \quad (18)$$

Onde $\frac{\Delta X}{X}$ apresenta a mudança relativa no comprimento do elemento cerâmico, d_{ij} é o deslocamento piezoelétrico, sendo i para designar a direção do cristal e o j a polarização definida através das coordenadas cartesianas. A direção da polarização é estabelecida por um campo elétrico aplicado entre os eletrodos durante o processo de polarização. E finalizando, E é o campo elétrico aplicado aos eletrodos do PZT. Em um PZT de forma geométrica tubular com eletrodos depositados nas paredes interna e externa, o d_{31} representa um deslocamento tangencial (aumento de circunferência) e d_{33} representa o deslocamento da espessura do PZT.

O cálculo do deslocamento perpendicular a direção da polarização (d_{31}) pode ser obtido (PIceramics, 2009):

$$\Delta L = d_{31} \cdot L \cdot \frac{V}{d} \quad (19)$$

Onde:

ΔL = deslocamento do comprimento do tubo da cerâmica (m)

d_{31} = coeficiente de deslocamento (perpendicular a direção da polarização)

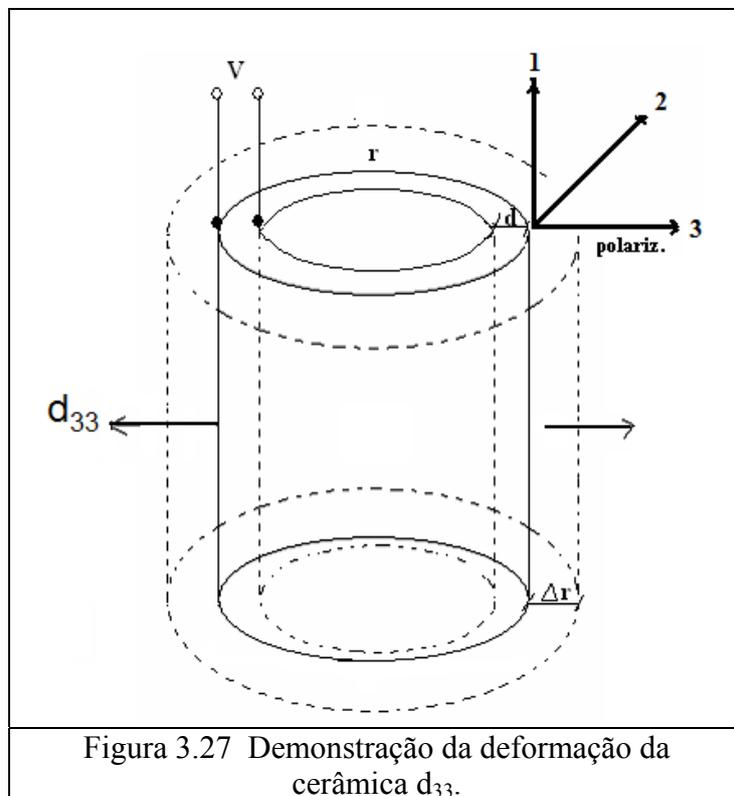
L = comprimento do tubo da cerâmica (m)

V = tensão (V)

d = espessura entre os eletrodos (m)

3.7.2. Definição do coeficiente de deslocamento piezoelétrico: d_{33}

A Figura 3.27 mostra a estrutura do PZT (D é o diâmetro, d é a distância entre os eletrodos, h é a espessura do tubo e a deformação da cerâmica d_{33} (coeficiente de extensão) a partir da incidência de campo elétrico.



O cálculo do deslocamento na direção da polarização (d_{33}) é dado por (PIceramics, 2009):

$$\frac{\Delta\omega}{w} = d_{33}E \quad (20)$$

onde:

$\Delta\omega$ = deslocamento da espessura entre os eletrodos (m)

d_{33} = coeficiente de deslocamento na direção da polarização (pm/V)

V = tensão (V)

3.8. Parâmetros piezoelétricos

As propriedades de uma cerâmica piezoelétrica são definidas pelas constantes piezoelétricas, elásticas e dielétricas dadas como uma função do estado de polarização da cerâmica (*Standards on Piezoelectrics Crystal*, 1961).

Constantes elásticas:

Notação Tensorial, Definição das constantes, Constante dielétrica e Fator ou Coeficiente de Acoplamento piezoelétrico.

- Notação sensorial

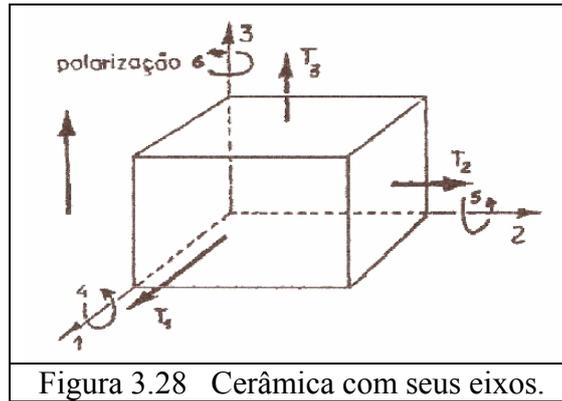
A direção de polarização é convencionada para ser a do eixo 3, com os eixos 1, 2 perpendiculares.

Os números 4, 5 e 6 referem-se às deformações associadas com as direções 1, 2 e 3, respectivamente.

Os subscritos ij adquirem valores de 1 a 6 com as seguintes características:

- 1,2,3: pressões paralelas aos eixos 1, 2 e 3.
- 4, 5, 6: pressões ao redor dos eixos 1, 2 e 3 equivalentes ao torque nos planos 2-3, 3-1, 1-2, respectivamente.

Na Figura 3.28 é mostrada uma amostra genérica de cerâmica com seus eixos.



- Definições das Constantes

a) Compliância ou inverso da rigidez (*Standards on Piezoelectrics Crystal*, 1961):

$$S_{ij} = \frac{\text{deformação na direção } i}{\text{pressão na direção } j} = \frac{S_i}{T_j} (\text{m}^2 / \text{Newton}) \quad (21)$$

b) Módulo de elasticidade “C” (*Standards on Piezoelectrics Crystal*, 1961):

$$C_{ij} = \frac{\text{pressão na direção } i}{\text{deformação na direção } j} = \frac{T_j}{S_j} (\text{Newton} / \text{m}^2) \quad (22)$$

c) Módulo de Young (*Standards on Piezoelectrics Crystal*, 1961):

$$Y_{ij} = (S_{ij})^{-1} = \frac{T_j}{S_j} (\text{Newton} / \text{m}^2) \quad (23)$$

d) Constante de Poisson (*Standards on Piezoelectrics Crystal*, 1961):

$$\sigma = \frac{-S_{12}}{S_{11}} \quad (24)$$

Na Figura 3.29 são mostrados diversos modos de vibração para diferentes geometrias de uma cerâmica PZT (Santos, 1998 e *PIceramic Tutorial*, 2009).

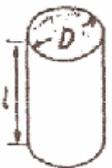
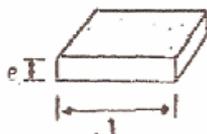
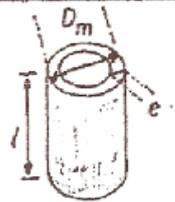
	CILINDRO	PLAÇA FINA		DISCO FINO	
FORMATO					
DIREÇÃO DE POLARIZAÇÃO	↓	↓		↓	
DEFORMAÇÃO NA DIREÇÃO DE VIBRAÇÃO	longitudinal	espessura	transversal	espessura	radial
					
CONSTANTES	$d_{31} \quad g_{31} \quad k_{31} \quad \epsilon_{33}^T$	$d_{33} \quad g_{33} \quad k_{33} \quad \epsilon_{33}^S$	$d_{31} \quad g_{31} \quad k_{31} \quad \epsilon_{33}^T$	$d_{31} \quad g_{31} \quad k_{31} \quad \epsilon_{33}^S$	$d_{31} \quad g_{31} \quad k_{31} \quad \epsilon_{33}^T$
FORMATO	TUBO			SEMI ESFERA	
					
DIREÇÃO DE POLARIZAÇÃO					
DEFORMAÇÃO NA DIREÇÃO DE VIBRAÇÃO	longitudinal	espessura	circular	espessura	radial
					
CONSTANTES	$d_{31} \quad g_{31} \quad k_{31} \quad \epsilon_{33}^T$	$d_{33} \quad g_{33} \quad k_{33} \quad \epsilon_{33}^S$	$d_{31} \quad g_{31} \quad k_{31} \quad \epsilon_{33}^T$	$d_{31} \quad g_{31} \quad k_{31} \quad \epsilon_{33}^S$	$d_{31} \quad g_{31} \quad k_{31} \quad \epsilon_{33}^T$

Figura 3.29 Modos de vibração de uma cerâmica piezoelétrica.

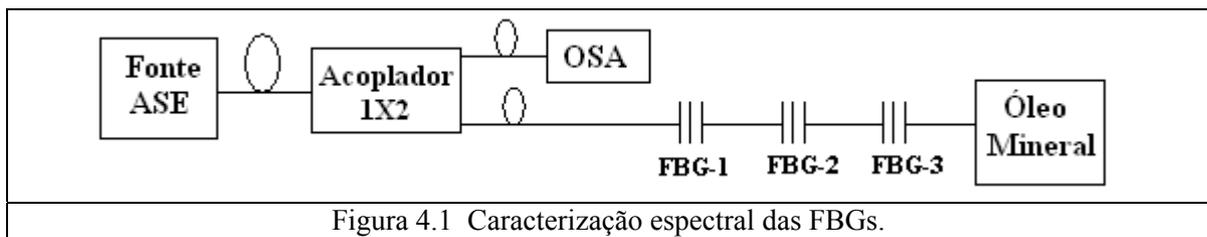
Capítulo 4. Desenvolvimento do sensor de temperatura

Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento de sensores de temperatura para aplicação em gerador hidroelétrico. Descrevem-se desde as escolhas das FBGs, passando pela caracterização, calibração, encapsulamento, instalação e operação em um hidrogerador real em funcionamento. O capítulo finaliza com os resultados obtidos em campo e a discussão.

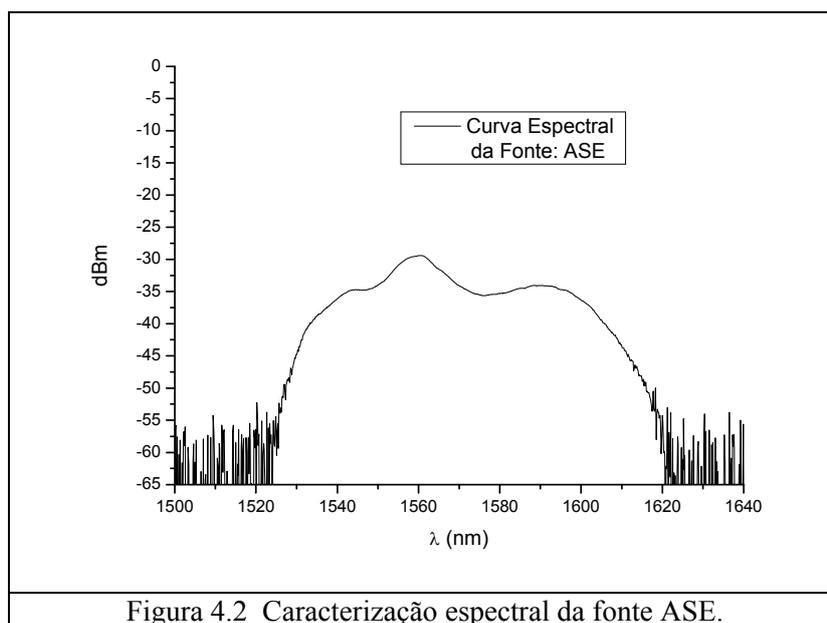
4.1. Caracterização espectral das FBGs

A caracterização espectral das FBGs foi realizada através de um *set up* óptico que consiste de: uma fonte óptica (ASE-FL7002, faixa de 1530-1610 nm, Thorlabs), um acoplador óptico (SM, 1X2, faixa de 1310-1550 nm), um analisador de espectro óptico-OSA (MS9710C, faixa de 600-1750 nm, Anritsu), três FBGs (1536,01 nm, 1547,35 nm e 1557,07 nm) e óleo mineral.

O *set up* óptico é mostrado no diagrama da Figura 4.1.



Inicialmente, foi feita a caracterização espectral da fonte ASE (Figura 4.2)



Em seguida, foi realizada a caracterização espectral das três redes de FBG. Na Figura 4.3 podemos observar a curva espectral das redes, conforme mostrado na tela do OSA. Na Figura 4.4 observa-se a curva espectral das FBGs a partir dos dados obtidos do OSA e em seguida plotado.

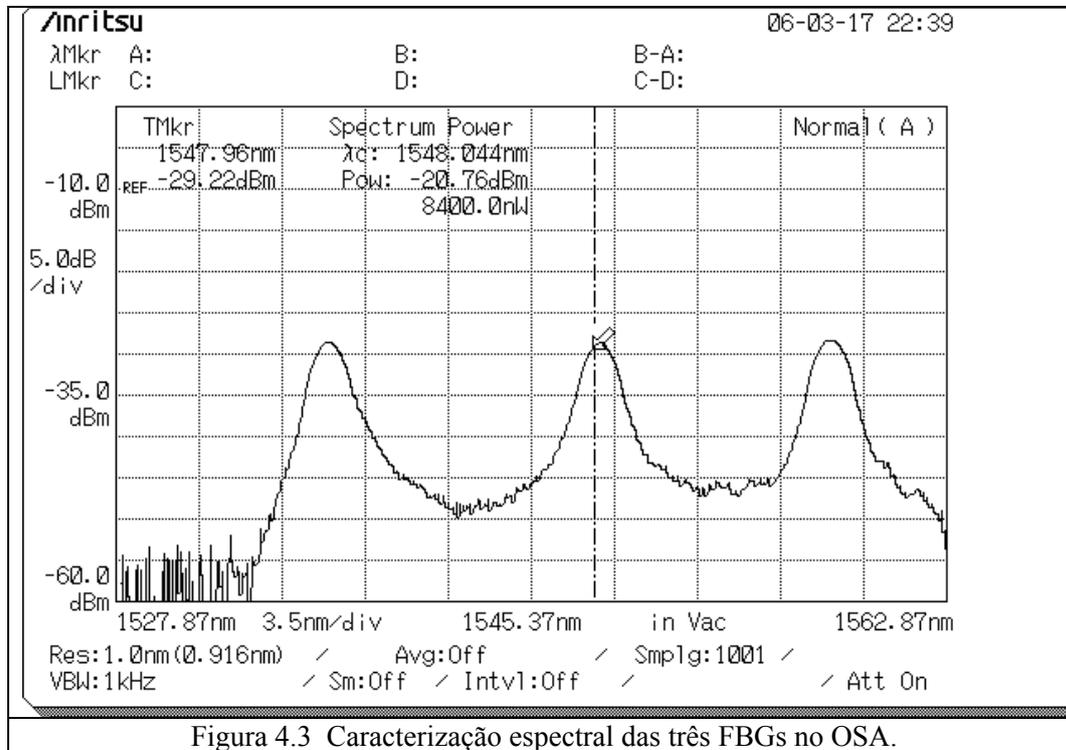


Figura 4.3 Caracterização espectral das três FBGs no OSA.

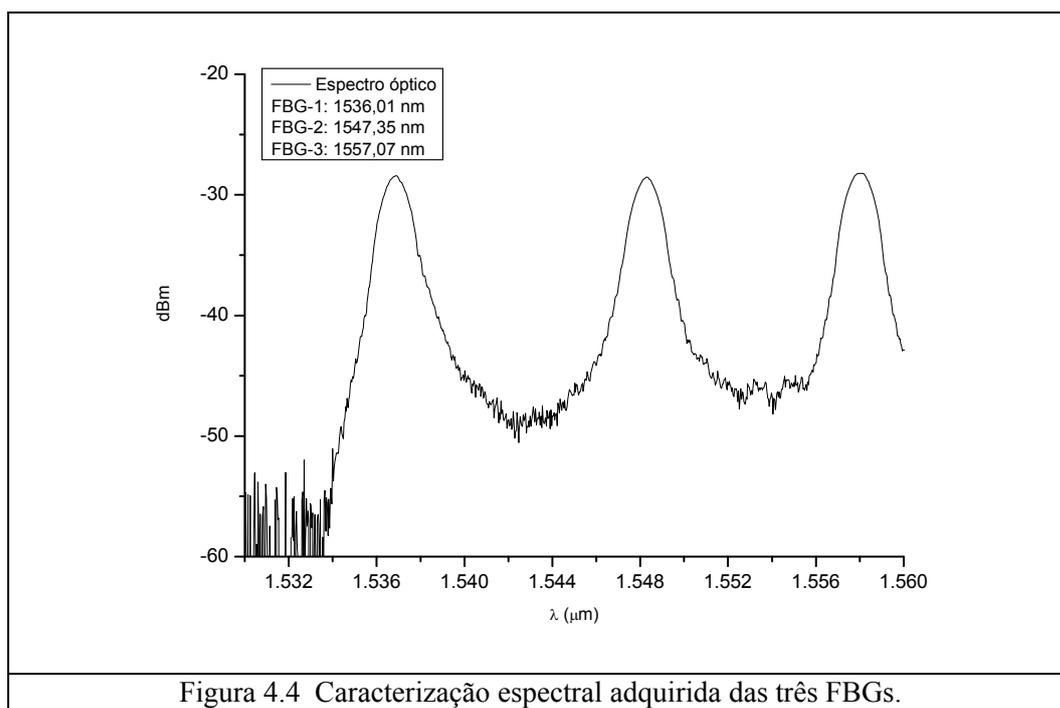


Figura 4.4 Caracterização espectral adquirida das três FBGs.

Posteriormente, foi desenvolvido um transdutor composto de um elemento sensor de FBG que foi colocado dentro de um tubo de cobre de 2 mm de diâmetro em curva. O tubo de cobre protege a fibra e também facilita a transmissão de calor externo para o sensor, mantendo-o em contato com o ambiente cuja temperatura deve ser medida.

Uma vez, tendo sido montado o transdutor, foram realizados os ensaios de caracterização espectral dos sensores de FBG, quando eles foram submetidos à variação térmica na faixa de 25 °C a 95 °C, com a utilização de um banho termostático.

A Figura 4.5 mostra o diagrama esquemático do ensaio.

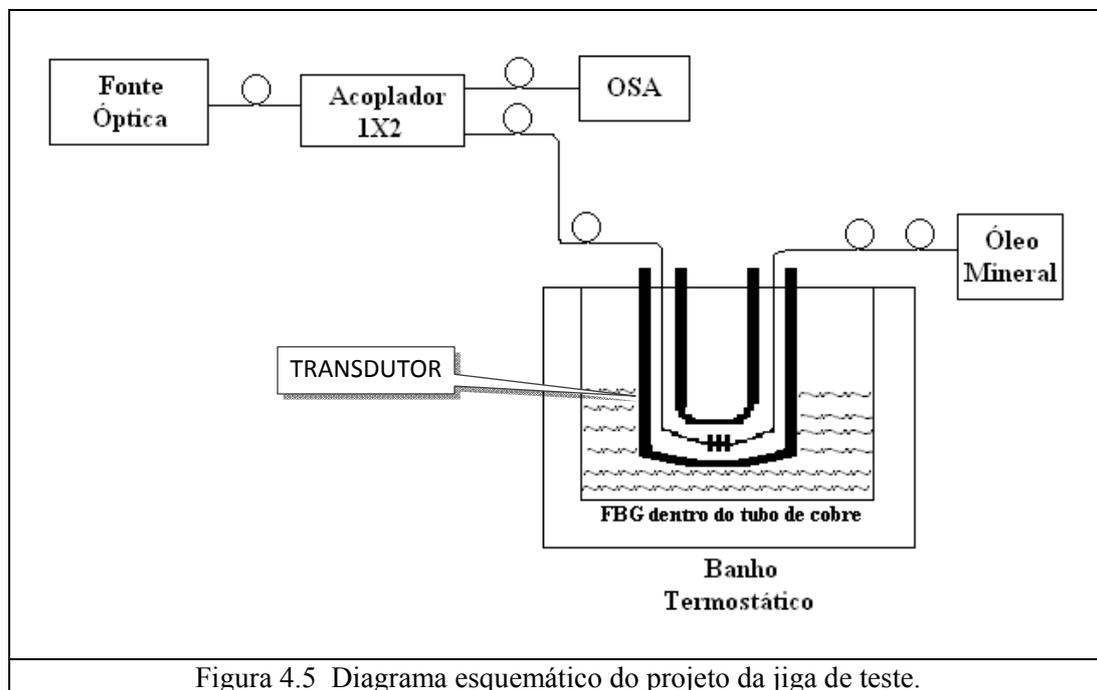


Figura 4.5 Diagrama esquemático do projeto da jiga de teste.

Para a realização do ensaio foi necessário a confecção de uma nova tampa para o banho termostático. Esta adaptação teve como finalidade a fixação do transdutor óptico no banho termostático para a caracterização espectral.

Na Figura 4.6 podemos observar a fotografia da tampa adaptada ao banho termostático com o sensor óptico inserido dentro do tubo de cobre.

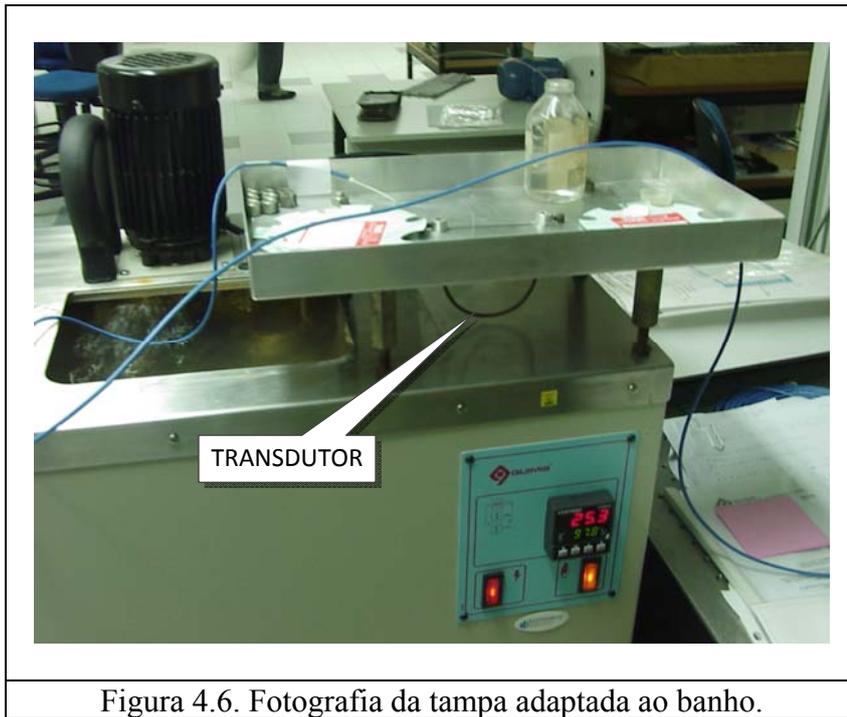


Figura 4.6. Fotografia da tampa adaptada ao banho.

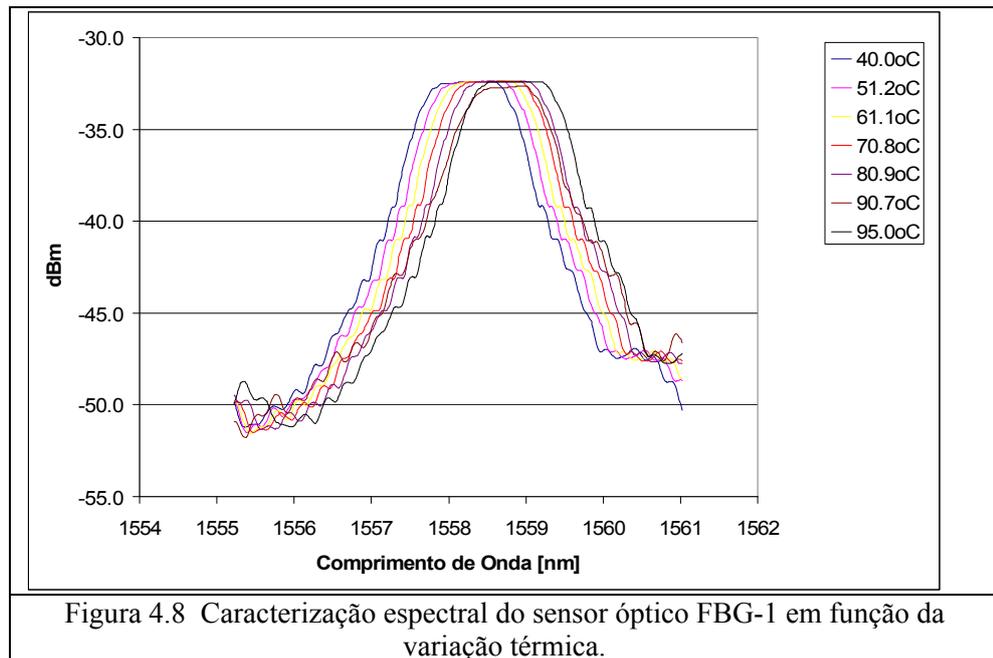
Na Figura 4.7 podemos observar a fotografia do ensaio na giga de teste. Note as curvas espectrais na tela do OSA. A fonte laser (ASE) se encontra ao lado do OSA e sobre a fonte observa-se o medidor de potência.



Figura 4.7. Fotografia do ensaio na giga de teste.

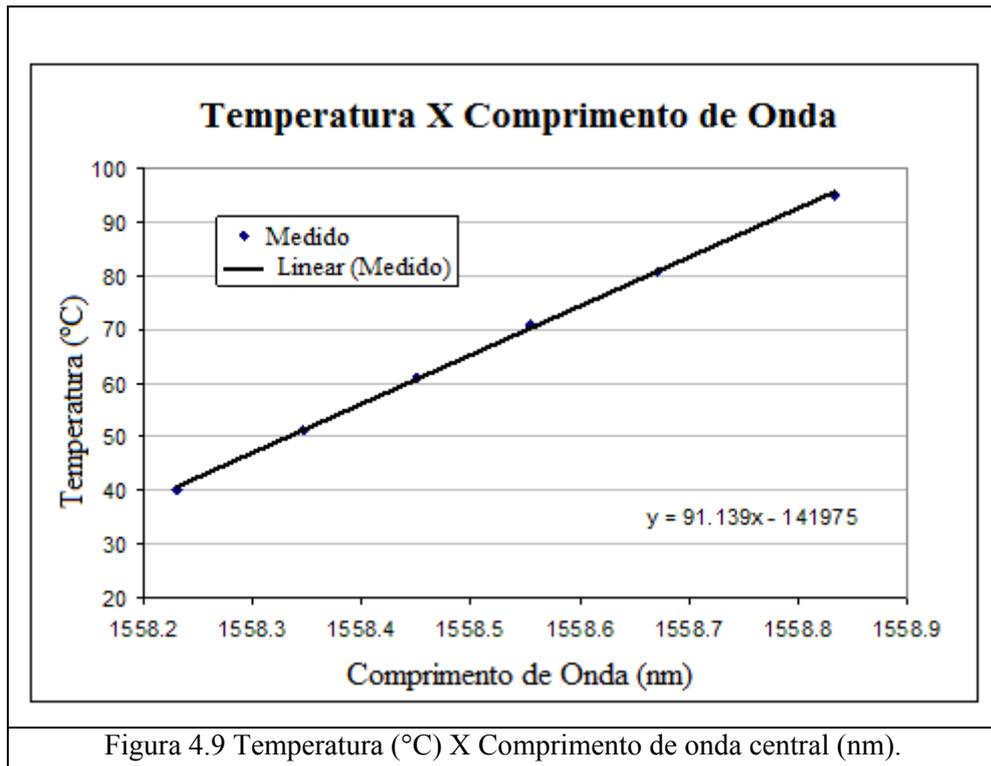
A Figura 4.8 apresenta a caracterização espectral de uma FBG (FBG-1,

$\lambda_B = 1557,07 \text{ nm}$) em função da variação térmica.



Podemos observar o deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da variação térmica na faixa de 40 °C a 95 °C.

Na Figura 4.9 foi plotado o gráfico da temperatura em função do comprimento de onda central de cada espectro obtido na Figura 4.8. Como referência utilizou-se o ponto de cruzamento de -37,5 dBm (FWHM aproximado), uma vez que o topo de cada espectro é plano (vide Figura 4.8). Cada espectro cruza duas vezes o ponto de cruzamento e assim utilizou-se o valor médio do comprimento de onda que foi plotado na Figura 4.9.



A Tabela 4.1 (em anexo) apresenta os valores que foram utilizados para plotar o gráfico da Figura 4.9.

Desta forma, o deslocamento espectral do comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda_B$) em função da temperatura pode ser calculado.

Partindo de, $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta)\Delta T$ representada pela Eq. (6), obtem-se para uma extensão nula (rede em repouso).

Logo, para $\lambda_B = 1558,2302$ nm (comprimento de onda central para 40 °C) temos, o *drift* térmico,

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 14,3 \times 10^{-3} \text{ nm/}^\circ\text{C.} \quad (25)$$

Este é o *drift* teórico para os coeficientes obtidos.

Foi realizada uma regressão com os pontos da Figura 4.9 obtendo-se a função abaixo que foi plotada no gráfico.

$$y = 91.139x - 141975.$$

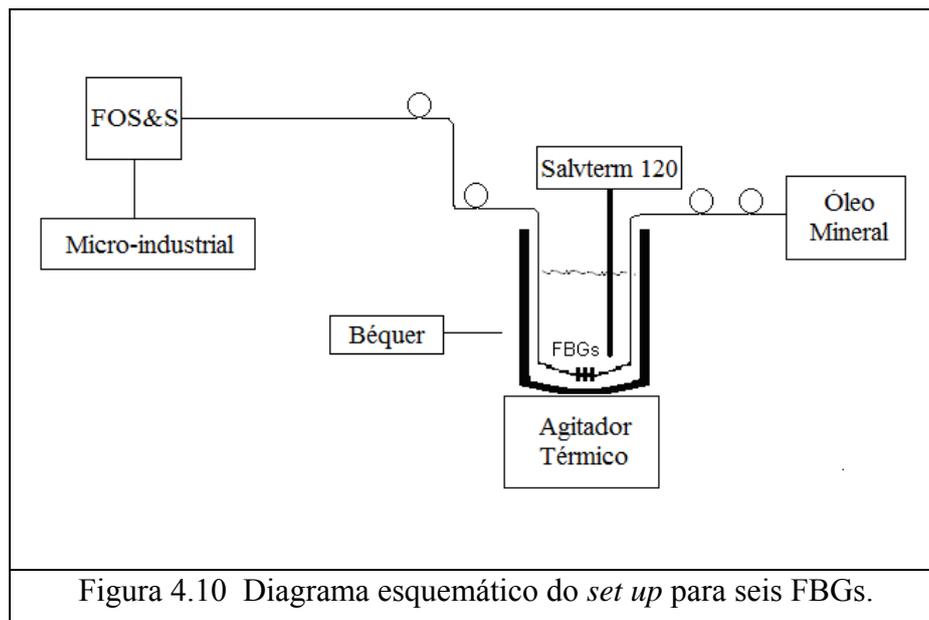
Desta função podemos calcular o *drift* térmico experimental:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 10,972 \text{ pm/}^\circ\text{C}, \quad (26)$$

que apresenta um valor próximo do valor teórico, conforme mostrado na Equação (25).

4.2. Caracterização espectral de seis FBGs em função da variação térmica

Neste item é apresentado o diagrama esquemático do *set up* utilizado para a caracterização de seis FBGs que consiste de: um béquer, agitador térmico (Quimis), termômetro (Salvterm 120), interrogador óptico (*Spectral Eye*, SE-400, faixa: 1530-1570 nm, FOS&S) e micro-industrial para a aquisição de sinais (Figura 4.10).



Inicialmente, foi colocado sobre o agitador térmico o béquer com aproximadamente 300 ml de água (temperatura em torno de 22,5°C) com os seis sensores de FBG e o termômetro. A temperatura foi aumentada gradativamente com o acionamento do agitador térmico, variando entre 25 °C até 95 °C.

Na Figura 4.11 é mostrado o gráfico do ensaio térmico com os seis sensores: FBG-1:1532 nm, FBG-2:1542 nm, FBG-3:1548 nm, FBG-4:1554 nm, FBG-5:1560 nm

e FBG-6:1566 nm. Podemos observar o deslocamento dos picos em função da variação térmica.

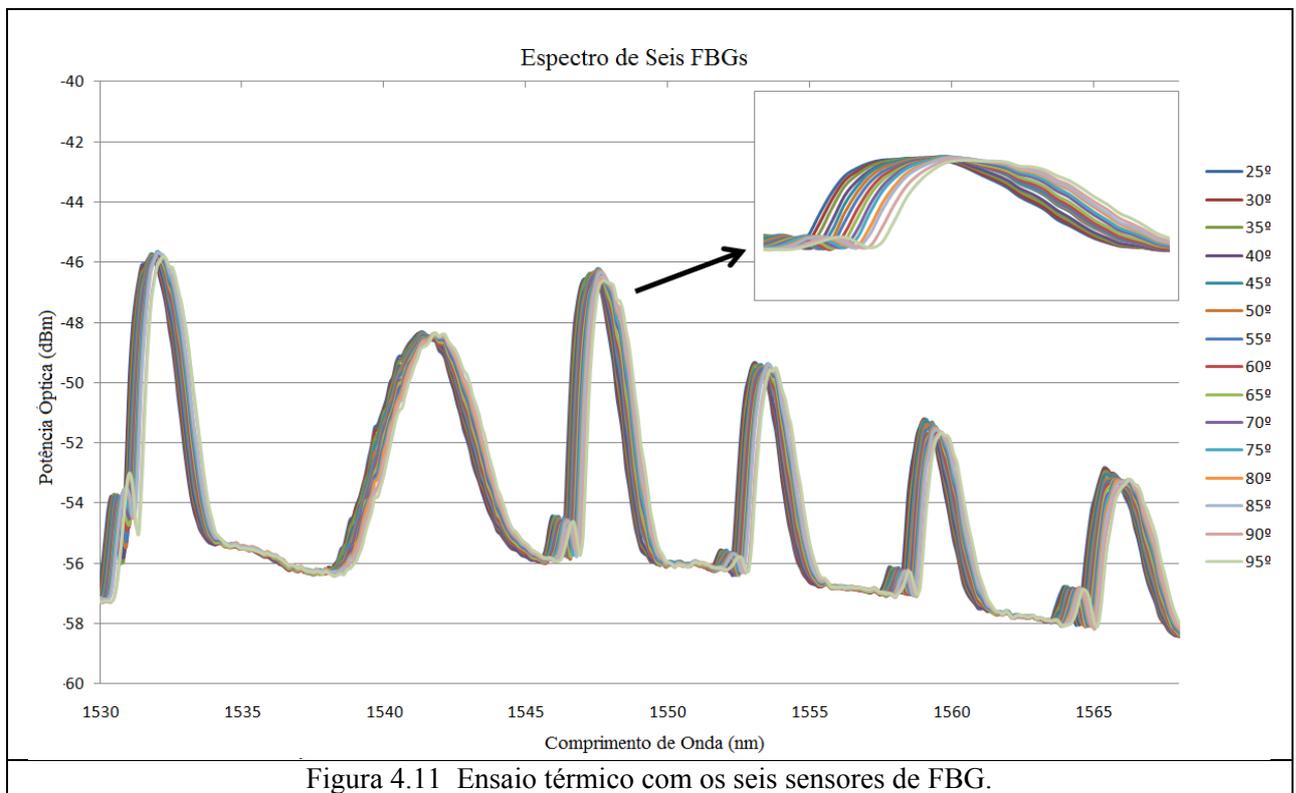


Figura 4.11 Ensaio térmico com os seis sensores de FBG.

Foram realizados os ensaios de caracterização espectral, individualmente dos sensores de FBG com o objetivo de selecionar os seis sensores que deverão ser instalados em campo, como pode ser observado na Figura 4.12.

Os sensores escolhidos apresentam comprimentos de onda que atendem a faixa do interrogador óptico de Bragg (1530 – 1570 nm).

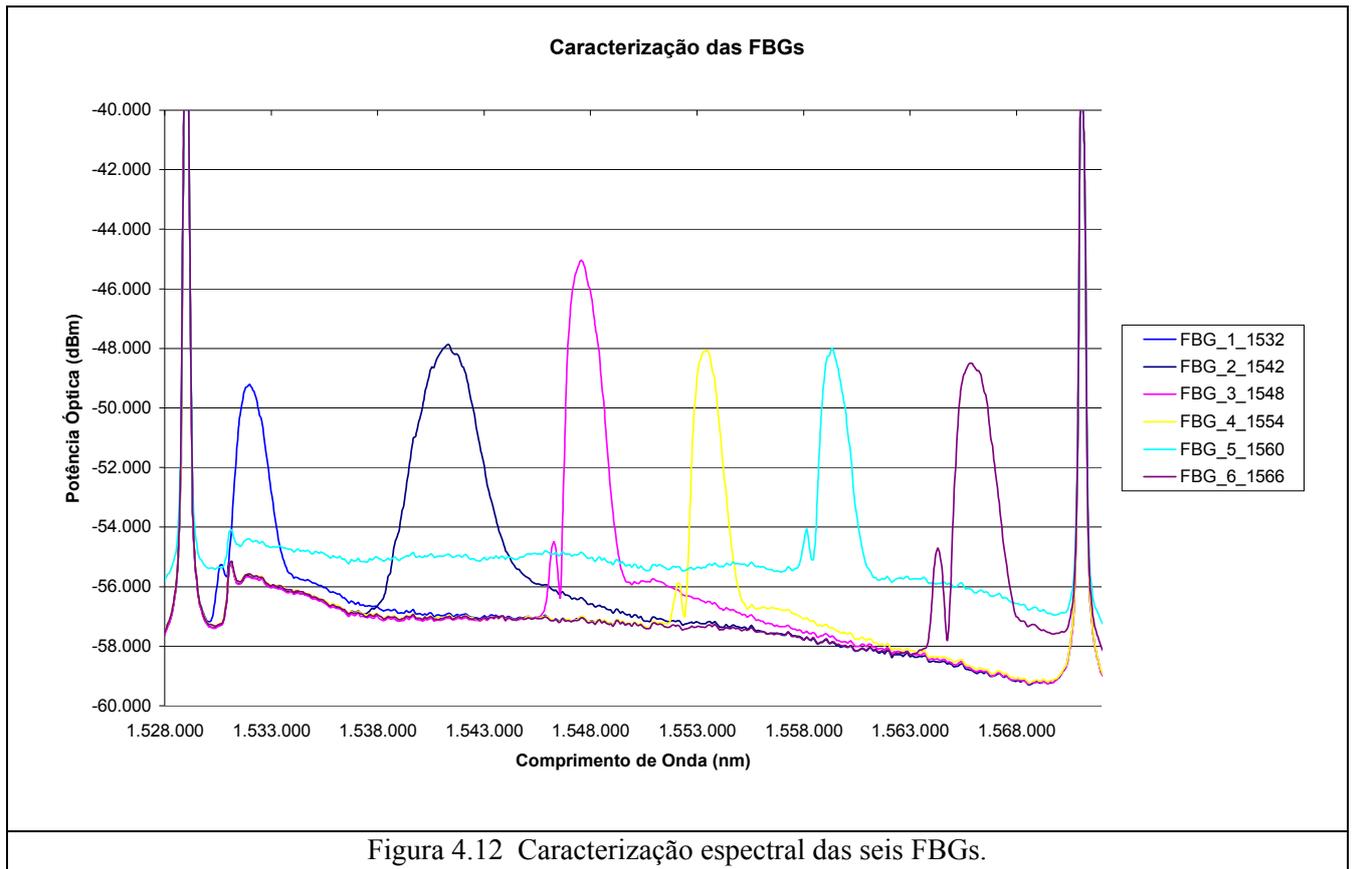
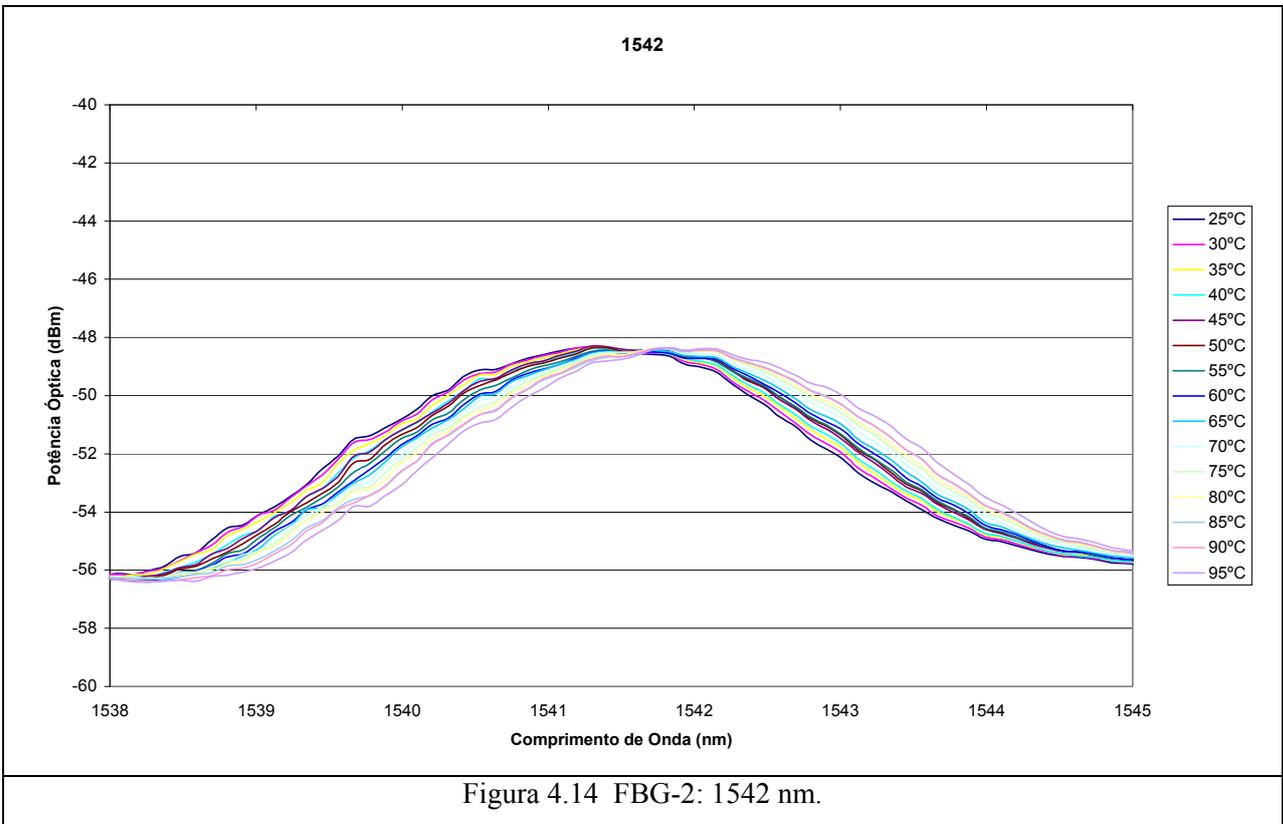
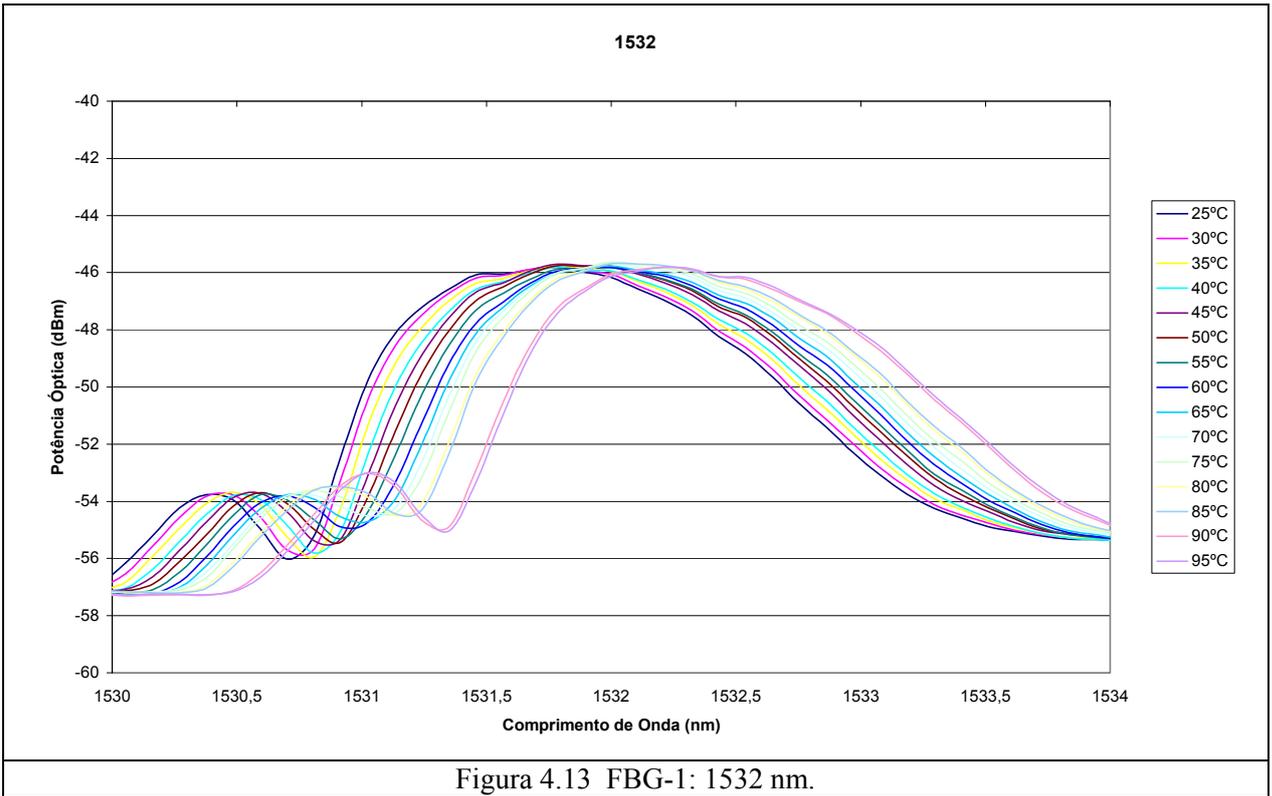
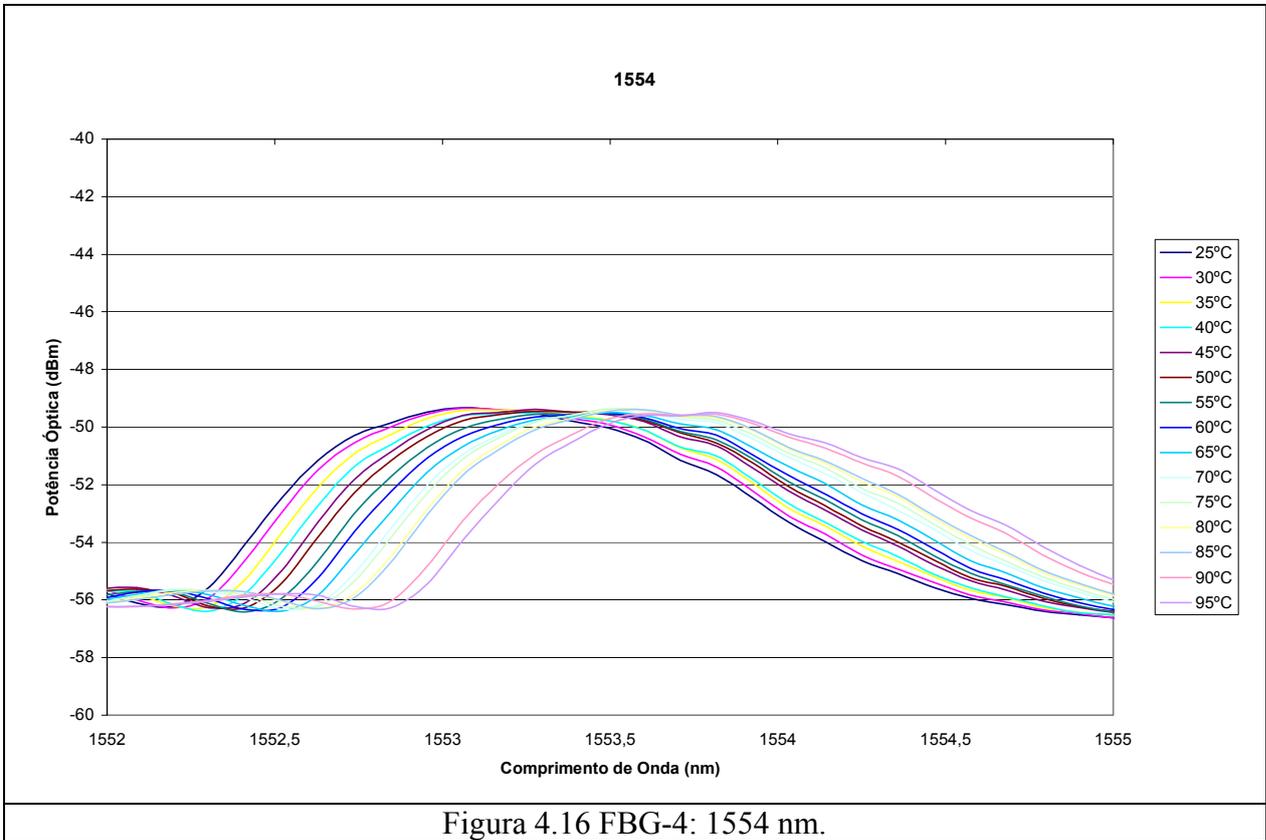
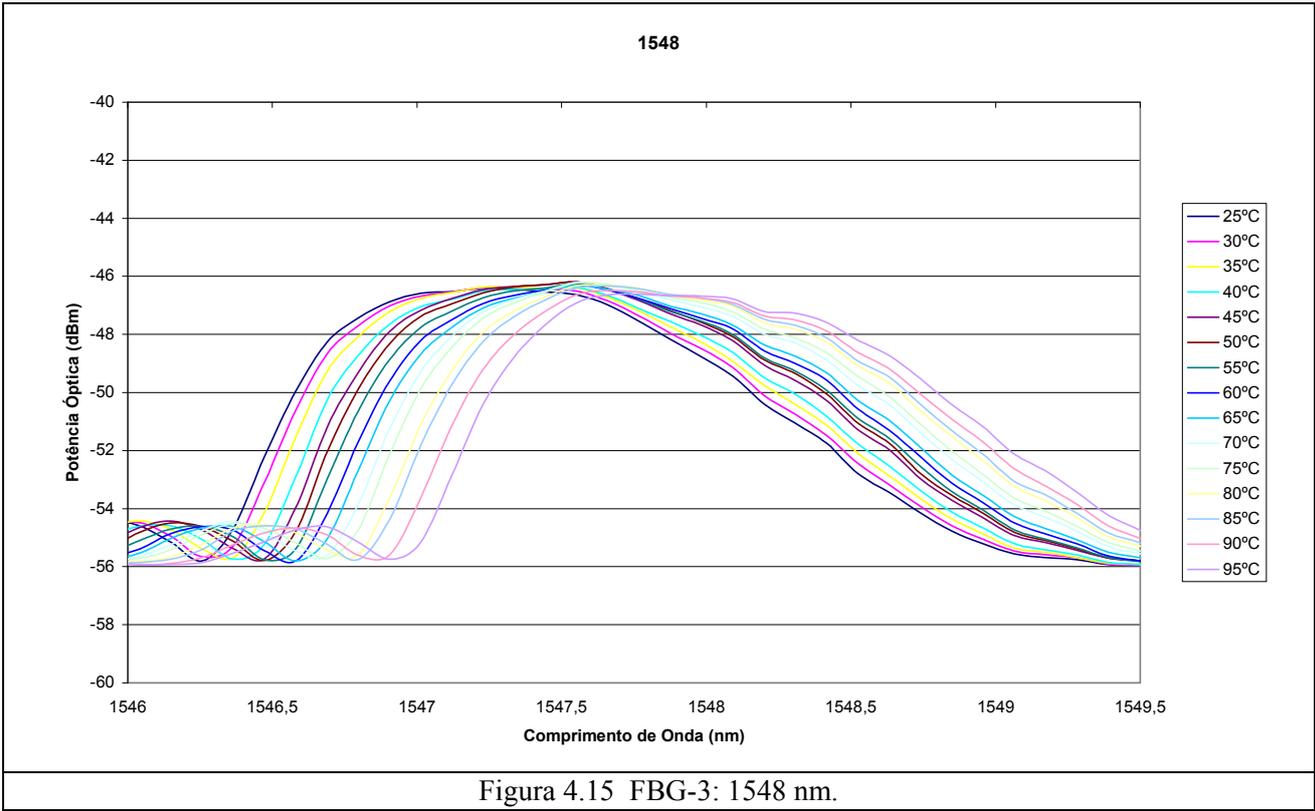
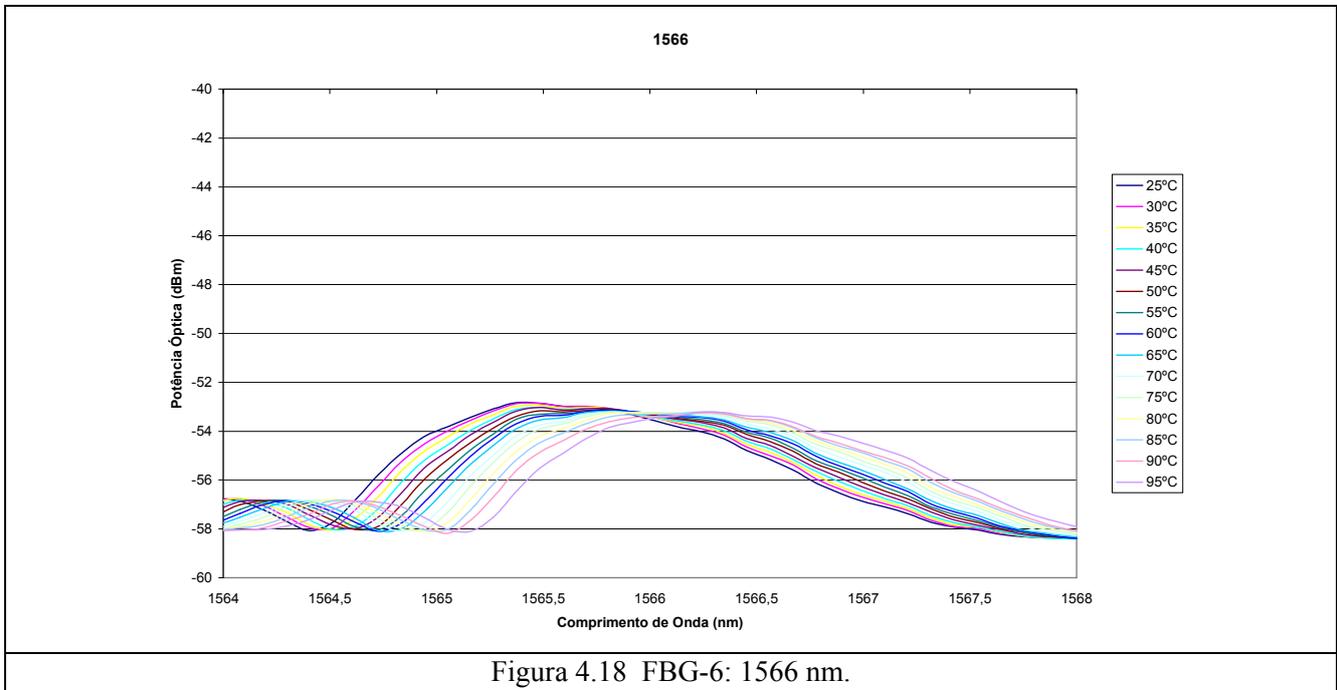
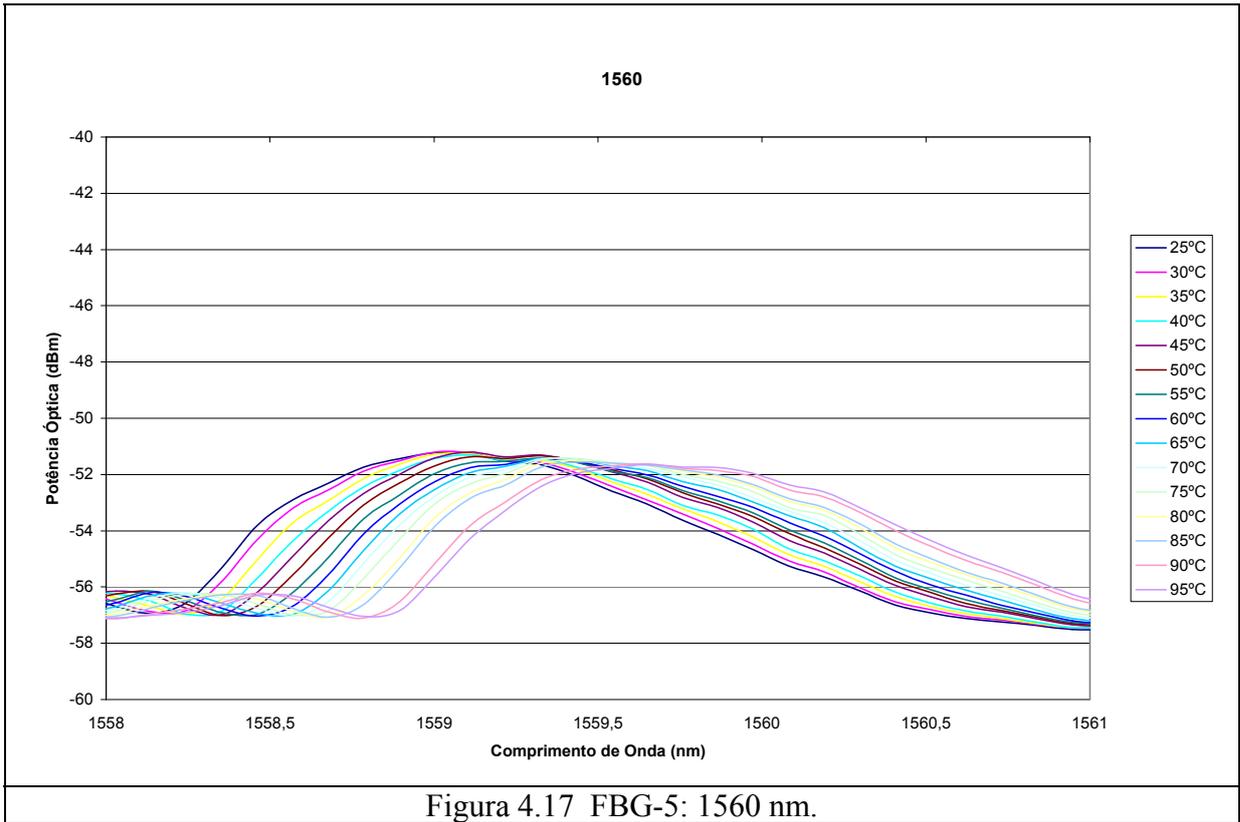


Figura 4.12 Caracterização espectral das seis FBGs.

Nas Figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 são mostradas, individualmente, as curvas referentes aos seis sensores. Essas curvas foram plotadas para a melhor visualização da característica espectral de cada sensor, evidenciando o deslocamento do pico em função da variação da temperatura (25 °C a 95 °C).







Nota-se que houve um deslocamento do λ_B de aproximadamente 0,5 nm neste range de temperatura.

4.3. Calibração dos sensores

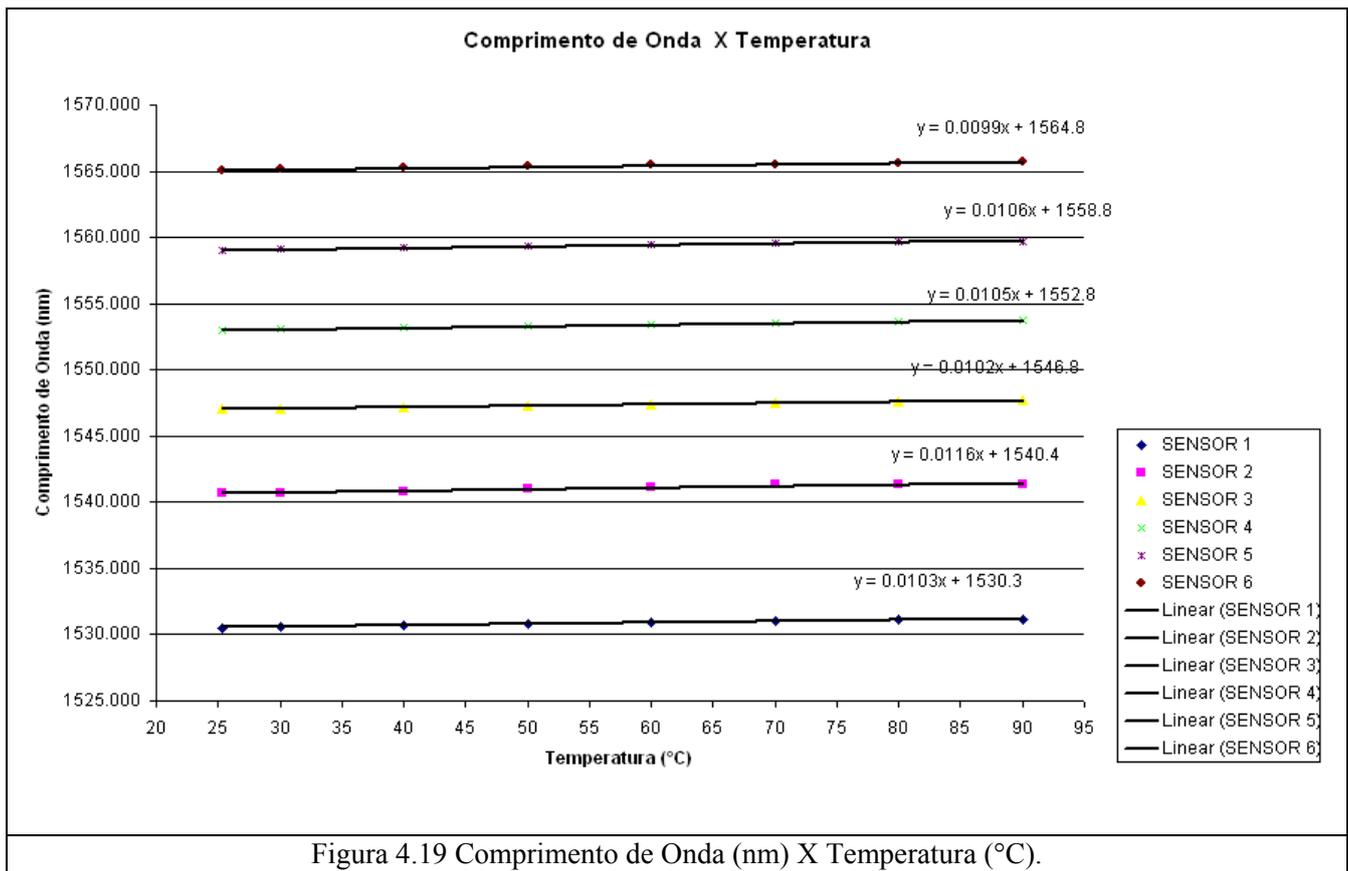
Através da calibração será possível atribuir os valores de sensibilidade ($\text{pm}/^\circ\text{C}$) dos sensores para a utilização do interrogador óptico. Ela consiste no estudo dos dados espectrais dos seis sensores quando submetidos à temperatura de 25°C e suas respectivas funções, para a obtenção dos valores da sensibilidade.

A Tabela 4.2 apresenta os dados espectrais dos sensores submetidos à variação térmica, suas respectivas funções e a sensibilidade.

Tabela 4.2 Dados espectrais dos sensores com suas funções e sensibilidade

Temperatura	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6
25.3	1530.534	1540.667	1547.027	1553.035	1559.063	1565.090
30.00	1530.605	1540.736	1547.085	1553.090	1559.121	1565.145
40.00	1530.724	1540.855	1547.181	1553.200	1559.219	1565.236
50.00	1530.849	1541.019	1547.302	1553.300	1559.341	1565.350
60.00	1530.947	1541.135	1547.390	1553.399	1559.426	1565.457
70.00	1531.040	1541.307	1547.511	1553.533	1559.596	1565.549
80.00	1531.141	1541.337	1547.584	1553.605	1559.644	1565.643
90.00	1531.190	1541.360	1547.688	1553.715	1559.730	1565.723
Função	$y = 0,0103x + 1530,3$	$y = 0,0116x + 1540,4$	$y = 0,0102x + 1546,8$	$y = 0,0105x + 1552,8$	$y = 0,0106x + 1558,8$	$y = 0,0098x + 1564,9$
Derivada $\text{nm}/^\circ\text{C}$	0.0103	0.0116	0.0102	0.0105	0.0106	0.0098
Derivada $\text{pm}/^\circ\text{C}$	10.3	11.6	10.2	10.5	10.6	9.8

A Figura 4.19 mostra o gráfico comprimento de onda (nm) em função da temperatura ($^\circ\text{C}$) a partir dos dados da Tabela 4.2.



A Tabela 4.3 resume a informação adquirida. Note que as sensibilidades diferem dos valores obtidos com a calibração. Isto se deve ao fato dos valores aplicados dos coeficientes de expansão térmica (α) e termo-óptico (η) a partir da literatura adotada.

Tabela 4.3 Sensibilidades teórica e medida de cada sensor

Sensor #	Sensibilidade Teórica (pm/°C)	Sensibilidade Medida (pm/°C)	Comprimento de Onda @ 25°C (nm)
1	14.00	10,3	1530,534
2	14.10	11,6	1540,667
3	14.16	10,2	1547,027
4	14.21	10,5	1553,035
5	14.27	10,6	1559,063
6	14.32	9,9	1565,090

A Figura 4.20 mostra a interface gráfica do software do interrogador óptico (SpectralEye-400), onde os dados devem ser inseridos, na tela “Temperature”.

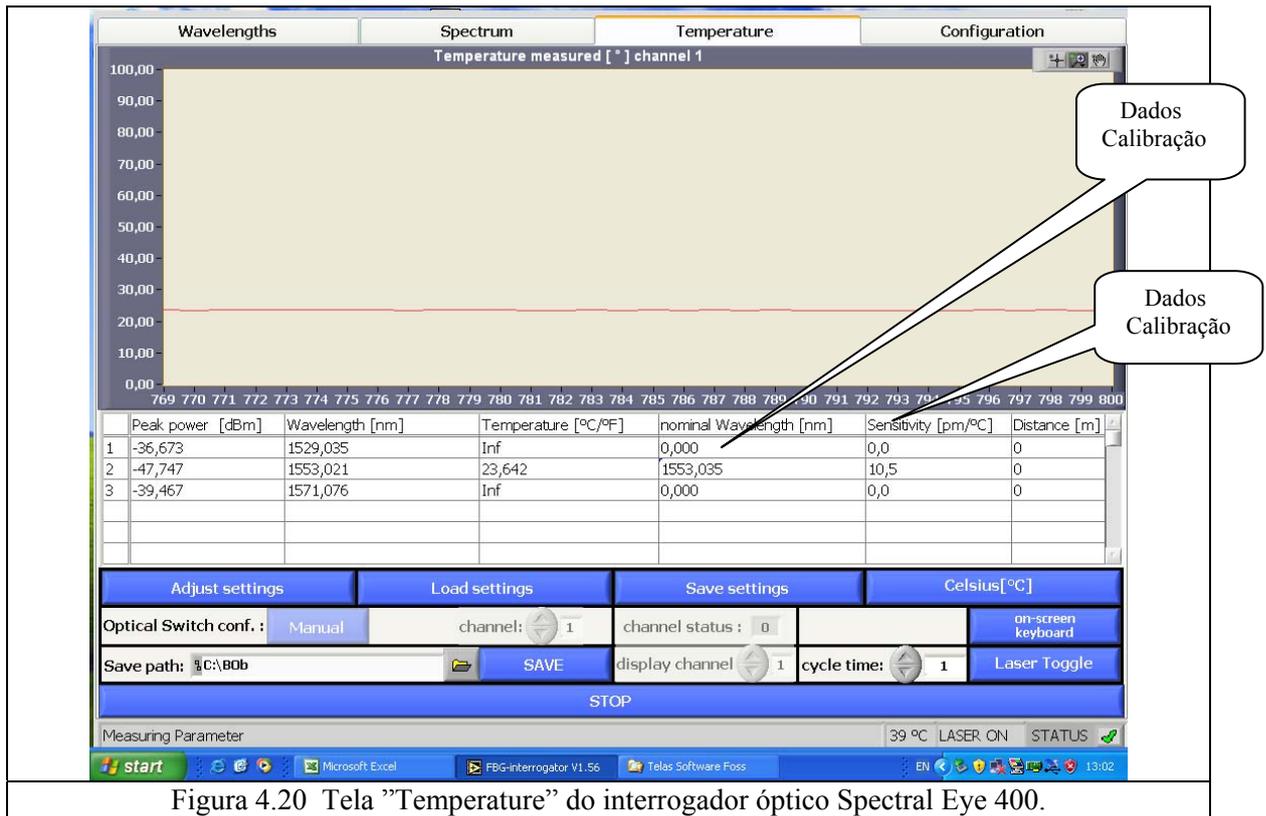


Figura 4.20 Tela "Temperature" do interrogador óptico Spectral Eye 400.

Vale mencionar que a coluna "Comprimento de onda (nm)" é referente ao comprimento de onda variável em função da temperatura e a coluna "Comprimento de onda nominal (nm)" é referente ao comprimento de onda referência (25 °C).

4.4. Desenvolvimento de hardware

Neste item é mostrado o hardware eletrônico responsável pela aquisição e conversão dos sinais ópticos.

Primeiramente, na Figura 4.21 é mostrado o hardware eletrônico com o protótipo do transdutor.



Figura 4.21 Hardware eletrônico com o protótipo do transdutor.

Nas Figuras 4.22 e 4.23 são mostrados o protótipo do transdutor e a vista interna em detalhe, respectivamente. O protótipo consiste de tubo de cobre, elemento sensor de FBG, borracha de vedação, prensa cabo e caixa de proteção IP65.

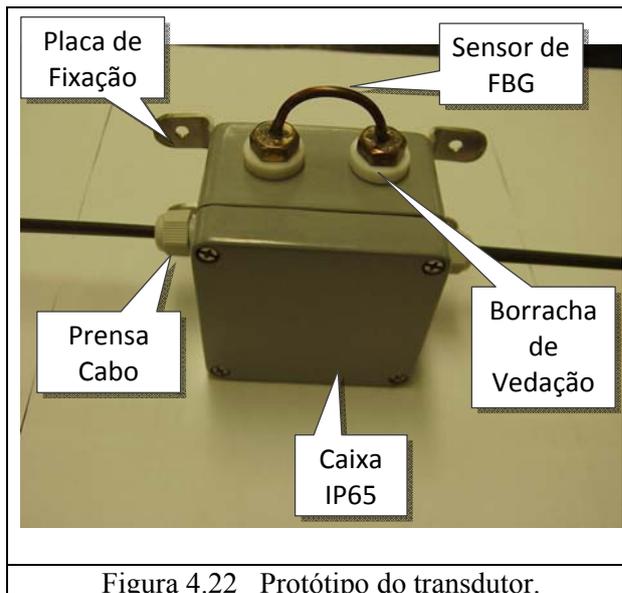


Figura 4.22 Protótipo do transdutor.

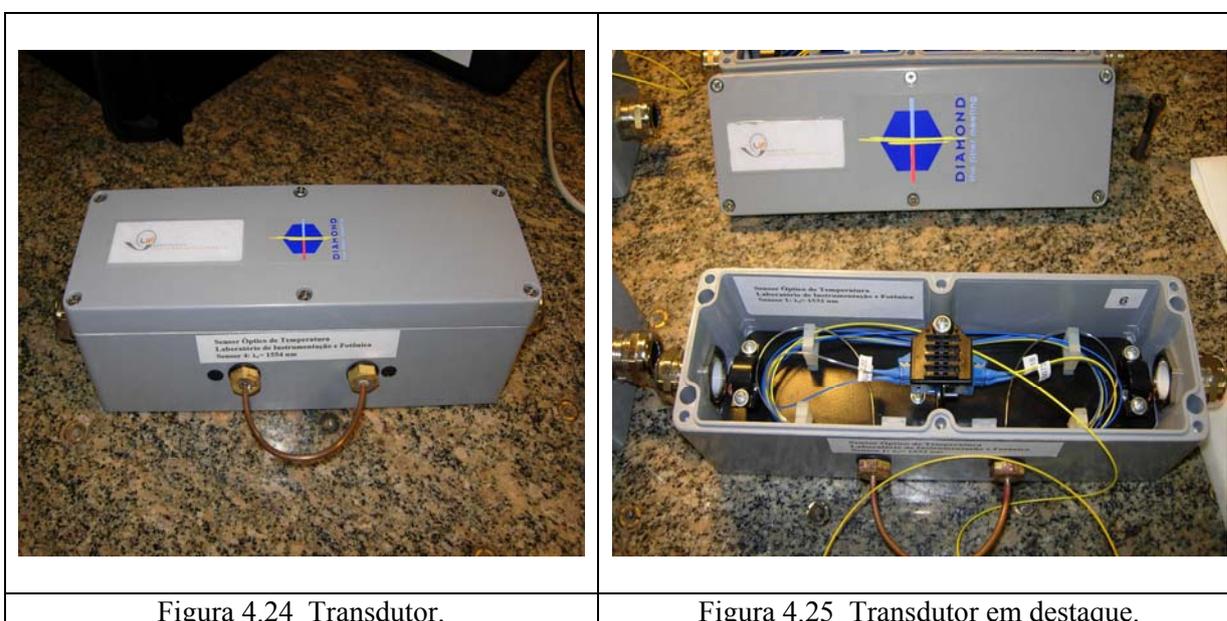


Figura 4.23 Protótipo do transdutor em detalhe.

Entretanto, observamos a não praticidade do transdutor em caso de reparo, face o tamanho reduzido disponível para a realização de emenda e em se tratar de uma aplicação em local extremamente hostil.

Desta forma, otimizamos o transdutor visando obter maior facilidade tanto no ato da instalação, como também em situações de reparo.

As Figuras 4.24 e 4.25 mostram o transdutor adotado para instalação, que consiste de tubo de cobre, elemento sensor de FBG conectorizado, pigtails (azul e amarelo), adaptador (F3000-PC), borracha de vedação, prensa cabo, alocador de emenda e caixa de proteção IP65.



4.5. Instalação em campo

Este item apresenta as etapas realizadas para a instalação em campo dos sensores na UHE de Samuel.

4.5.1. Usina Hidroelétrica de Samuel

A UHE Samuel situa-se na latitude $8^{\circ}45'09.83''S$ e longitude $63^{\circ}27'16.83''W$, no rio Jamari, afluente da margem direita do rio Madeira, no estado de Rondônia, distando 52 km da cidade de Porto Velho, pela rodovia BR-364 (Porto Velho-Cuiabá). O reservatório estende-se desde a localidade de Cachoeira de Samuel no município de Candeia do Jamari, até as proximidades da foz do rio Branco, no município de

Ariquemes, ou Jamari. Sua construção foi iniciada em 1982 pela Eletronorte e sua operação comercial teve início em 1989.

A capacidade máxima de geração é de 216 MW, destinando-se a abastecer o mercado de energia elétrica do Sistema Acre-Rondônia-Cuiabá-Araraquara. A UHE Samuel tem cinco máquinas de 43,2 MW, cada uma gerando energia em barra dupla de 230 kV. A subestação é desassistida, mas a usina é assistida com equipes de operadores próprias, obedecendo turno de 6 horas. A Figura 4.26 mostra uma fotografia do lago e da represa da UHE Samuel.



Figura 4.26 Usina Hidroelétrica de Samuel.

A Figura 4.27 apresenta as principais características dessa usina.



Figura 4.27 Principais características da UHE Samuel.

As Figuras 4.28 e 4.29 mostram a Sala de Máquinas em destaque e a Máquina 5 desmontada, respectivamente.



Figura 4.28 Sala de Máquinas em destaque.



Figura 4.29 Máquina 5 desmontada.

As Figuras 4.30 e 4.31 apresentam o sistema completo da UHE e quadro descritivo dos sistemas e seus equipamentos, respectivamente.



Figura 4.30 Sistema completo da usina.

Regional de Produção e Comercialização de Rondônia – CRD Divisão de Geração Hidráulica - CRDH							
SISTEMAS “A”	EQUIPAMENTOS	QTD	SISTEMA “B”	QTD	SISTEMA “C”	QTD	
Sistema da Turbina	Turbina hidráulica, mancal combinado, mancal guia da turbina, Sistema de vedação do eixo, sistema do distribuidor, sistema de estabilização	05	Sistema de esgotamento	01			
Sist. de adução e descarga	Comporta da tomada d’água, adução, descarga	05	Sistema água de selagem das turbinas	01			
Sist. de Regul. de Velocidade	Regulador hidráulico, regulador eletrônico	05	Central ar regulação	01			
Transformador de Potência 230 kV	-	05	Central ar serviço	01			
Sist. do Gerador	Gerador elétrico, cubículo de neutro, barramento blindado, cubículo terminal de fase, sistema de frenagem e levantamento, mancal guia do gerador, armário de excitação, armário do transformador de excitação, regulador de tensão.	05	Stop log	02			
Comando/Monitoração /Medição/Proteção	Sistema de proteção, sistema de medição, sistema de controle	05	ETA	01			
Sist. Auxiliares da Unidade	Centro de carga da unidade – CCU, sistema de resfriamento da unidade, disjuntor auxiliar geral – DAG, cubículo do DAG	05	Estrutura civis	01			
Sistema auxiliar de CA da C. Força	Quadros de manobra, centro de carga CA, quadro CA geral barra 1 – CC geral, quadro CA geral barra 2 – CC geral, transformadores auxiliares, geradores diesel de emergência.	01	Sist. cloro gasoso	01			
Sistema auxiliar de CC da C. Força	Centro de carga CC, retificadores, bancos de baterias	01	Rede elétrica (iluminação)	02			
			Sist. controle da usina	01			
			Sist. Ponte rolante	02			
			Sist. Pórtico rolante	02			
			Sist. Anti-incêndio – água	01			
			ETE	01			
			Sist.ventilação e exaustão	01			
			Sistema de drenagem	02			
			Sistema de refrigeração	02			
			TOTAL	37	23		

CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS E EQUIPAMENTOS

Figura 4.31 Quadro descritivo dos sistemas e seus respectivos equipamentos.

4.5.2. Etapas da instalação

A primeira etapa foi realizada através de uma visita técnica para a análise do local, visando definir a localização dos sensores de temperatura ao longo do perímetro interno do gerador da Máquina 5, a localização da unidade de controle (interrogador óptico) do sistema e o caminho a ser percorrido pelo cabo de fibra óptica para interligar os sensores até a Unidade de Controle Local (QLC).

Com o estudo do local foi observado que o rotor age como uma bomba centrífuga e força o ar do seu interior a atravessar os orifícios de refrigeração do estator (Figura 4.32). Esse ar circula pelo espaço vazio que existe ao redor do estator e acaba atravessando o radiador ou trocador de calor que é resfriado por água fria. Ao sair do radiador o ar circunda pela área externa da máquina (*hall*) e entra novamente dentro do rotor atravessando a grade do chão do *hall* (vide Figura 4.34). Os radiadores (Figura 4.33) estavam fora de seus locais de operação (Figura 4.34) e assim foi possível verificar que dentro do espaço de circulação de ar haviam apenas dois sensores de temperatura tipo termopar (Figura 4.35). Estes sensores medem a temperatura do ar quente e possibilitam o alarme e desligamento (*trip, shut-down*) da máquina. Os medidores de ar “frio” estão localizados na parede externa da área que circunda o estator (Figura 4.36). Estes dois tipos de sensores estão configurados de acordo com a Tabela 4.4, onde são informados os valores de temperatura em ocasiões de alarme e desligamento.

A Figura 4.37 mostra o acesso para a instalação dos sensores através da janela de inspeção.

Tabela 4.4 Valores de temperatura em situações de alarmes e desligamento

Relé	Descrição	Alarme	Desligamento
26 GAF	Ar de saída dos radiadores	95 °C	NA
26 GAQ	Ar de entrada dos radiadores	80 °C	85 °C

A temperatura média do ar de uma máquina em operação é de aproximadamente 40 °C (ar frio) e 66 °C (ar quente).

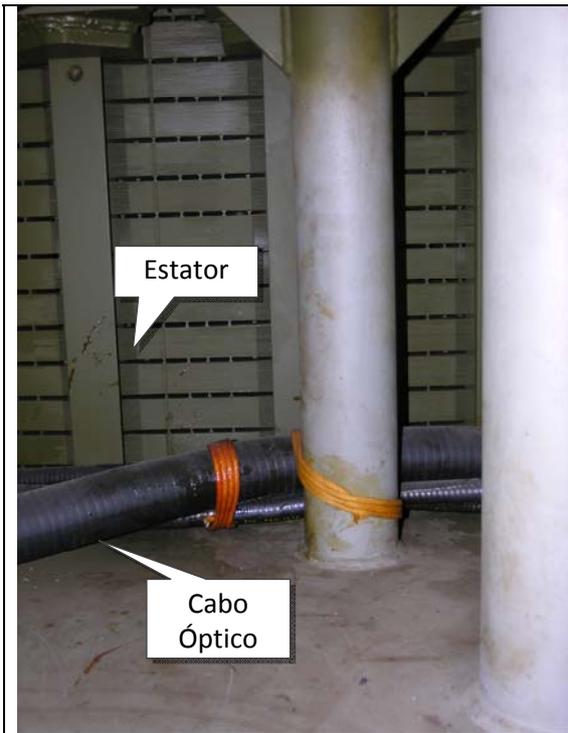


Figura 4.32 Orifícios de ventilação no estator.



Figura 4.33 Radiadores.



Figura 4.34 Local de instalação dos radiadores.

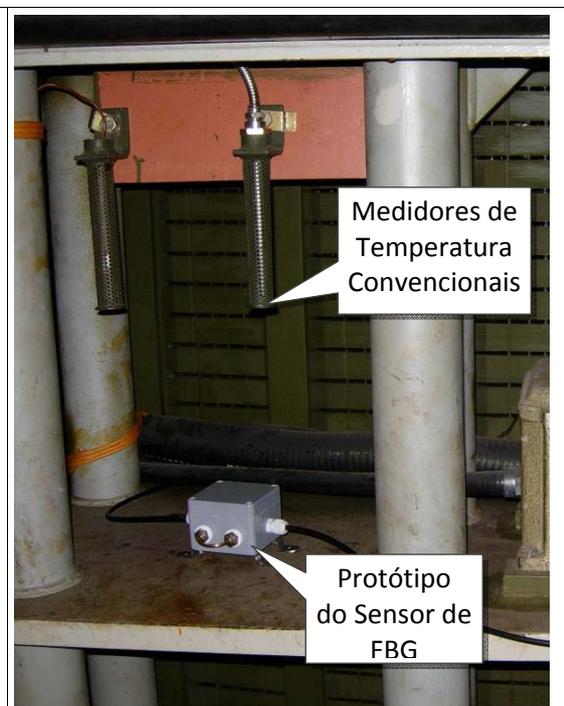


Figura 4.35 Sensores de temperatura existente (termopar) e o protótipo.



Figura 4.36 Sensores de temperatura para o ar frio que já passou pelos radiadores.



Figura 4.37 Janelas de inspeção.

Após o estudo do local foram definidos o número de sensores a serem instalados, o local de instalação dos sensores e do sistema para a medida e monitoramento de temperatura.

Desta forma, ficou estabelecido que seriam instalados seis sensores ópticos dentro do espaço externo que circunda o estator, ou seja, cada sensor ficou atrás de cada janela de inspeção (Figura 4.37) localizada à direita de cada um dos radiadores.

Os sensores foram fixados junto ao teto do compartimento dentro das janelas de inspeção por uma placa em forma de “L”.

O cabo de fibra óptica foi instalado na Máquina 5 antes da reinstalação dos radiadores. Foi previsto deixar uma folga de três metros no cabo óptico instalado, visando facilitar a emenda das fibras ópticas do cabo com os sensores.

O cabo óptico, depois de circundar a Máquina 5 foi direcionado para o QLC da Máquina 3. Este local foi escolhido por estar centralizado e poder receber, futuramente, os cabos de fibra óptica das outras máquinas, quando o sistema de medida de temperatura puder ser ampliado.

A Unidade de Controle do Sistema de Medição de Temperatura a Fibra Óptica foi instalado em um dos *racks* do QLC da Máquina 3.

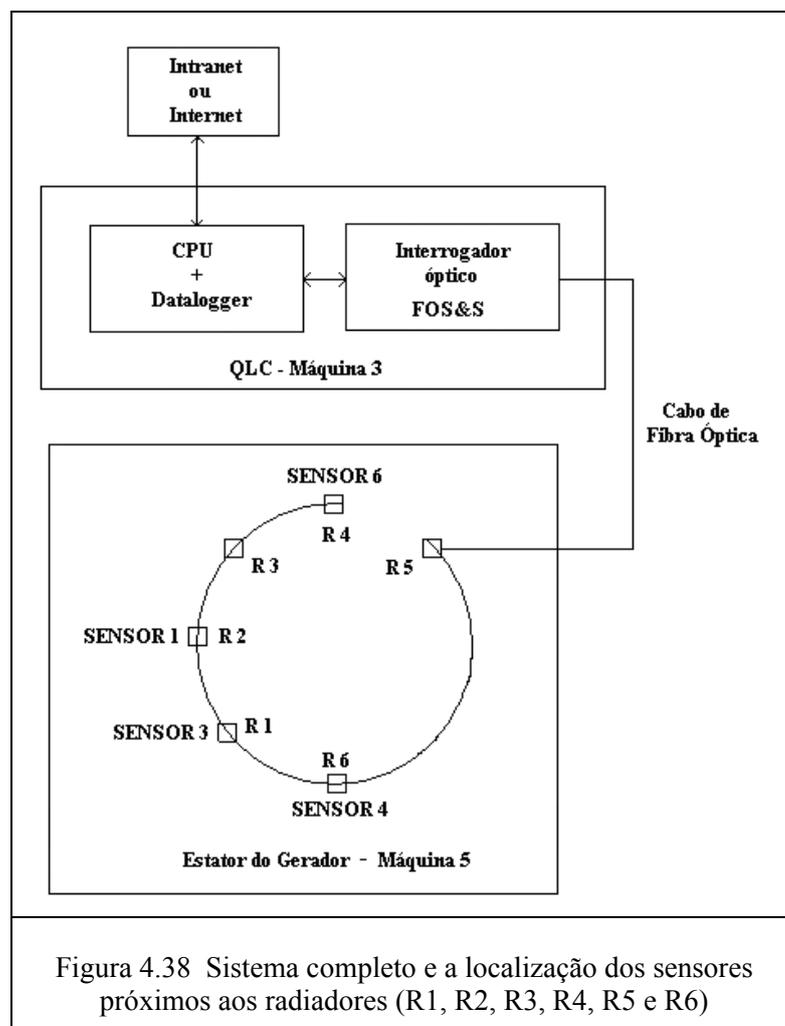
A instalação em campo se deu em duas etapas. A primeira foi iniciada em novembro de 2008 através da instalação de quatro sensores de FBG conectorizados.

A instalação do primeiro sensor iniciou-se com a abertura da placa da janela de inspeção nº3, localizada próxima ao Radiador 4 para a instalação do Sensor 6, onde se encontrava uma extremidade do cabo óptico.

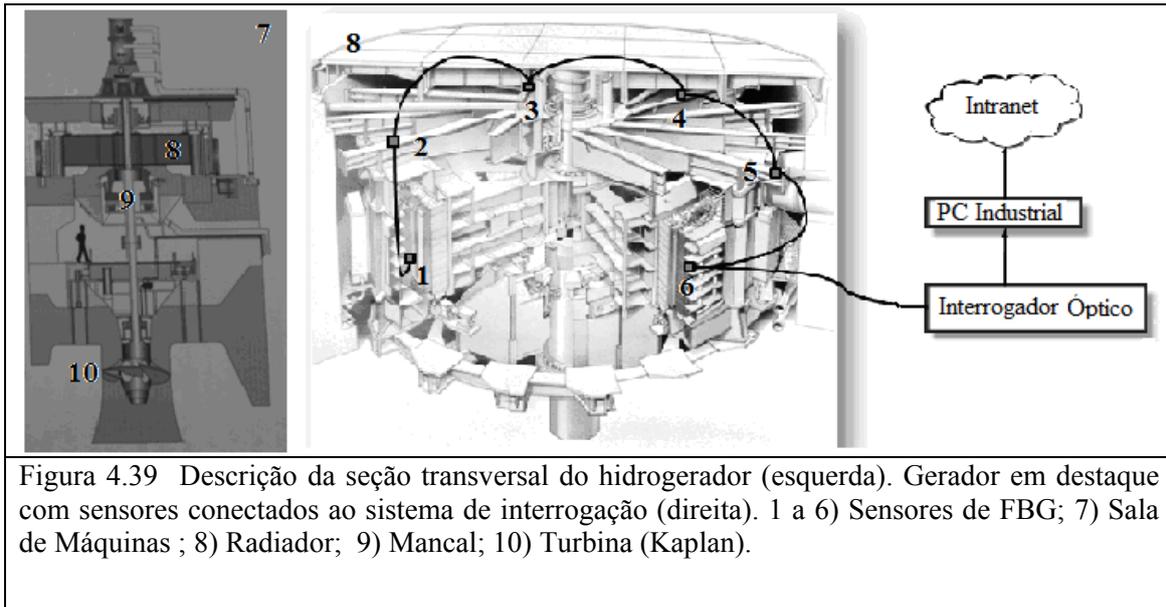
Em seguida, iniciou-se a preparação do cabo óptico para a realização das emendas interligando todos os sensores.

Posteriormente, foi realizada a instalação do micro computador e o interrogador óptico através da outra extremidade do cabo óptico, localizado no Radiador 5, onde o mesmo foi puxado até o QLC da máquina 3.

A Figura 4.38 mostra o esquema do sistema completo e a localização dos sensores de FBG em relação aos radiadores.



A Figura 4.39 mostra detalhes de um hidrogerador.



A Tabela 4.5 mostra a posição dos sensores em relação aos radiadores. Vale mencionar que no ato da instalação, devido aos problemas com os conectores F-3000/PC utilizados em dois sensores, foram instalados apenas quatro sensores de FBG.

Tabela 4.5 Posição dos sensores em relação aos radiadores

SENSOR	RADIADOR
1	2
3	1
4	6
6	4

Uma vez, tendo sido instalado a unidade de controle do sistema através do interrogador óptico, a próxima etapa foi a instalação do *software*. No Anexo 5 está incluído todos os procedimentos sobre a instalação do software.

A Tabela 4.6 apresenta a Tabela de Calibração a ser adotada.

Tabela 4.6 Tabela de calibração

Sensores (λ – nm)	Comprimento de Onda (λ_{BRAGG} – nm em 25°C)	Sensibilidade ($\mu\text{m}/^\circ\text{C}$)
1 - 1531,94	1530,534	10,3
2- 1541,76	1540,667	11,6
3- 1548,38	1547,027	10,2
4- 1554,16	1553,035	10,5
5- 1559,8	1559,063	10,6
6- 1565,90	1565,090	9,8

As Figuras 4.40 e 4.41 apresentam a Tela “Spectrum” do interrogador óptico com a identificação e o reconhecimento do Sensor 4 e do Sensor 1, respectivamente, no teste realizado em campo.

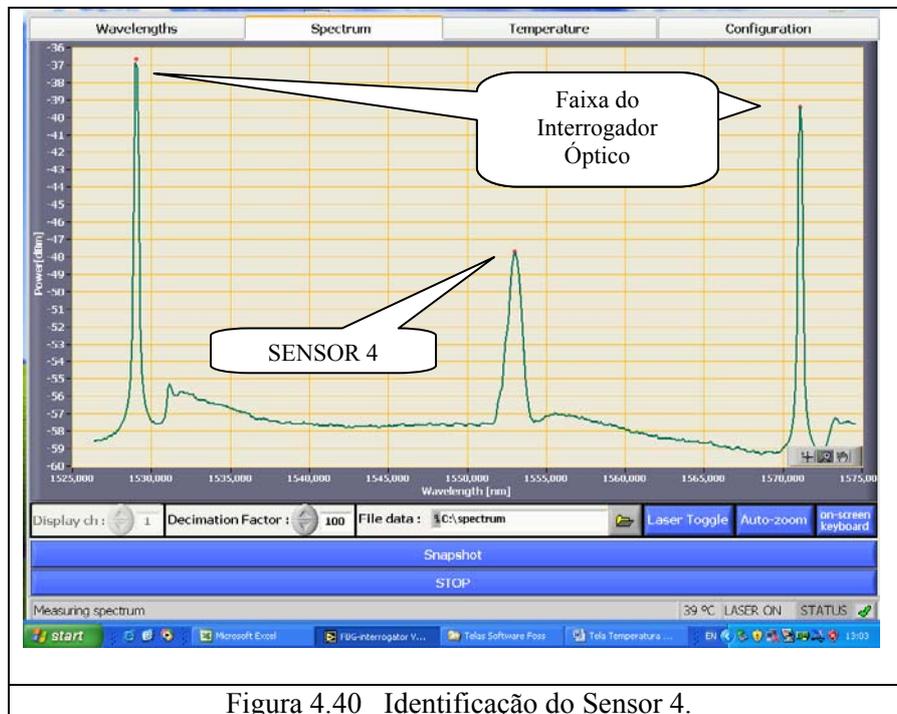


Figura 4.40 Identificação do Sensor 4.

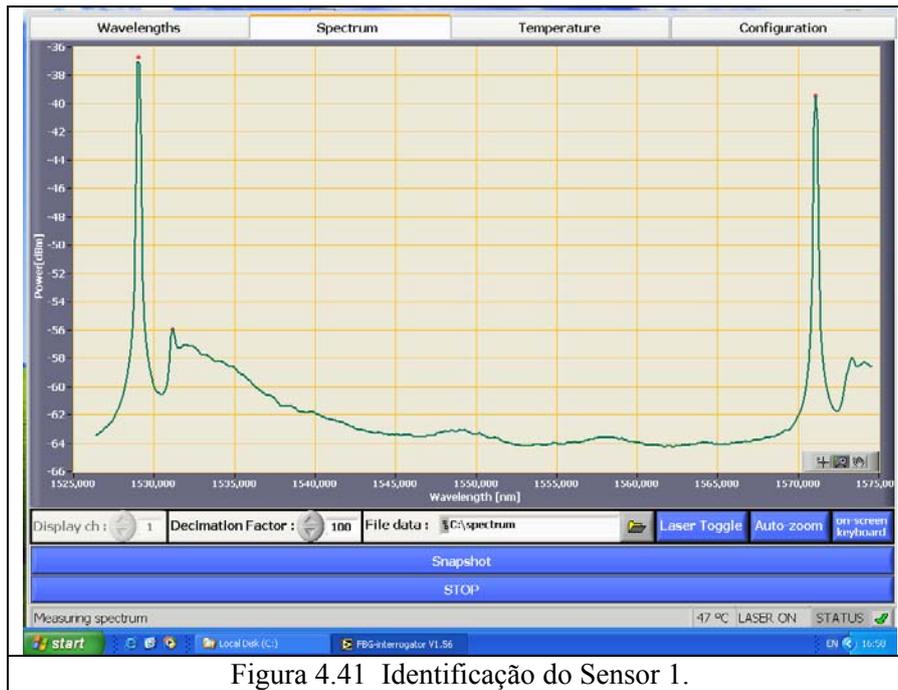


Figura 4.41 Identificação do Sensor 1.

A Figura 4.42 mostra um sensor instalado.

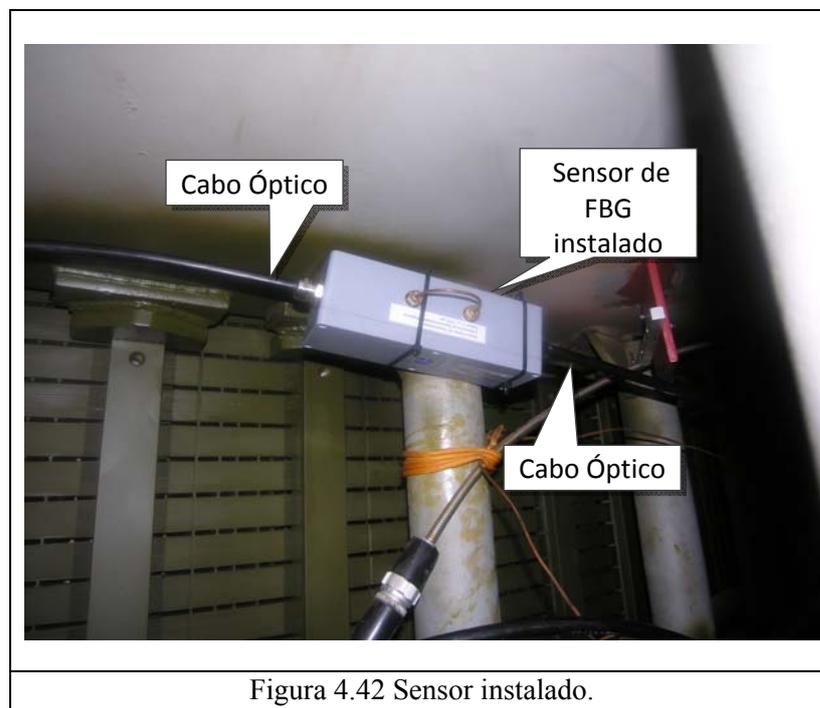


Figura 4.42 Sensor instalado.

Foi observada elevada atenuação óptica nos sensores instalados no intervalo de dois dias.

Um estudo foi realizado para determinação da causa da atenuação óptica, onde foi concluído que a atenuação é proveniente dos conectores ópticos utilizados nos sensores (caixa de proteção) que apresentam defeito de fabricação.

Desta forma, foi necessário retirar os conectores ópticos e emendar os sensores diretamente ao cabo óptico.

A finalização da instalação em campo foi concluída em Novembro de 2008.

O sistema óptico completo consiste de quatro sensores ópticos que medem a temperatura do ar quente junto à entrada do radiador. Os sensores são interligados por fibra óptica, através de emenda por fusão e instalados no interior do estator da Máquina 5. Depois de interligar os sensores que circundam o gerador, o cabo óptico é direcionado para um rack no QLC da Máquina 3, onde as temperaturas são monitoradas e disponibilizadas na Intranet. Desta forma, os técnicos operacionais podem acessar essas temperaturas a partir da Sala de Controle ou de qualquer Regional da Empresa.

Na segunda intervenção (um ano após a primeira etapa) foi observado que os comprimentos de onda centrais de Bragg dos sensores estavam diferenciados dos valores apresentados na primeira etapa da instalação. Podemos justificar, pelo fato dos sensores terem sido submetidos a uma temperatura de aproximadamente de 80 °C por cerca de um ano.

Foi realizada a nova calibração calculada pelo algoritmo do sistema de interrogação adotado (FOS&S):

$$\text{Lambda}_{\text{Ref}} = \text{Lambda}_{\text{Atual}} + (25 - T) \times S / 1000 \quad (27)$$

Onde, T é temperatura e S é a Sensibilidade.

A Tabela 4.7 apresenta os novos dados da calibração dos quatro sensores para a temperatura de 31,5 °C, para a inclusão dos dados no software (V1.56) referentes ao Comprimento de Onda Ref. (“*Nominal Wavelength*”) e “*Sensitivity*”.

Tabela 4.7 Dados da calibração dos sensores para 31,5 °C

Sensores (λ – nm)	Comprimento de Onda Atual (nm)	Comprimento de Onda Ref. (nm)	Sensibilidade (pm/°C)
1 - 1531,94	1530,662	1530,595	10,3
3 - 1548,38	1547,146	1547,080	10,2
4 - 1554,16	1553,05	1552,982	10,5
6 - 1565,90	1565,078	1565,014	9,8

As Figuras 4.43, 4.44, 4.45 e 4.46 mostram a conclusão da instalação final dos sensores.



Figura 4.43 Abertura da janela de inspeção.



Figura 4.44 Retirada do sensor.



Figura 4.45 Realização de emenda dos sensores.



Figura 4.46 Sensor reinstalado no gerador.

As Figuras 4.47 e 4.48 mostram os sensores identificados pelo sistema de interrogação (FOS&S) e o sistema de monitoramento instalado no QLC da Máquina 3, respectivamente.

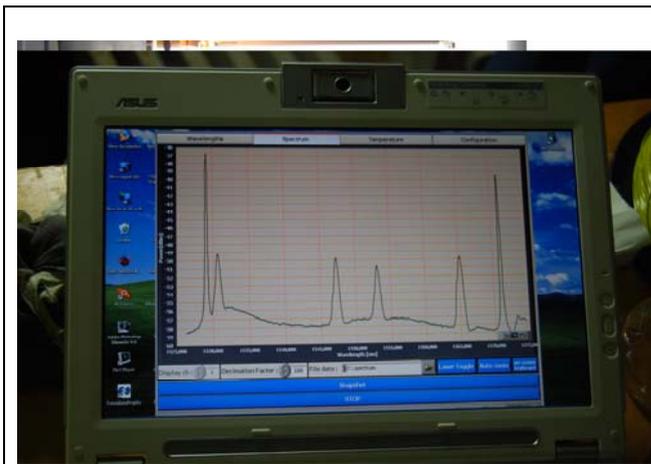


Figura 4.47 Quatro sensores identificados pelo sistema de interrogação.

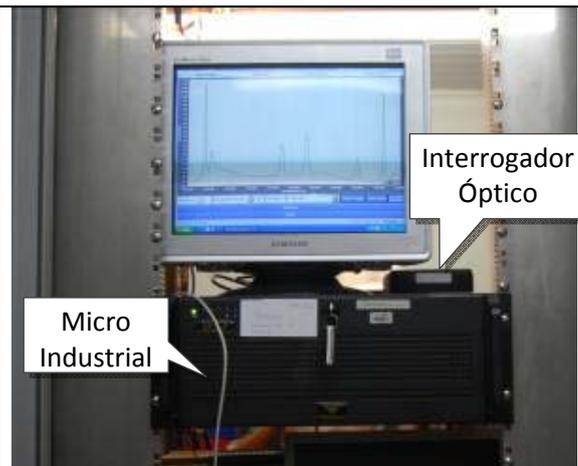


Figura 4.48 Sistema de monitoramento instalado no QLC da Máquina 3.

4.6. Resultados e discussão do sensor de temperatura

Este item apresenta os resultados obtidos na medida e monitoramento da temperatura dos radiadores do gerador da Máquina 5.

Imediatamente depois da instalação o sistema iniciou o monitoramento das temperaturas. A Figura 4.49 mostra o resultado da medida dos sensores com a máquina parada.

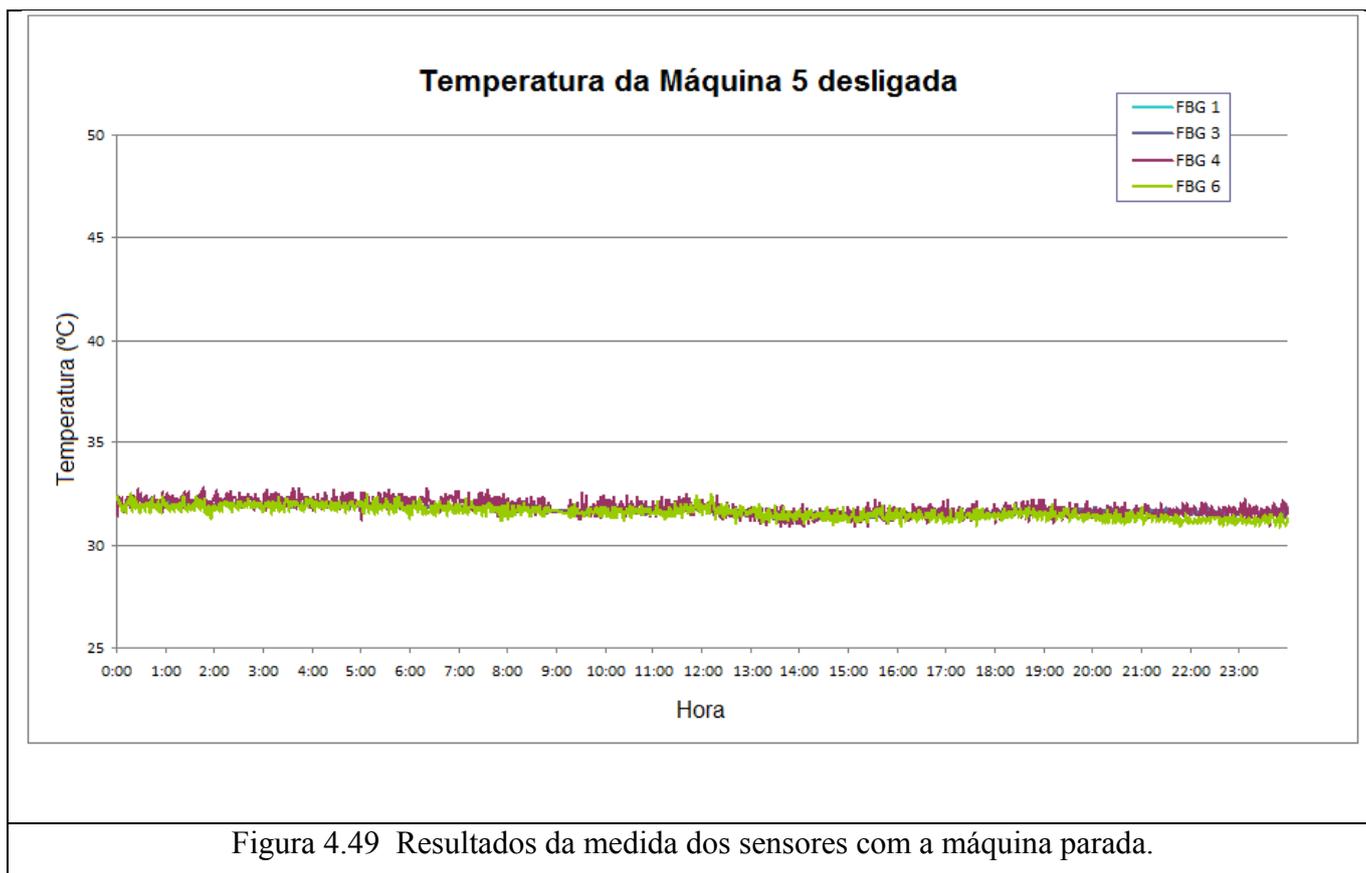


Figura 4.49 Resultados da medida dos sensores com a máquina parada.

Posteriormente a máquina foi ligada e desligada várias vezes. A Figura 4.50 apresenta o resultado da evolução da temperatura dos sensores durante a partida da Máquina 5. Note que as temperaturas dos radiadores permanecem diferentes antes da partida da máquina. Isso ocorre porque a máquina já estava trabalhando com diferentes temperaturas ao redor do estator. Às 9 horas a máquina deu início ao seu funcionamento. A temperatura do Sensor 3 subiu cerca de 35 °C a 85 °C, enquanto a turbina acelerou em torno de 90 rpm até entrar em fase com a frequência da rede (60 Hz). Então em seis horas o gerador foi ligado a rede elétrica nacional e a temperatura voltou a subir até 95 °C, estabilizando em seguida.

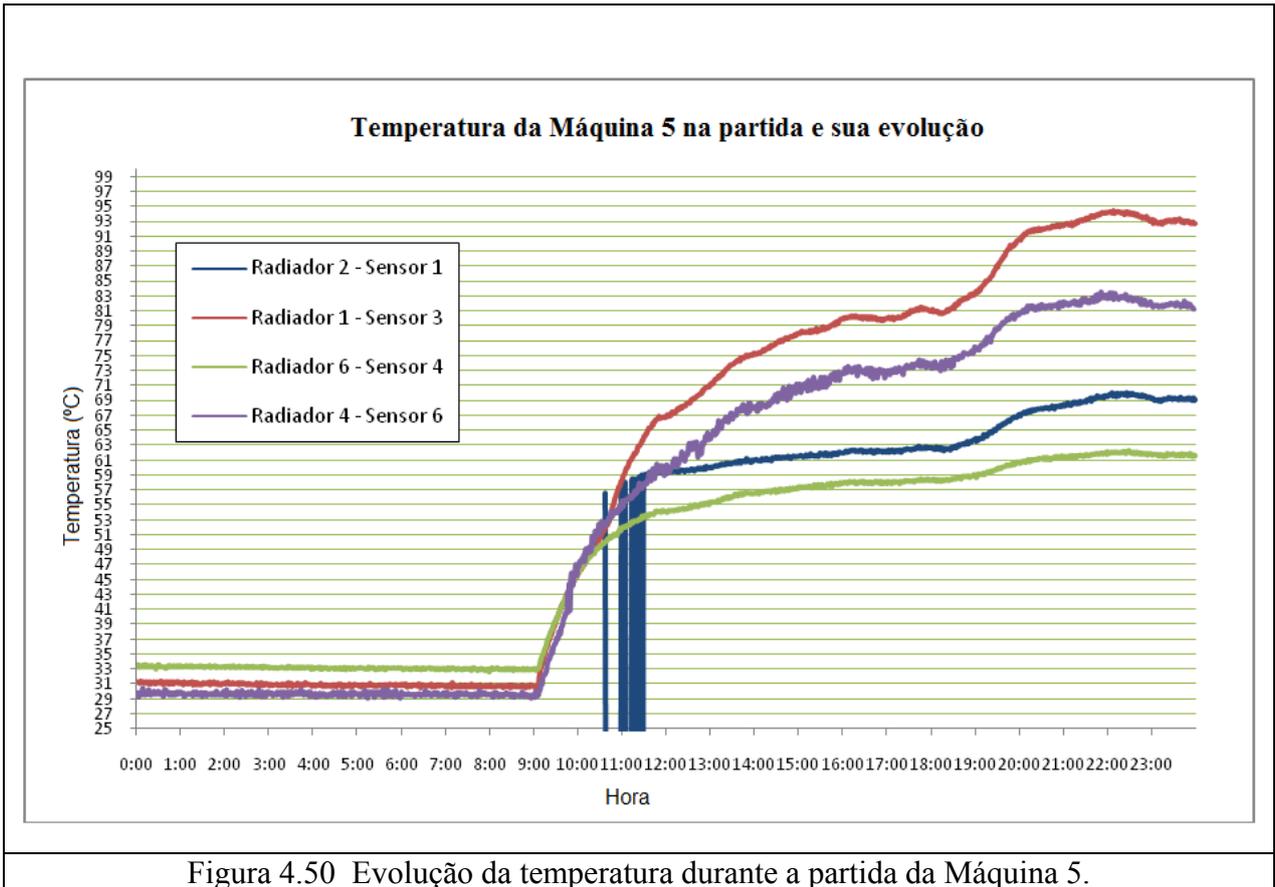


Figura 4.50 Evolução da temperatura durante a partida da Máquina 5.

A Figura 4.51 mostra a evolução da temperatura do gerador em funcionamento normal. Neste momento o gerador estava produzindo 22 MW com um fluxo médio de água de 82 m³/s. Podemos observar durante a operação a sobre carga do Sensor 2, excedendo a temperatura de 100 °C.

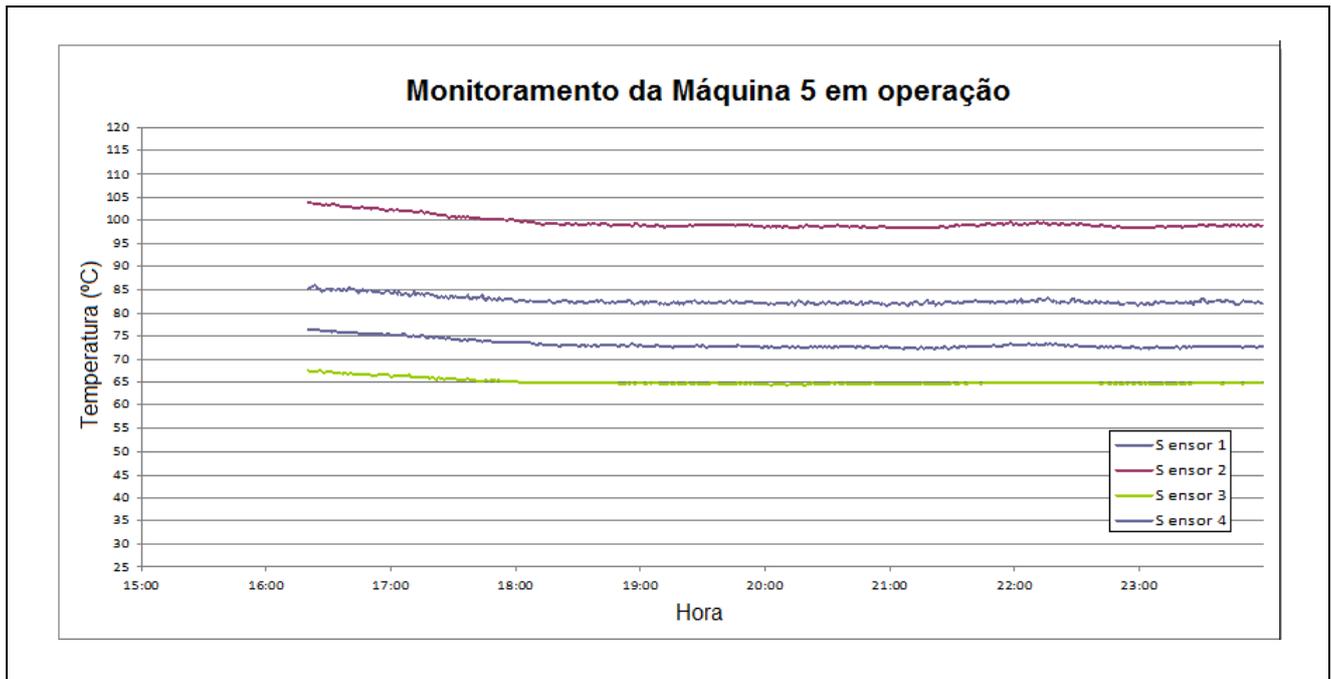


Figura 4.51 Evolução da temperatura da máquina durante a operação com sobre carga do Sensor 2.

Como na Figura 4.50, podemos observar também na Figura 4.51 a diferença de temperatura entre as diferentes seções do gerador. Podemos justificar, pelo fato do estator não ter sido construído através de um único tipo de material, além do local também possuir elevado campo magnético nos distintos pontos que circundam o estator. Portanto, cada seção do estator apresenta temperaturas diferentes, levando ao comportamento observado nas Figuras 4.50 e 4.51.

A Figura 4.52 apresenta a evolução da temperatura da máquina durante a operação sem sobre carga.

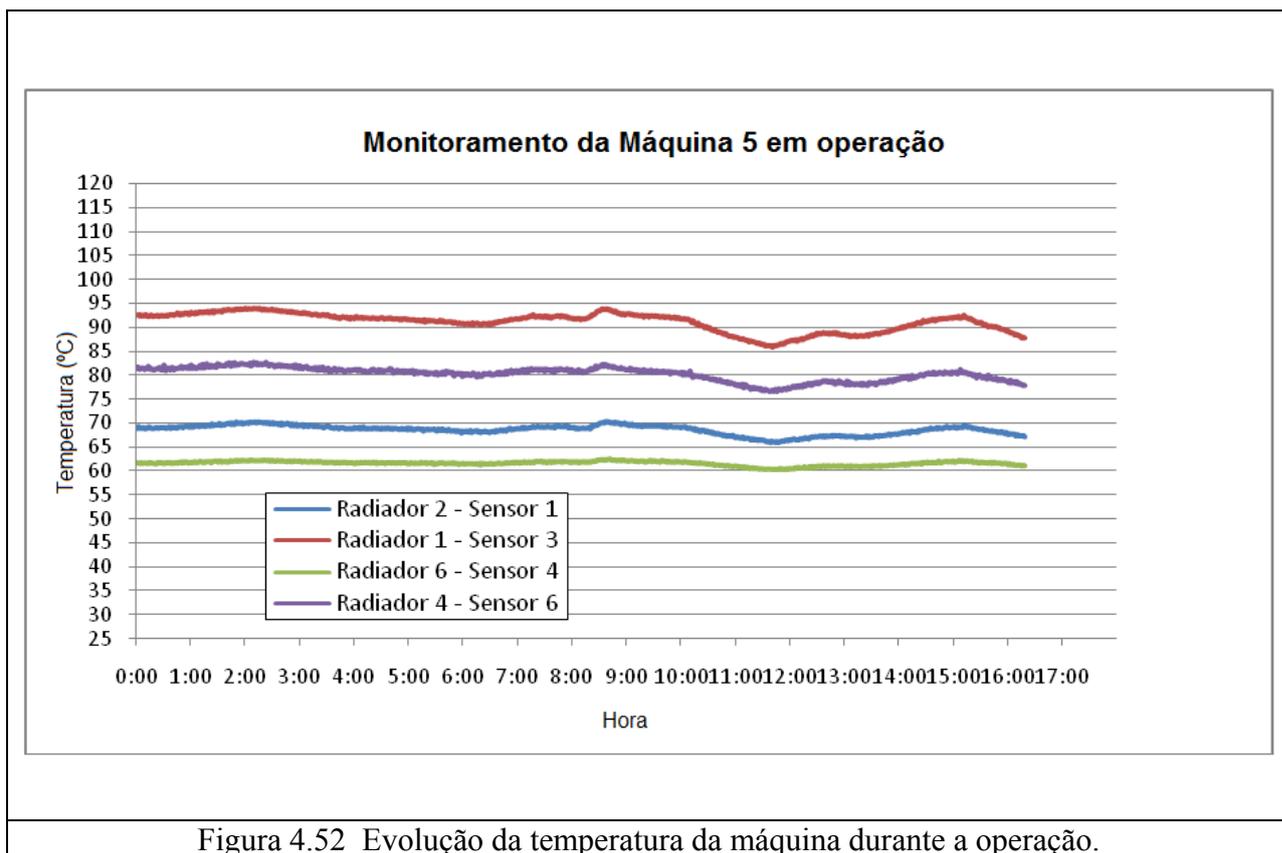


Figura 4.52 Evolução da temperatura da máquina durante a operação.

A evolução da temperatura dos sensores pode ser acompanhada pelos operadores através de dois procedimentos:

Pelos arquivos salvos (extensão.txt), que consiste de todas as informações referentes à medida de temperatura relacionada a cada sensor, seus respectivos comprimentos de onda, data e horário, conforme descreve o Manual de Operação do sistema (Anexo 5).

Vale mencionar que esses mesmos arquivos são enviados por e-mail, periodicamente, para o LIF-RJ e para a Regional-Belém, com todas as informações referentes à temperatura de cada sensor, seus respectivos comprimentos de onda, data e horário em que a medida foi realizada.

A Tabela 4.7 mostra o monitoramento das medidas de temperatura dos sensores ópticos. O sistema convencional existente na UHE detectou o *trip* (temperatura acima de 85 °C) e o nosso sistema óptico baseado em FBG também.

Na Tabela 4.7 podemos observar que Sensor 2 (S2) detectou a temperatura máxima obtida, no dia 01/12/08, no período entre 16:20 as 04:41 hs.

Tabela 4.7 Sensor 2 (S2) detectando o *trip*

Data	Hora	SENSORES Comprimento de Onda (nm)				Temperatura (°C)			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
01/12/08	16:20:03	1531,111	1547,902	1553,446	1565,591	76,2	103,6	67,4	85,2
01/12/08	16:22:03	1531,113	1547,904	1553,446	1565,593	76,4	103,7	67,4	85,5
01/12/08	17:05:03	1531,098	1547,886	1553,435	1565,580	75,0	102,0	66,4	84,1
01/12/08	17:19:03	1531,097	1547,880	1553,429	1565,577	74,8	101,4	65,8	83,9
01/12/08	17:27:03	1531,091	1547,875	1553,428	1565,575	74,2	100,9	65,7	83,6
01/12/08	17:55:03	1531,085	1547,867	1553,422	1565,569	73,7	100,2	65,2	83,1
01/12/08	18:21:03	1531,075	1547,856	1553,417	1565,561	72,8	99,1	64,7	82,2
02/12/08	03:31:04	1531,045	1547,814	1553,400	1565,536	69,8	94,9	63,0	79,6
02/12/08	04:41:04	1531,036	1547,802	1553,395	1565,527	69,0	93,8	62,5	78,7

Pode-se observar também o monitoramento da temperatura através da Tela “*Temperature*” do interrogador óptico, que plota as curvas de temperatura de cada sensor, facilitando o monitoramento visual do operador, como pode ser observado na Figura 4.53.

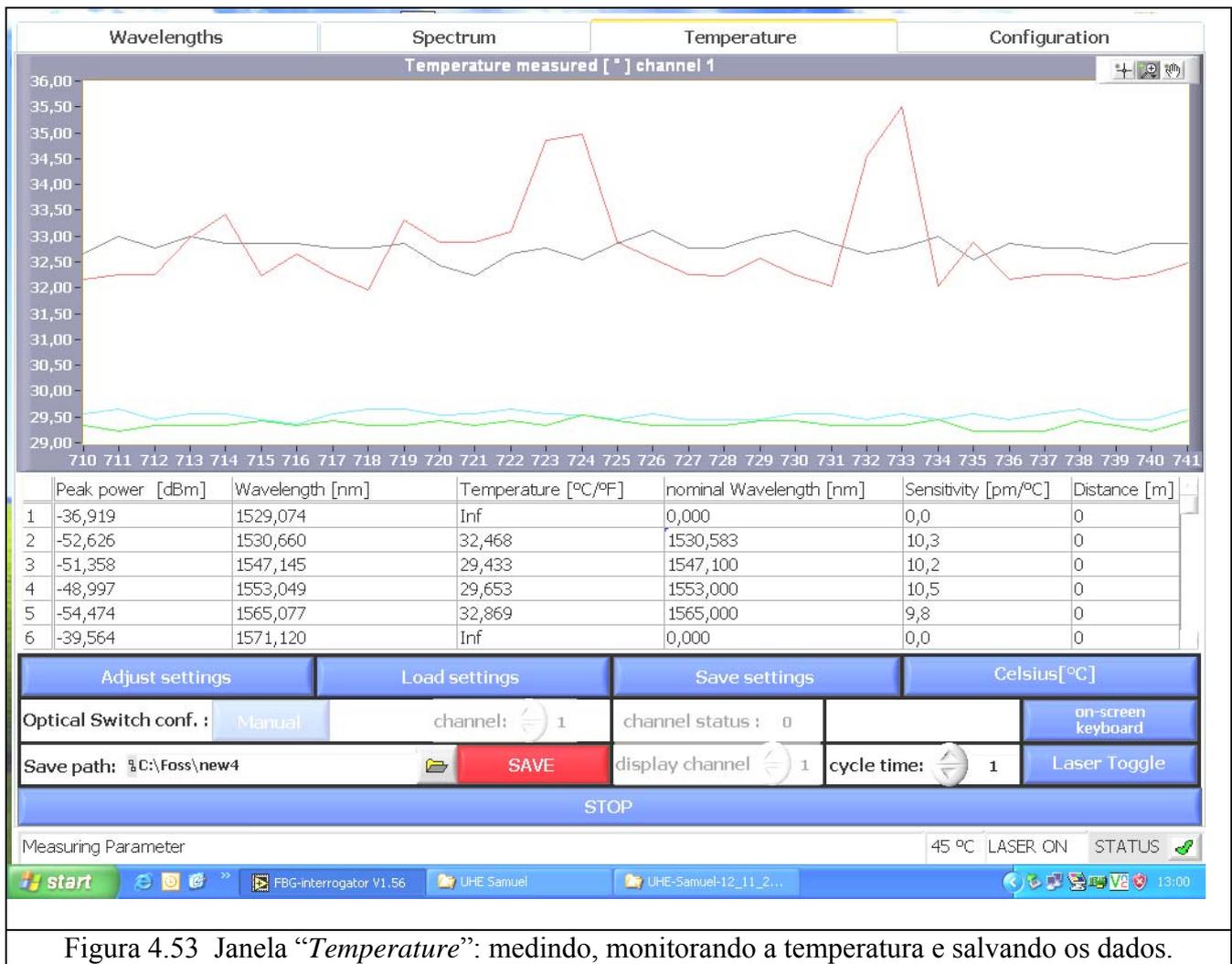
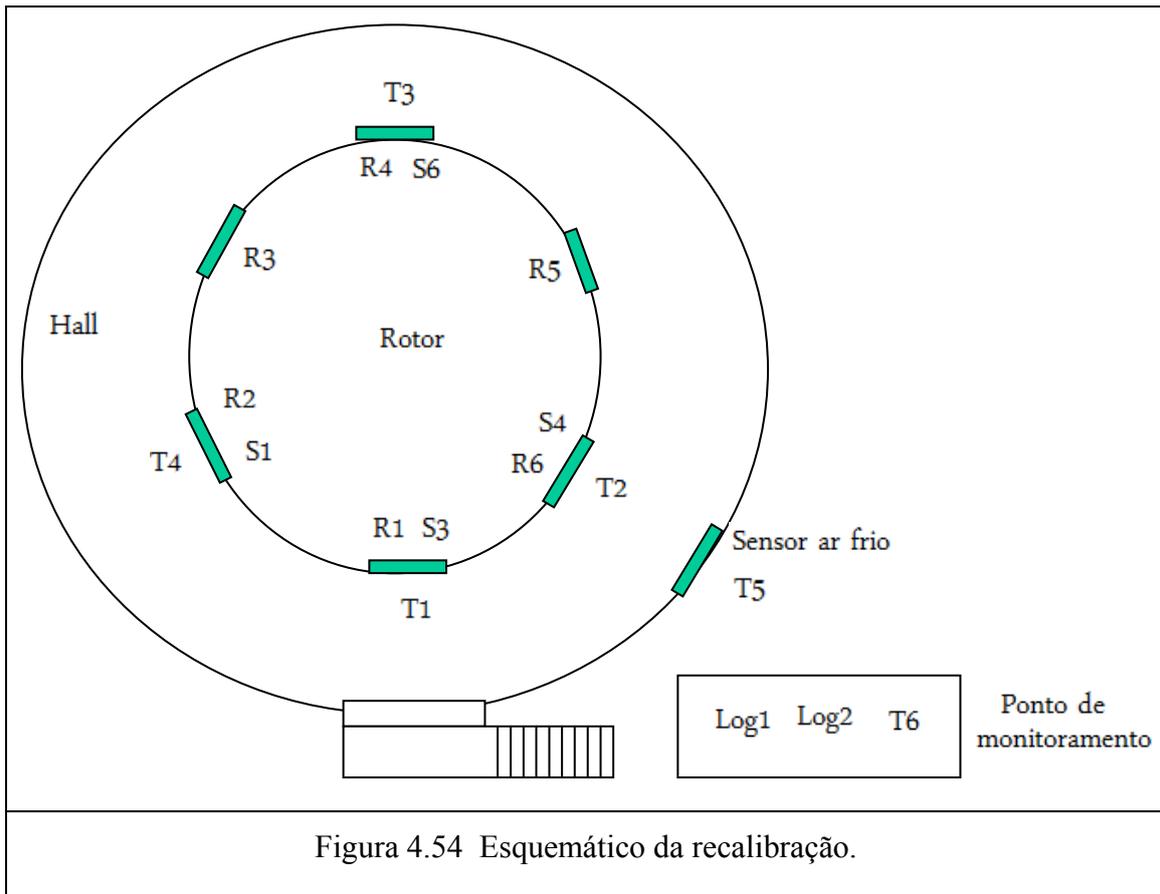


Figura 4.53 Janela “Temperature”: medindo, monitorando a temperatura e salvando os dados.

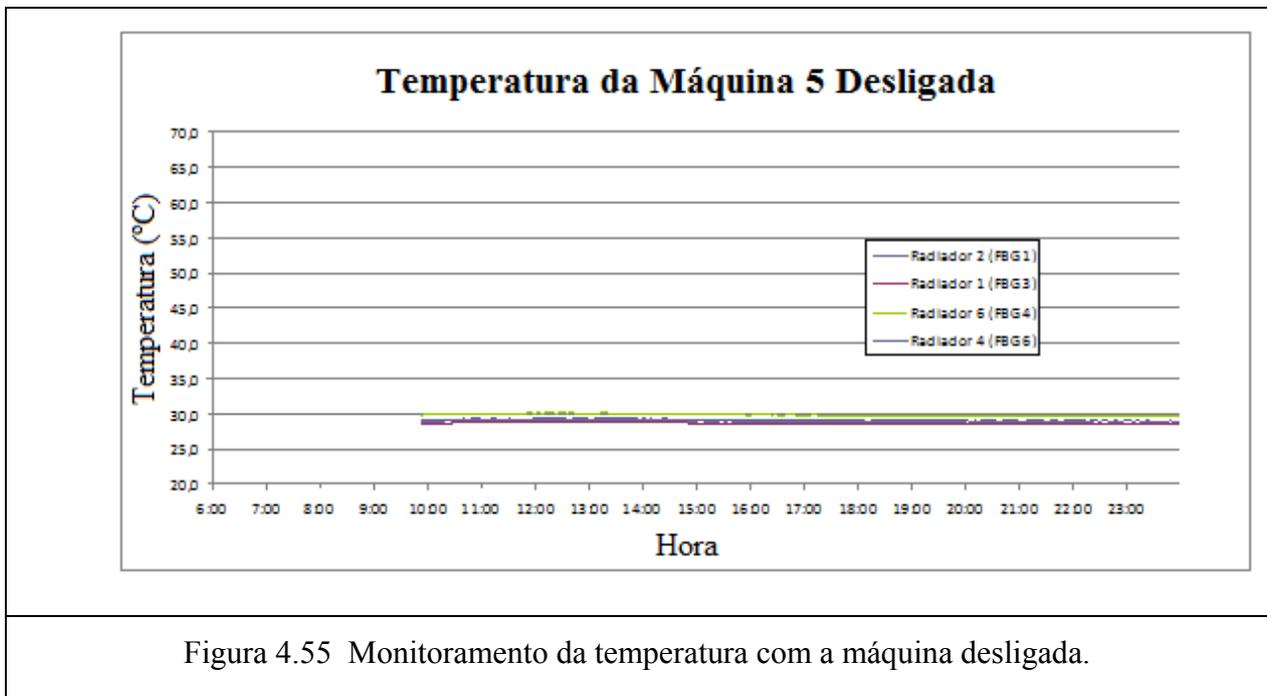
4.7. Recalibração dos sensores

Os sensores foram recalibrados após dois anos. O processo consistiu em colocar sensores calibrados (PT-100) em cada ponto onde estão instalados os sensores de FBG e realizar novas medidas (máquina desligada, dando partida e em evolução) e comparar com os resultados obtidos.

A Figura 4.54 mostra o esquemático da recalibração dos sensores de FBG.



A Figura 4.55 mostra o monitoramento da Máquina desligada.



A Figura 4.56 apresenta a evolução da temperatura na partida da Máquina.

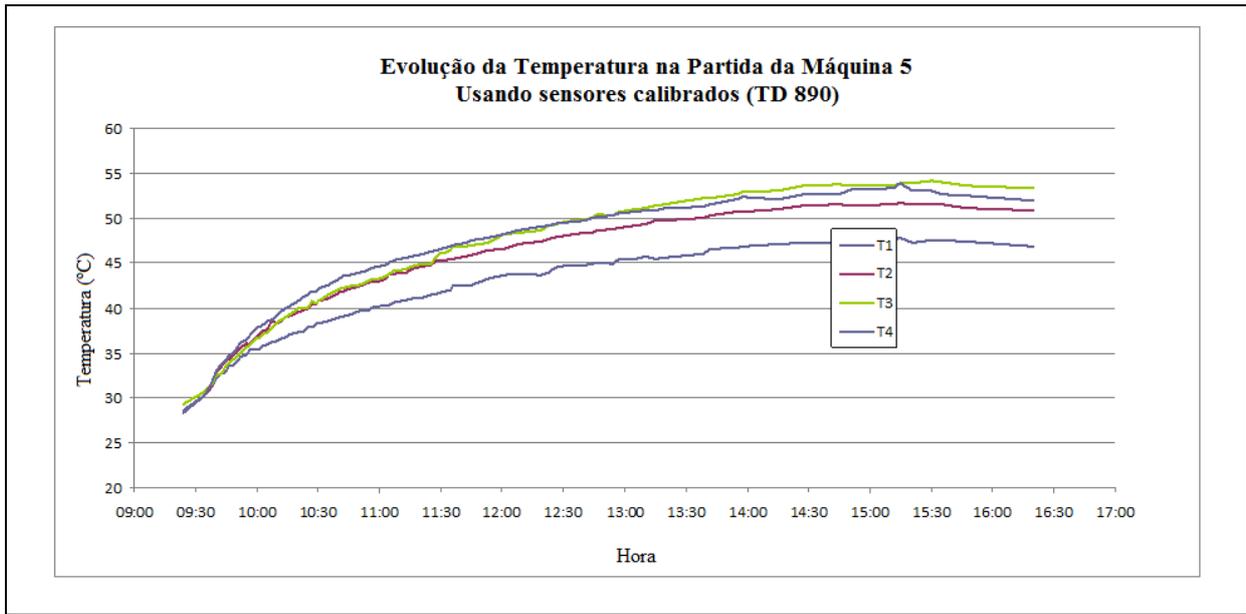


Figura 4.56 Evolução da temperatura na partida da Máquina 5 usando sensores calibrados.

A Figura 4.57 mostra a partida e a evolução da Máquina 5 com sensores calibrados.

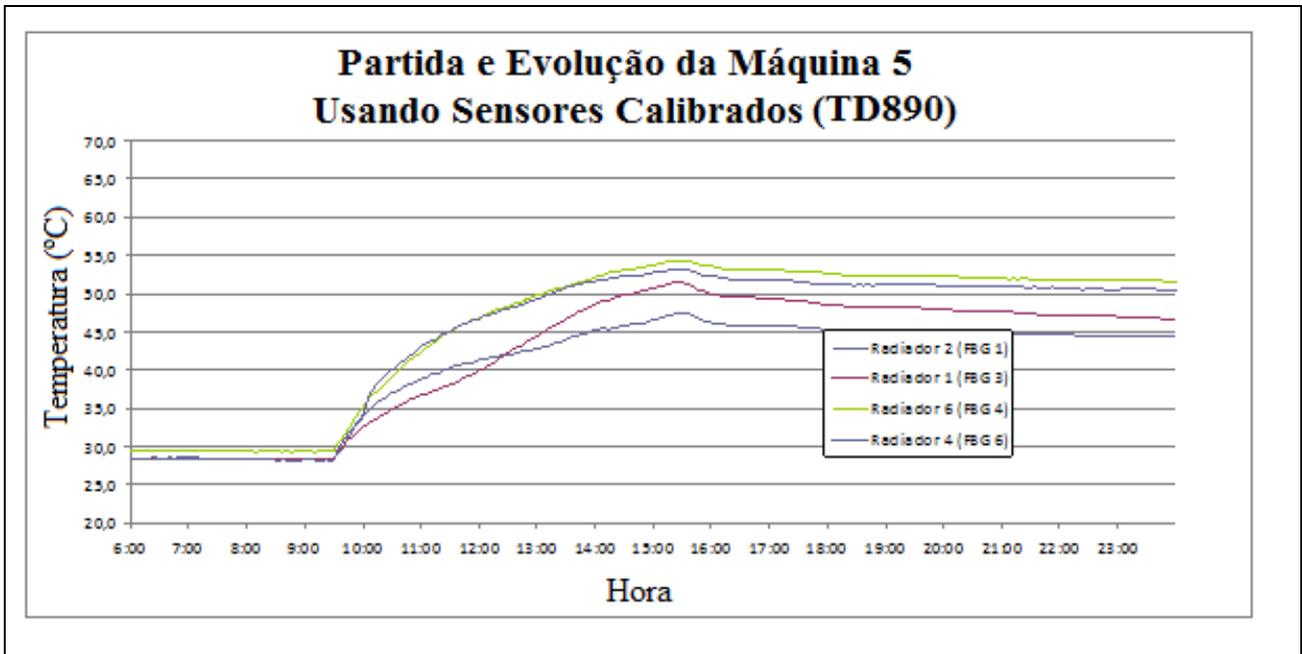
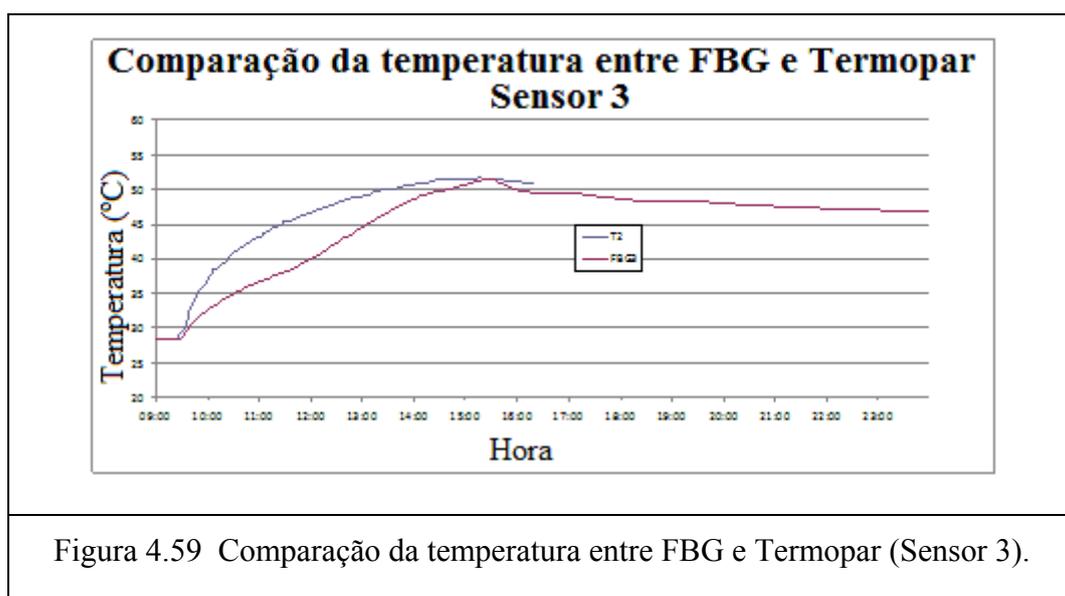
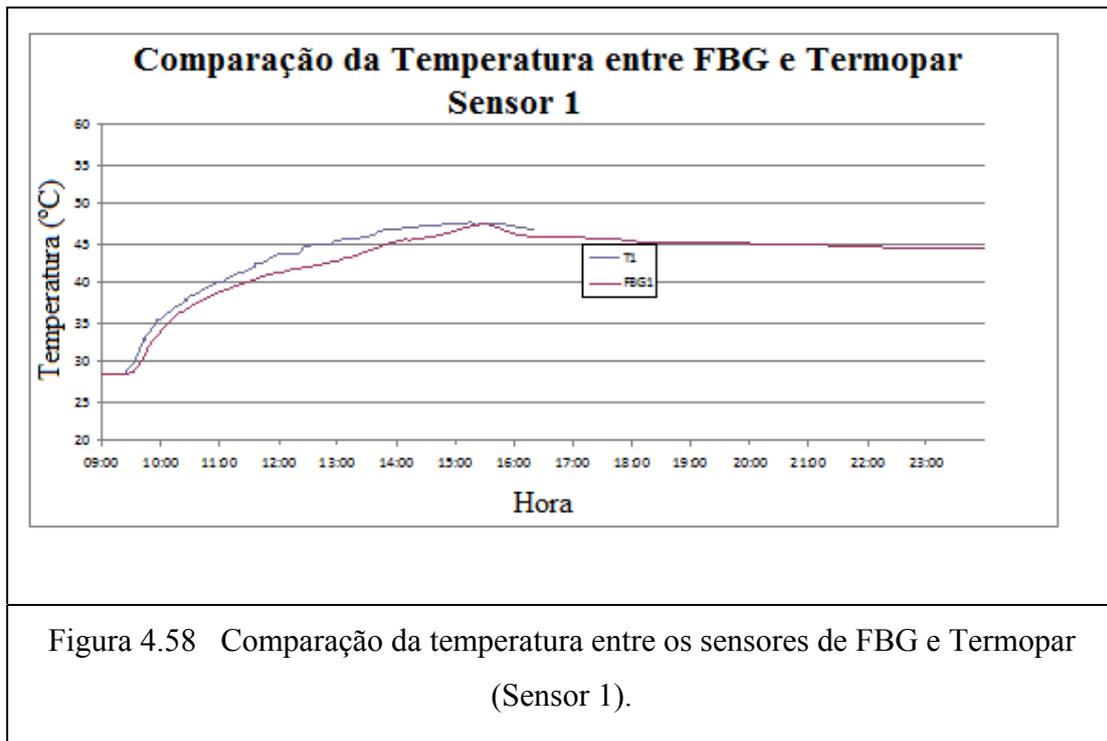


Figura 4.57 Partida e evolução da Máquina 5 com sensores calibrados.

As Figuras 4.58, 4.59, 4.60 e 4.61 apresentam a comparação dos resultados do monitoramento de temperatura obtidos entre os sensores de FBG e os calibrados.

Podemos observar que o sistema pode ser validado, uma vez que os resultados do monitoramento de temperatura dos sensores de FBG foram semelhantes ao monitoramento com os sensores calibrados. Observamos na Figura 4.59 um desvio entre as duas técnicas, que pode ser justificada, pelo fato do Sensor 3 ter sido instalado na posição invertida. O tubo de cobre com o sensor de FBG foi colocado virado para cima.



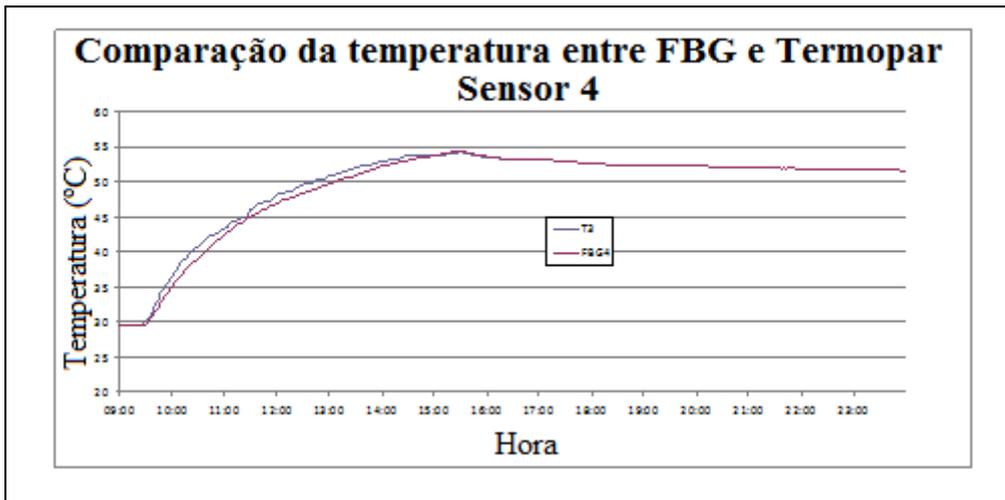


Figura 4.60 Comparação da temperatura entre FBG e Termopar (Sensor 4).

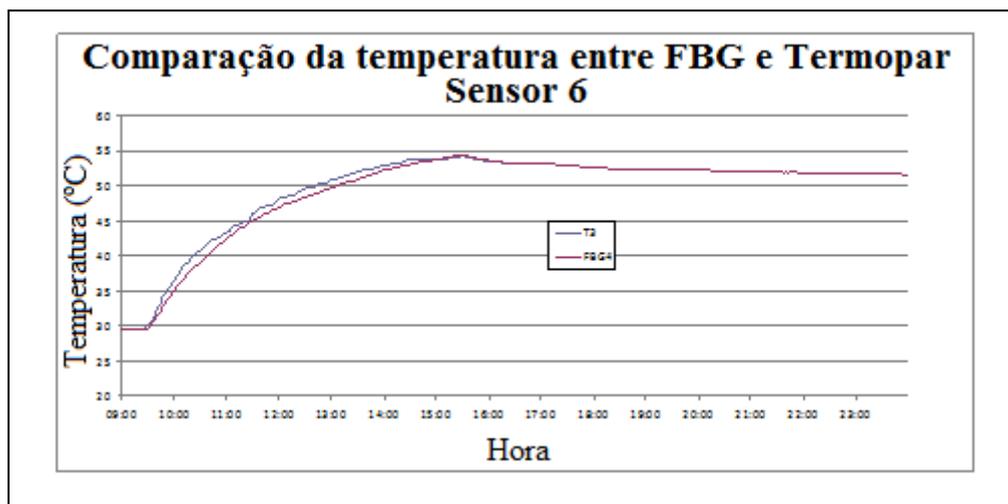


Figura 4.61 Comparação da temperatura entre FBG e Termopar (Sensor 6).

Capítulo 5. FBG e PZT como sensor de alta tensão

Neste capítulo será mostrado o desenvolvimento do protótipo de um sensor de alta tensão utilizando uma FBG como sensor de *strain*, medindo o deslocamento de um cristal piezoelétrico submetido ao campo elétrico.

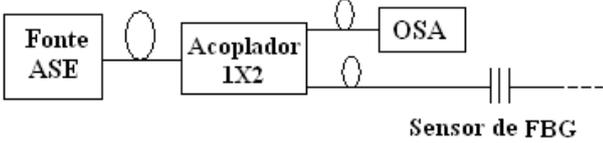
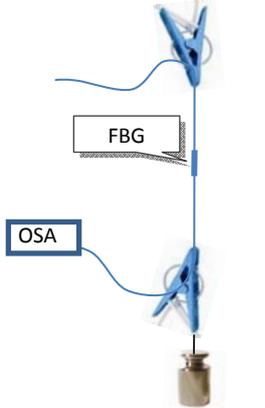
Este capítulo inclui o estudo do deslocamento de Bragg em função da tensão mecânica, o *set up* elétrico utilizado, a apresentação das técnicas utilizadas nos experimentos e por fim, os resultados seguidos da discussão.

5.1. Deslocamento de Bragg com tensão mecânica

Este ensaio visa o estudo do deslocamento do comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda_{BRAGG}$) com aplicação de tensão mecânica, através de um *set up* que consiste de uma fibra óptica com FBG central em 1558,07 nm que foi distendida por um peso de 70,28 g, uma fonte ASE, um acoplador (1X2) e um analisador de espectro óptico (OSA).

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram os diagramas em blocos do ensaio realizado sem peso e com peso, respectivamente.

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram o deslocamento de Bragg ($\Delta\lambda_{BRAGG}$) obtido através do OSA (A=1557,59 nm e B=1558,55 nm), onde o “pico” de reflexão da FBG defletiu 0,96 nm. O resultado experimental pode ser comparado com o teórico, substituindo os dados na Eq. (8).

	
Figura 5.1 Diagrama em blocos do <i>set up</i> do sensor sem peso.	Figura 5.2 <i>Set up</i> do sensor com peso.

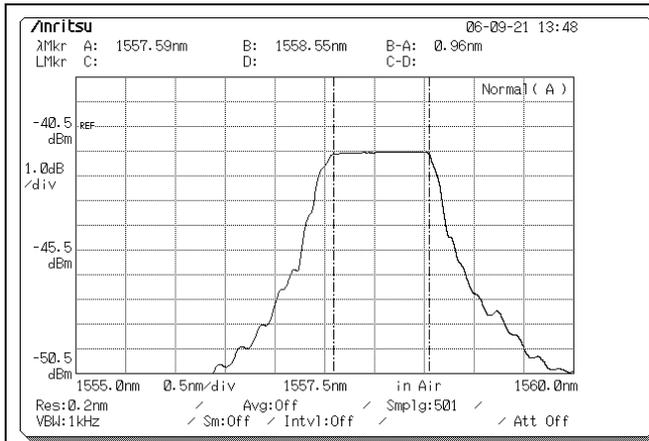


Figura 5.3 Sensor de FBG sem peso.

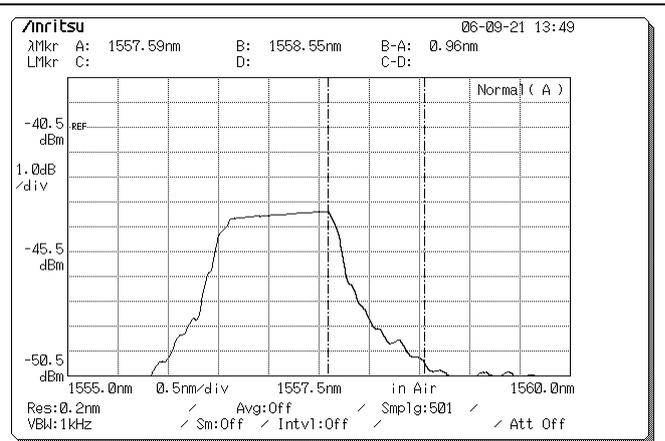


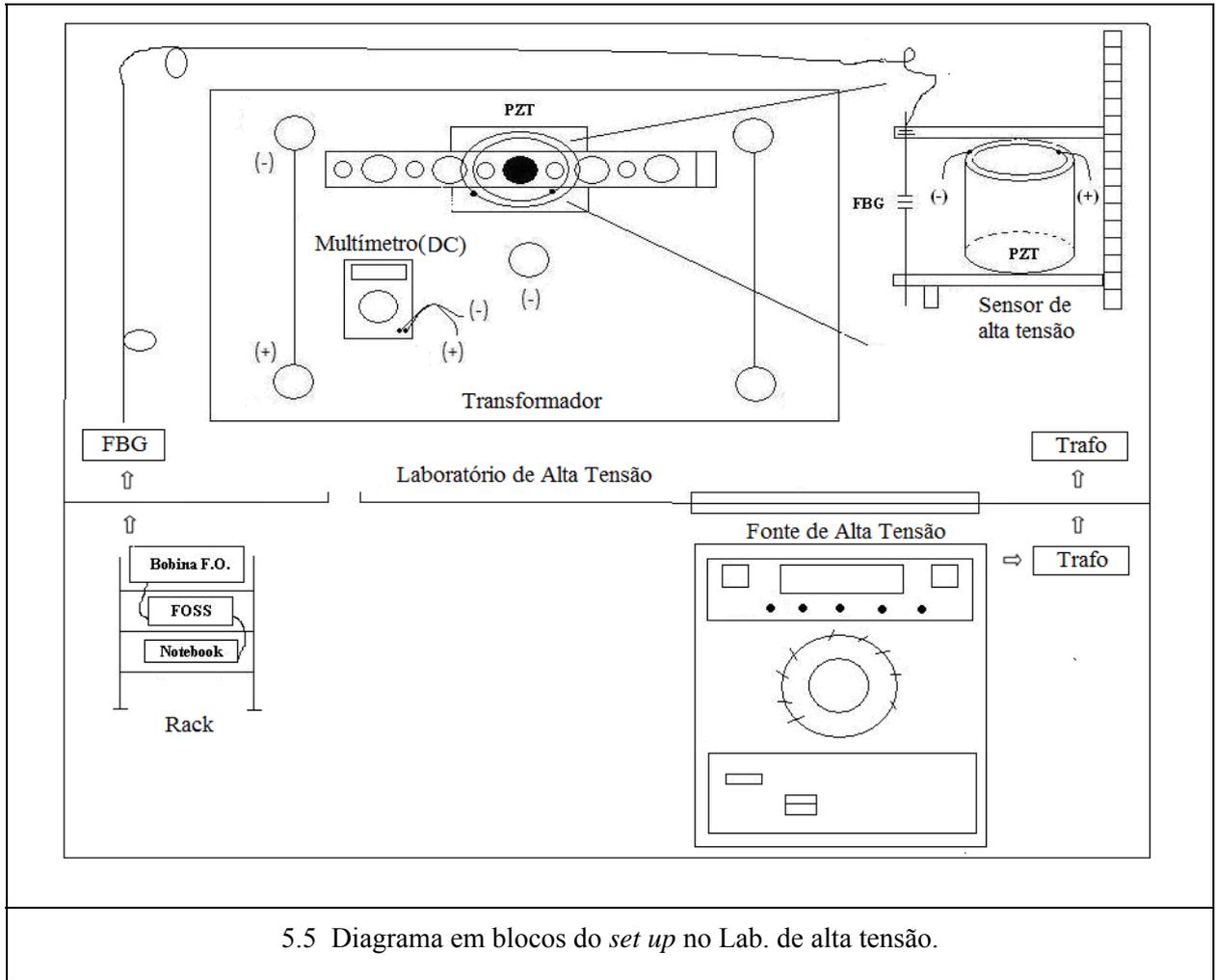
Figura 5.4 Sensor de FBG com peso.

Condições: T=25°C		λ_{BRAGG} Experimental (nm)	λ_{BRAGG} Teórico (nm)
Sem peso	1557,11 nm	0,96	0,92
Com peso (70,28 g)	1558,07 nm		

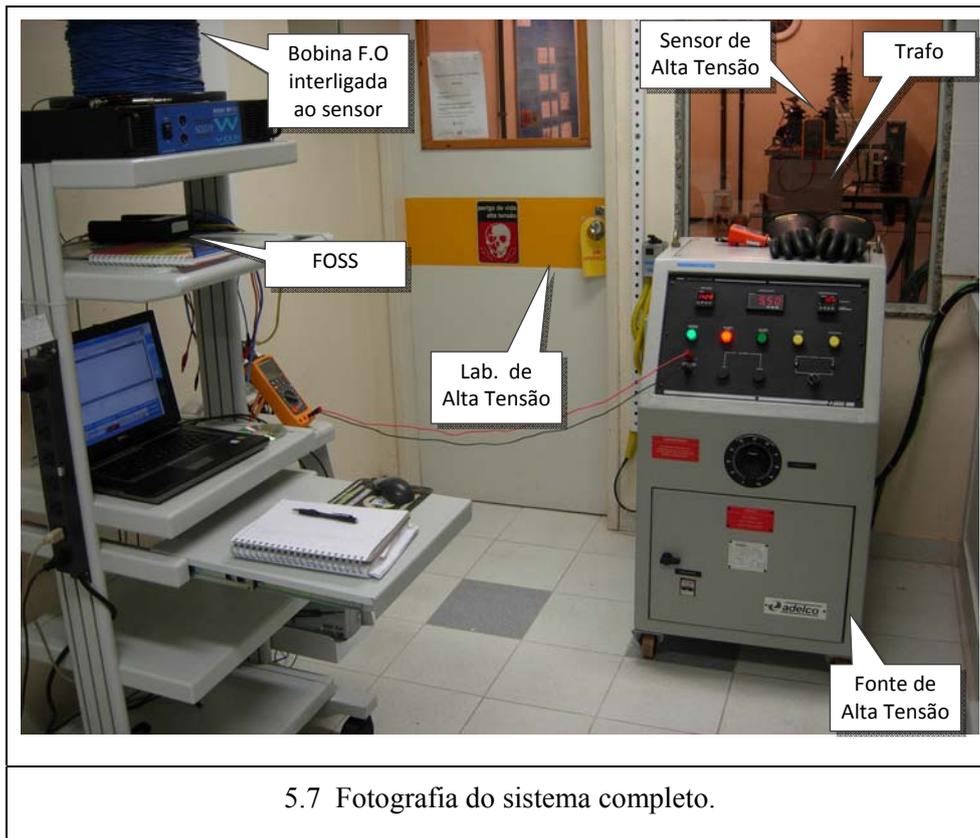
5.2. Set up elétrico

O *set up* consiste de uma fonte de alta tensão CC-CA15 kV (ADELCO) ligada diretamente nos eletrodos do PZT. Uma FBG em contato com o PZT tem em sua extremidade um *pigtail* conectando o sensor de FBG a uma bobina óptica localizada do lado externo ao Laboratório de alta tensão. Na outra extremidade da bobina a FBG é conectada ao interrogador óptico de Bragg Espectral Eye 400 (FOS&S) na faixa de 1530 a 1570 nm, responsável pela análise do deslocamento espectral do sensor em função da deformação da cerâmica. Um multímetro MD 6130 (FLUKE) com ponteira divisora de tensão é utilizado para a medida de tensão.

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 mostram o diagrama em blocos do *set up* completo, fotografia do Laboratório de alta tensão e fotografia do sistema completo, respectivamente.



5.6 Fotografia do laboratório de alta tensão em destaque.



5.3. Técnicas utilizadas nos experimentos realizados com FBG e PZT e seus resultados

Este item descreve as técnicas utilizadas para obter uma extensão na FBG a partir de um deslocamento do PZT. O objetivo é obter a máxima extensão na FBG a partir de uma tensão aplicada no PZT. A razão é que a incerteza da medida é proporcional ao inverso da sensibilidade, assim os *set ups* mostrados visam obter $\Delta\lambda_{\text{BRAGG}}/\Delta V_{\text{PZT}}$ o maior possível.

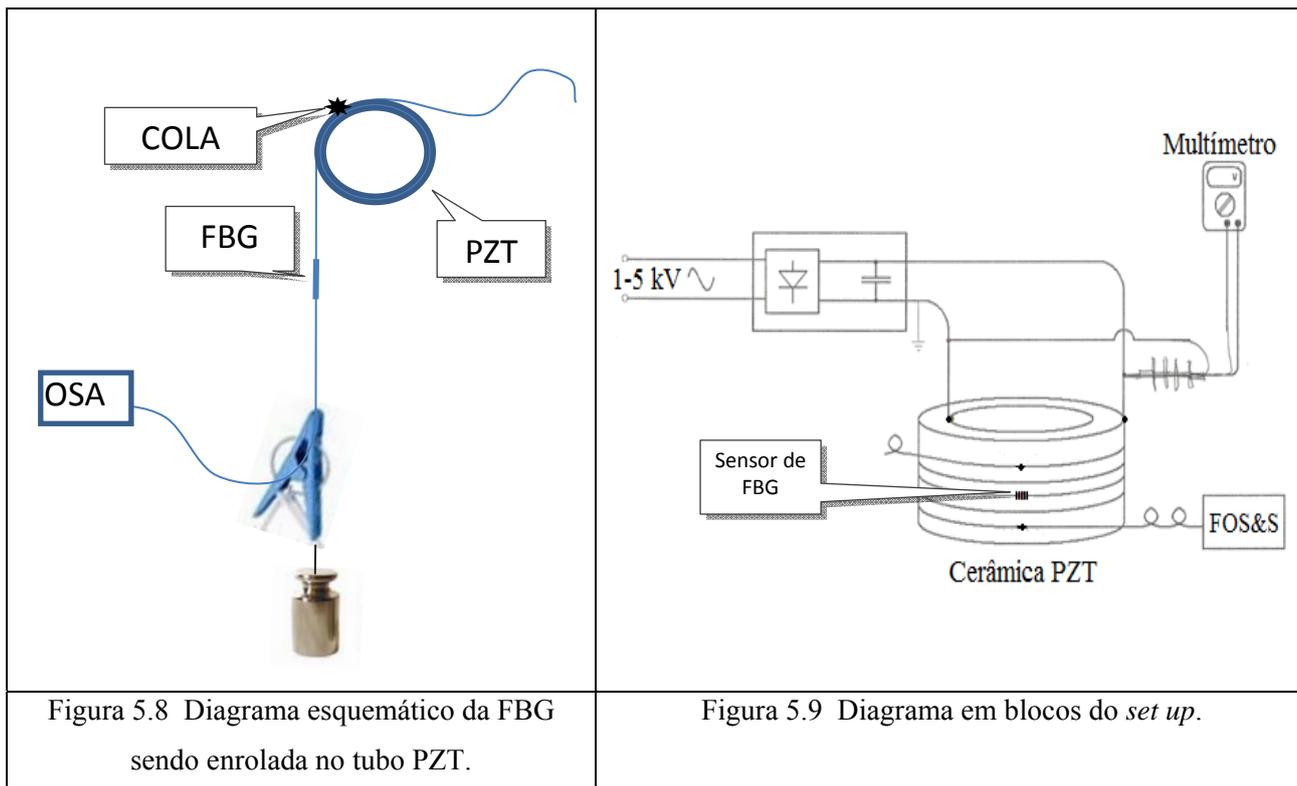
5.3.1. FBG colada e enrolada em torno da cerâmica PZT em forma de tubo

O *set up* para medida de tensão deste protótipo é composto por uma cerâmica PZT com as seguintes características: cerâmica piezoelétrica Tipo I (código SP-4), dopada com Estrôncio (Sr), de forma geométrica tubo oco cilíndrico, medindo 45,2X3,8X30 mm, apresentando eletrodos nas faces côncavas, com $d_{31} = -122$ pm/V e

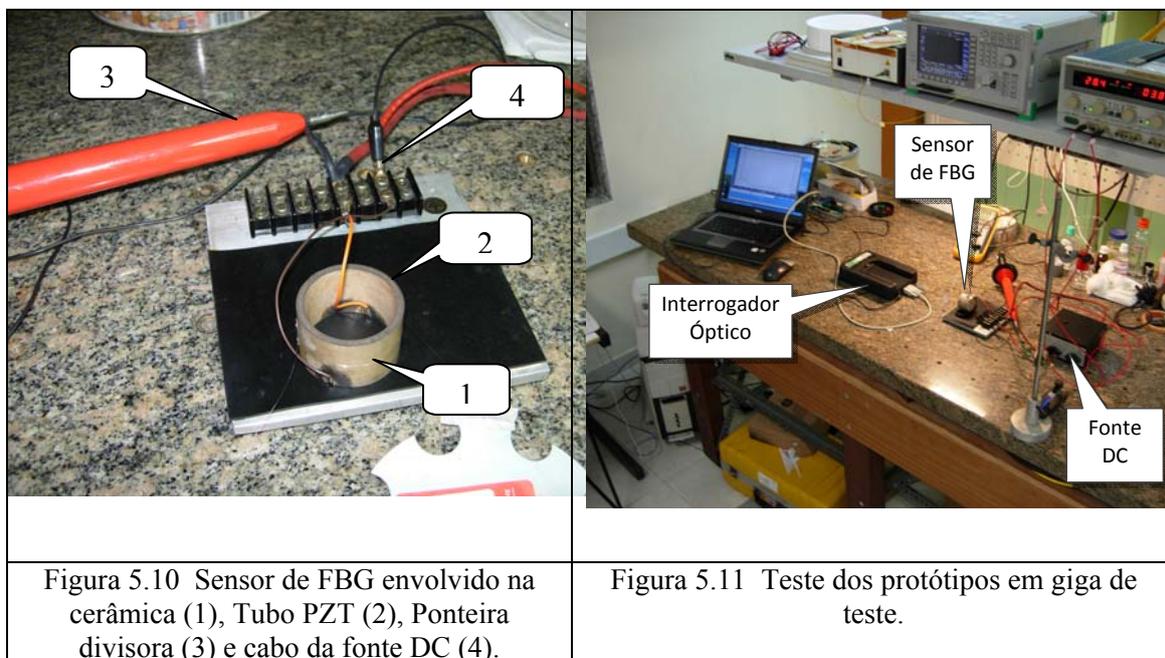
$d_{33} = 300$ pm/V. Foi utilizada uma rede de Bragg com comprimento de onda central com $\lambda_B = 1532$ nm, um multímetro com ponteira divisora de tensão, uma fonte de alimentação DC na faixa de 28 V a 26 kV e um sistema de interrogação de Bragg Spectral Eye 400 (FOS&S) na faixa de 1530 a 1570 nm com resolução de 1,0 pm e acurácia de 2,0 pm.

A cerâmica PZT foi previamente preparada, através do seguinte procedimento: lixamento com esponja abrasiva na área escolhida do eletrodo para soldar os fios e aplicar tensão DC. Em seguida, foi feita a remoção do revestimento primário (acrilato) da fibra óptica, que pode ser realizada mecanicamente com alicate decapador ou quimicamente com Acetato de Amila (óleo de banana) por cerca de 20 minutos. Primeiramente, uma extremidade da fibra contendo o sensor de FBG foi colada com adesivo *Silver Plate* na região que antecede a área ativa da fibra, ou seja, região sem revestimento. Depois, bem próximo do *Silver Plate* foi colada com *Super Bonder* uma extremidade da área ativa da fibra na cerâmica e, após alguns segundos, foi colocado um peso (70,28 g, na outra extremidade da fibra. O peso é necessário para que a fibra fique esticada no PZT e desta forma, ficando o sensor ajustado adequadamente para detectar variações positivas e negativas. Uma vez tendo sido colada uma área da fibra (sem revestimento) no PZT, foi iniciado o processo para envolver a fibra com a rede de Bragg na cerâmica. A Figura 5.8 mostra o diagrama esquemático da FBG sendo enrolada no tubo PZT.

A cerâmica PZT recebe uma determinada tensão (DC) diretamente nos seus eletrodos, através da fonte de tensão, a partir da incidência do campo elétrico a cerâmica sofre uma deformação. A FBG é conectada ao interrogador óptico de Bragg (*Bragg meter*). O interrogador óptico é responsável pela análise do deslocamento espectral do sensor em função da deformação da cerâmica. Um multímetro com ponteira divisora de tensão foi utilizado para a medida de tensão. A Figura 5.9 mostra o diagrama em blocos do *set up*.



As Figuras 5.10 e 5.11 mostram as fotografias do sensor de FBG envolvido no PZT e o teste realizado do protótipo em giga de teste, respectivamente.



Vamos agora desenvolver o modelo teórico da relação entre a tensão aplicada e o deslocamento de Bragg. Quando um campo elétrico é aplicado aos eletrodos do PZT, tanto ocorre uma contração na circunferência (d_{31} é negativo) como um aumento na parede da espessura da cerâmica (d_{33} é positivo). Podemos aplicar a Eq. (18) para o cálculo da tensão longitudinal considerando ambos os efeitos. Da Eq. (20) obtemos portanto:

$$\Delta w = d_{33} E w \quad (28)$$

Sendo o campo elétrico:

$$E = \frac{V_{in}}{w} \quad (29)$$

Então temos:

$$\Delta w = d_{33} V_{in} \quad (30)$$

Onde V_{in} é a tensão aplicada e w é a espessura da parede.

O deslocamento da espessura da parede do cilindro é decorrente da variação do seu diâmetro que conseqüentemente varia o comprimento da circunferência do tubo, L , ao redor do PZT onde a fibra foi enrolada.

Sendo $L = 2\pi R$, nós temos $\Delta L = 2\pi\Delta R$. Se a espessura da parede é w , então quando a espessura aumenta pelo Δw , o raio R aumentará de $\Delta w/2$, já que a metade do aumento ocorre para dentro e não interfere em ΔR . Então, nós temos:

$$\Delta L = 2\pi \frac{\Delta w}{2} = \pi \Delta w \quad (31)$$

Substituindo (31) em (28), nós temos a seguinte tensão longitudinal na fibra como uma conseqüência do deslocamento da espessura da parede:

$$\Delta L = \pi d_{33} V_{in} \quad (32)$$

Mas, como resultado da tensão aplicada, nós temos também o deslocamento da circunferência do tubo PZT. O aumento relativo da circunferência é, de acordo com Eq. (18). Partindo da Eq. (19) em decorrência temos:

$$\Delta L = 2\pi R d_{31} E \quad (33)$$

Mas, como $E = V_{in} / w$, nós temos:

$$\Delta L = 2\pi R d_{31} \frac{V_{in}}{w} \quad (34)$$

Finalmente, nós adicionamos as equações (32) e (34) para obter o efeito composto.

$$\Delta L = V_{in} \left(\pi d_{33} + 2\pi R \frac{d_{31}}{w} \right) \quad (35)$$

Ou,

$$\frac{\Delta L}{L} = V_{in} \left(\frac{d_{33}}{2R} + \frac{d_{31}}{w} \right) \quad (36)$$

Para o tubo PZT usado temos as seguintes constantes (*PIceramics*, 2009):

$$d_{31} = -122 \text{ pm/V}, \quad d_{33} = 300 \text{ pm/V}, \quad R = 22,56 \times 10^{-3} \text{ m} \text{ e } w = 3,3 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

Substituindo os valores acima em (36), temos:

$$\frac{\Delta L}{L} = -30,32 \times 10^{-9} V_{in} \quad (37)$$

Considerando a Eq. (8) em um ambiente de temperatura constante e substituindo as constantes, temos:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = 0,78 \frac{\Delta L}{L} \quad (38)$$

Substituindo (36) em (38) temos finalmente:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -23.65 \times 10^{-3} V_{in} \quad (39)$$

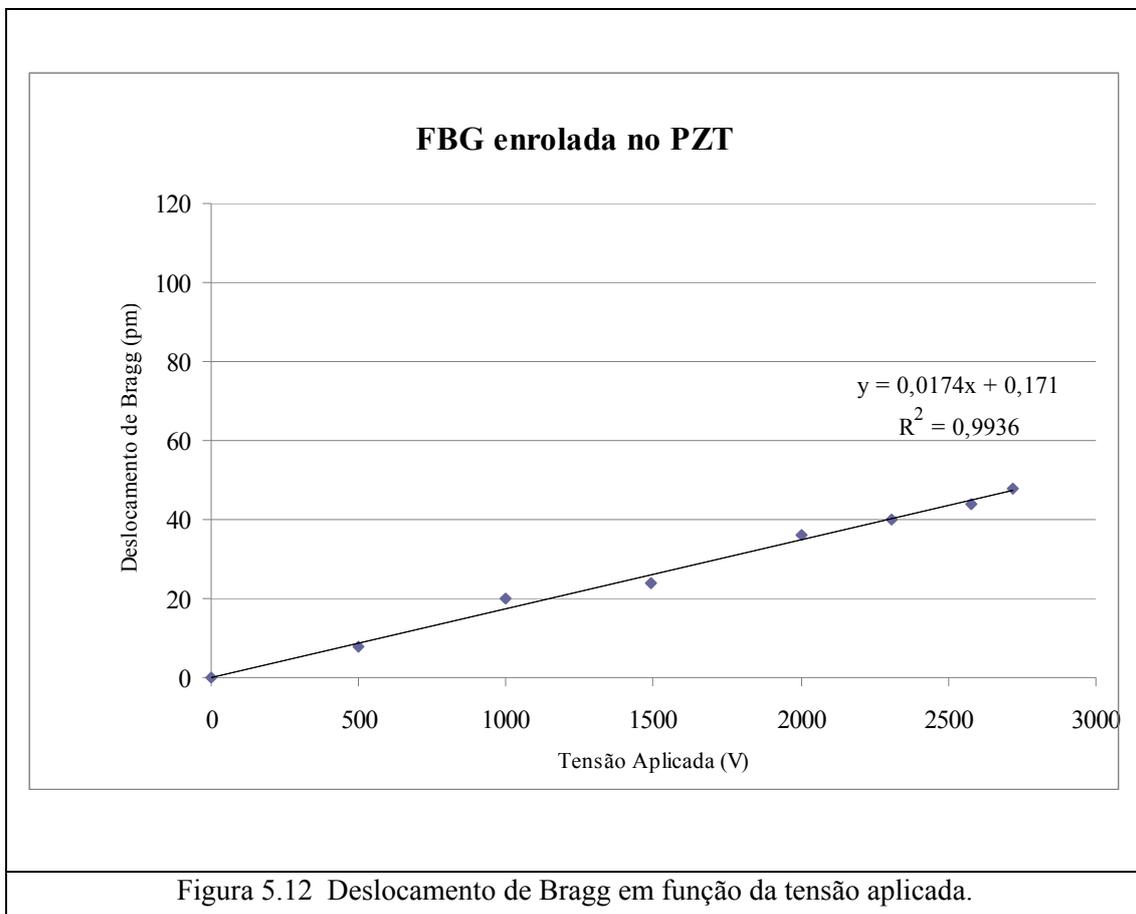
A Eq. (39) representa o valor do deslocamento de Bragg em função da tensão aplicada. Agora considerando o comprimento de onda de Bragg central em repouso, $\lambda_B = 1558,024 \text{ nm}$, obtemos a seguinte sensibilidade do nosso sistema:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta V} = -36.85 \times \frac{10^{-3} \text{ pm}}{\text{V}} \quad (40)$$

O que significa um deslocamento do comprimento de onda de Bragg de 36,85 pm por cada 1000 V aplicados no PZT.

5.3.1.1. Resultado

A Figura 5.12 apresenta o resultado desta técnica.



Podemos observar que o resultado foi satisfatório com coeficiente de correlação de 0,9936. Visando confirmar a repetibilidade desta técnica foi realizado outro ensaio utilizando o mesmo *set up*, aplicando desta vez tensão na faixa de -4000 V a 4000 V com objetivo de estudar o comportamento do PZT com relação ao seu crescimento e o processo inverso, visando a possibilidade da utilização do sistema em tensão CA.

A Figura 5.13 apresenta este resultado.

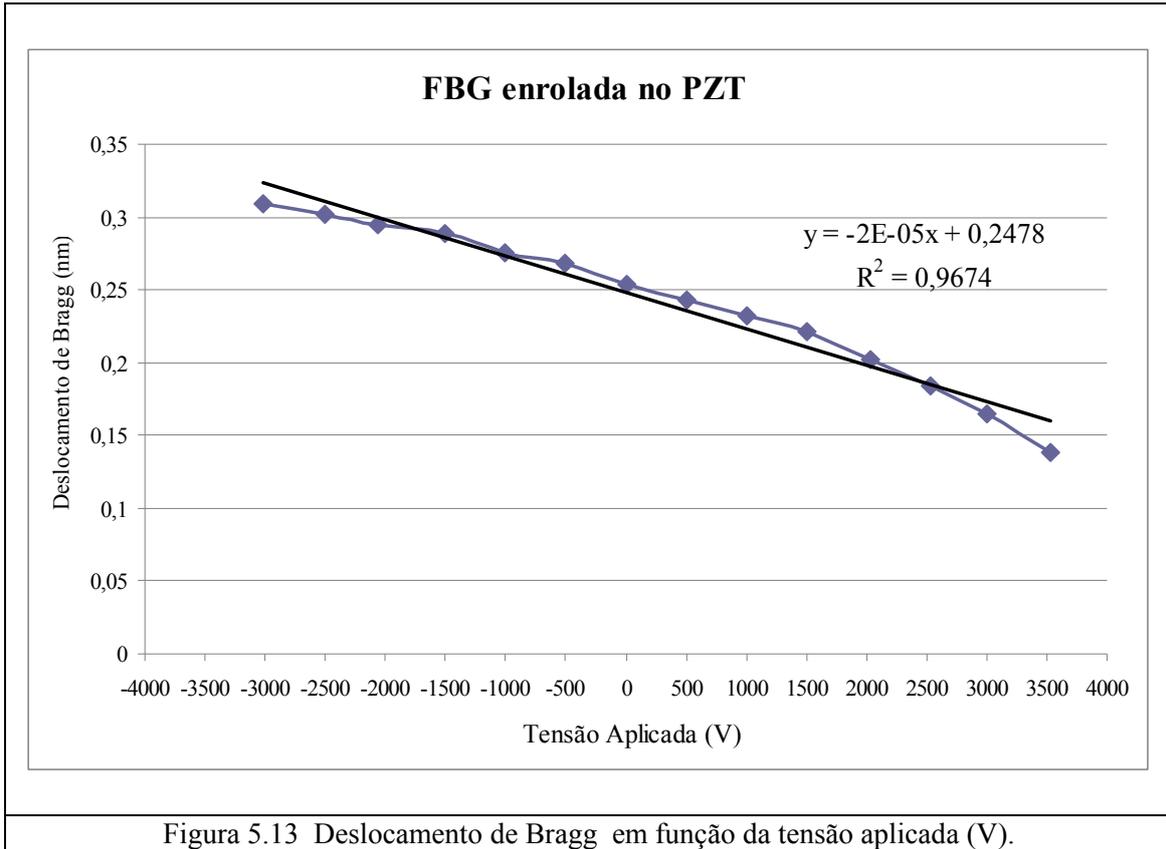


Figura 5.13 Deslocamento de Bragg em função da tensão aplicada (V).

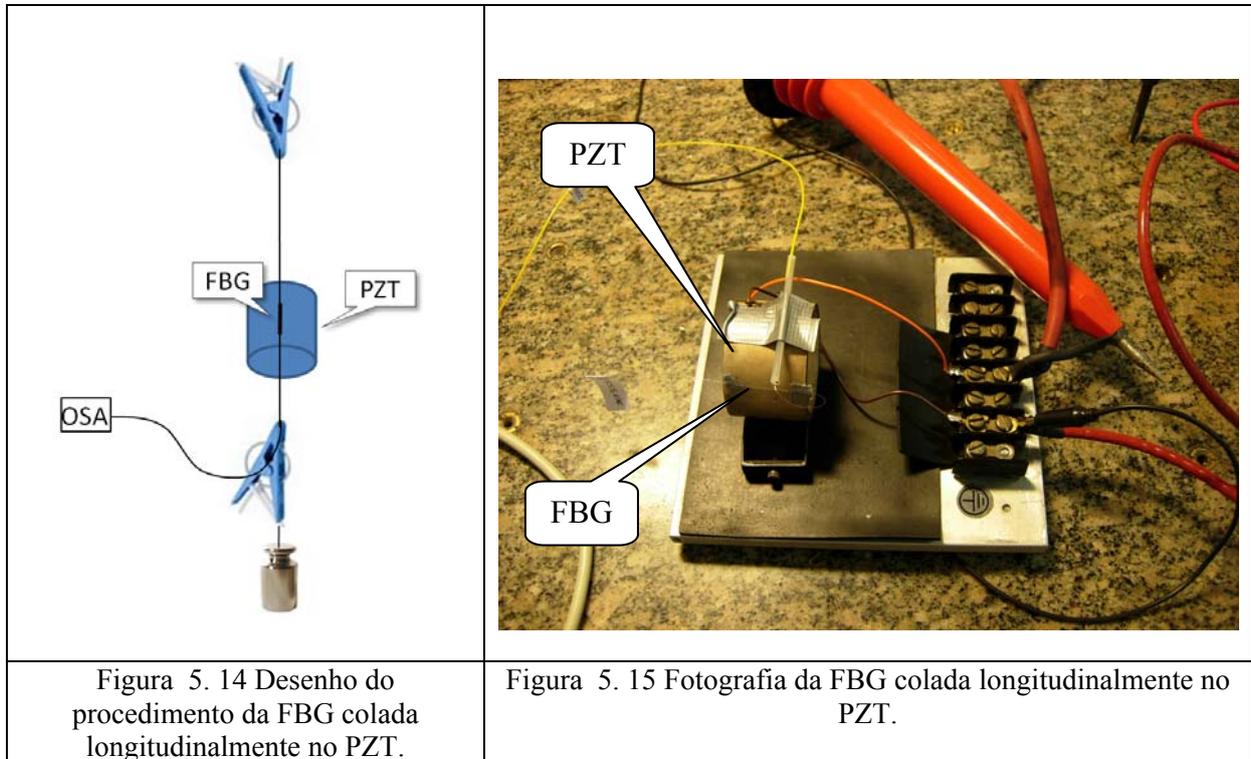
Podemos observar a falta de linearidade neste resultado, com o coeficiente de 0,9674. Isto pode ser atribuído ao fato da folga da FBG em volta do PZT. Entretanto, observamos que o PZT cresce e decresce, nos mostrando a possibilidade de utilização em AC.

5.3.2. FBG colada longitudinalmente na cerâmica em forma de tubo

Desta vez, a FBG foi colada longitudinalmente ao PZT em forma de tubo, no intuito de impedir a rede de escorregar ao redor do tubo.

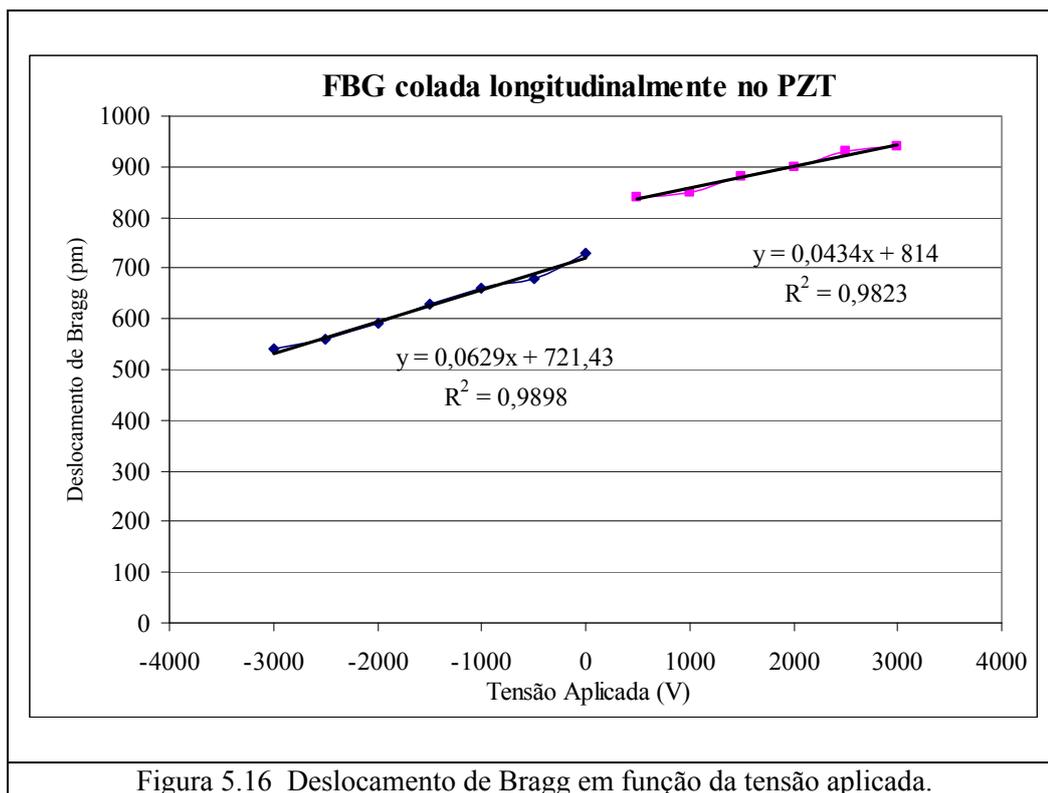
Este experimento consiste de uma FBG com $\lambda_B = 1555,852$ nm usando interrogador óptico de Bragg, FOS&S.

As Figuras 5.14 e 5.15 mostram o diagrama esquemático da FBG colada longitudinalmente no tubo PZT e a fotografia do *set up*.



5.3.2.1. Resultado

A Figura 5.16 apresenta o resultado desta técnica.



Os resultados ainda não são satisfatórios, observamos pouca linearidade que pode ser justificada pelo fato da fibra estar colada diretamente no PZT. O que nos leva a estudar outras possibilidades.

5.3.3. Técnica com amplificador mecânico, Protótipo #1

Este *set up* tem como objetivo a obtenção do $\Delta\lambda_{BRAGG}$, com a utilização de um amplificador mecânico, visando aumentar a sensibilidade do protótipo, com objetivo de multiplicar o deslocamento do PZT e obter um deslocamento maior na FBG. O amplificador consiste de uma barra que age como uma alavanca com uma articulação.

O *set up* consiste de uma fibra óptica com FBG central com $\lambda_B = 1557,028$ nm colada, diretamente no amplificador mecânico com o PZT deitado no amplificador. O PZT utilizado apresenta as seguintes características: SP-4, em forma de tubo oco. As posições do PZT em relação ao amplificador são: distância da fibra até a dobradiça: 10,4 mm, distância do PZT até a dobradiça: 2,8 mm e ganho mecânico: $10,4/2,8 = 3,7$ mm.

As Figuras 5.17 e 5.18 mostram o diagrama em blocos do amplificador mecânico, Protótipo #1 e a fotografia do *set up* com amplificador mecânico.

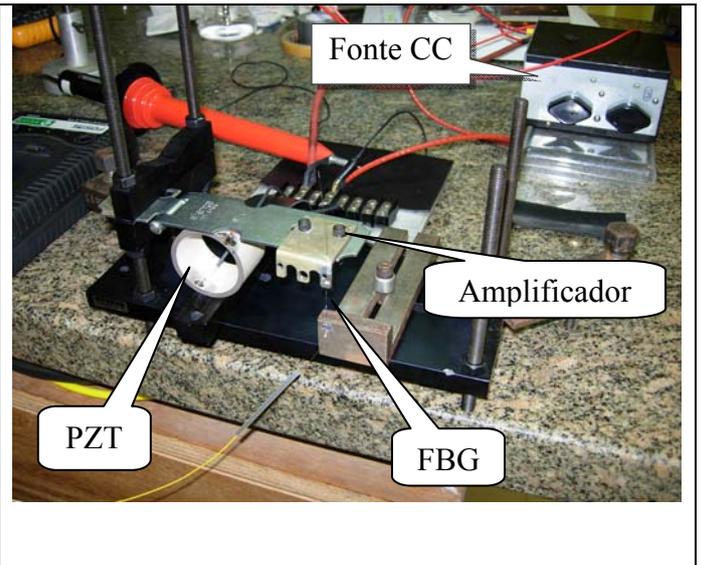
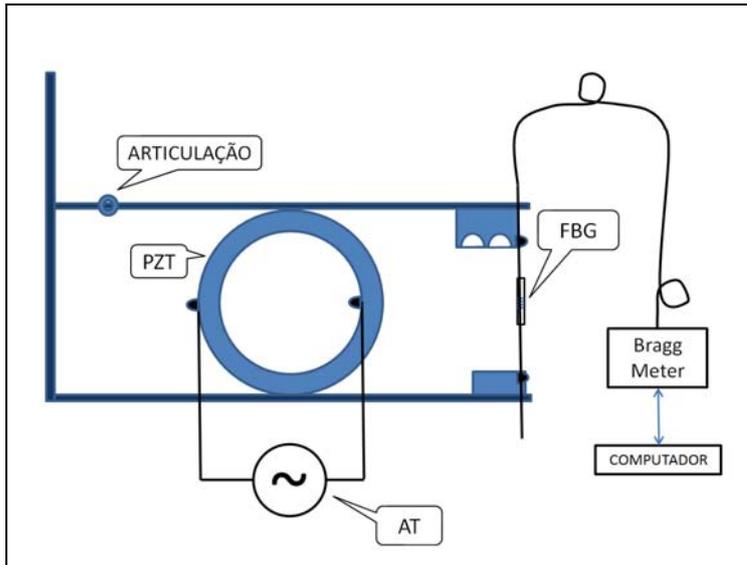


Figura 5. 17 Diagrama em blocos do amplificador mecânico, Protótipo #1.

Figura 5. 18 Fotografia do set up da FBG colada no amplificador mecânico, Protótipo #1.

5.3.3.1. Resultado

A Figura 5.19 mostra o gráfico: deslocamento do comprimento de onda (nm) X Tensão (V) na faixa aplicada de tensão de -4400 V a 3500 V.

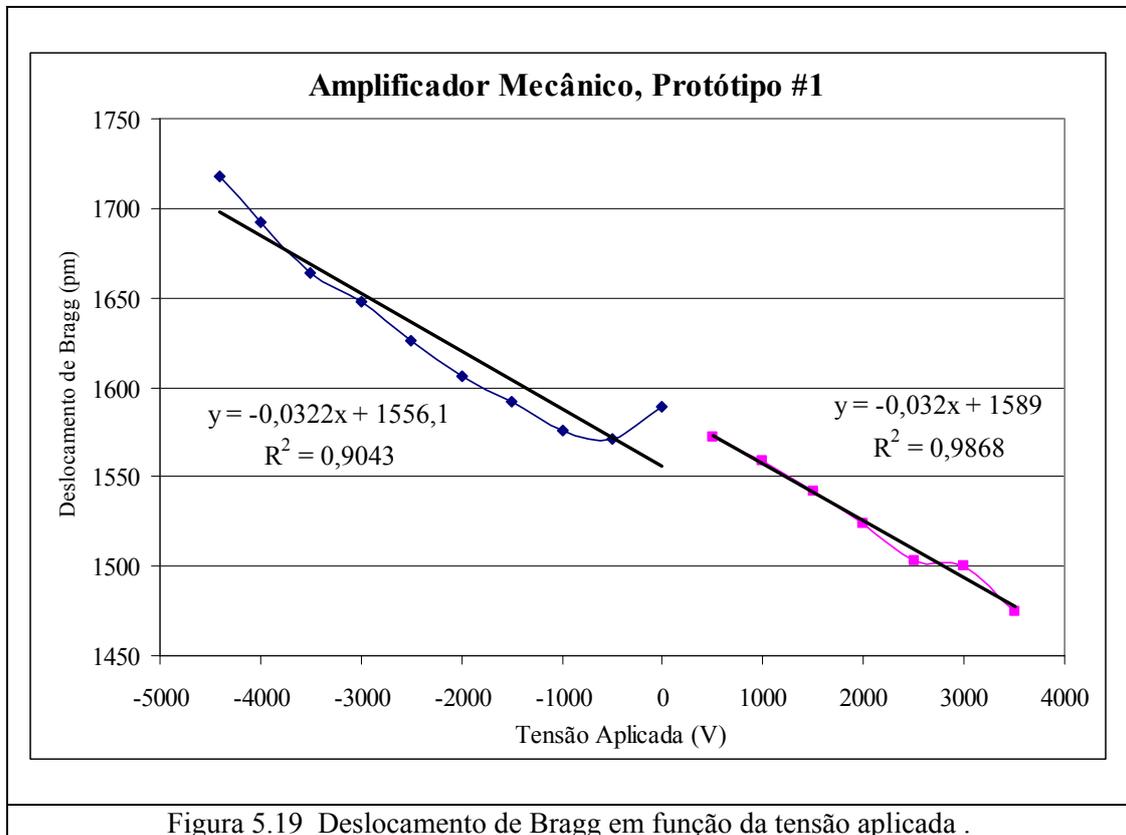


Figura 5.19 Deslocamento de Bragg em função da tensão aplicada .

Os resultados obtidos nesta técnica não apresentaram boa linearidade. Podemos justificar pelo fato do amplificador mecânico, Protótipo #1, ter apresentado desalinhamento das peças que resultou em muitas folgas no sistema.

5.3.4. Técnica com amplificador mecânico, Protótipo #2

Este *set up* com amplificador mecânico, Protótipo #2, visa atender as necessidades de melhoria ao protótipo anterior. O Protótipo #2, é composto por uma régua rígida com um pequeno parafuso de ajuste de tensão mecânica, em substituição da peça utilizada no protótipo #1.

O *set up* consiste de uma fibra óptica com FBG central com $\lambda_B = 1540,67$ nm colada diretamente no amplificador mecânico, com o PZT posicionado verticalmente com relação a régua do amplificador. O PZT utilizado apresenta as mesmas características do experimento anterior.

As Figuras 5.20 e 5.21 mostram o diagrama em blocos do amplificador mecânico, Protótipo #2 e a fotografia deste *set up*.

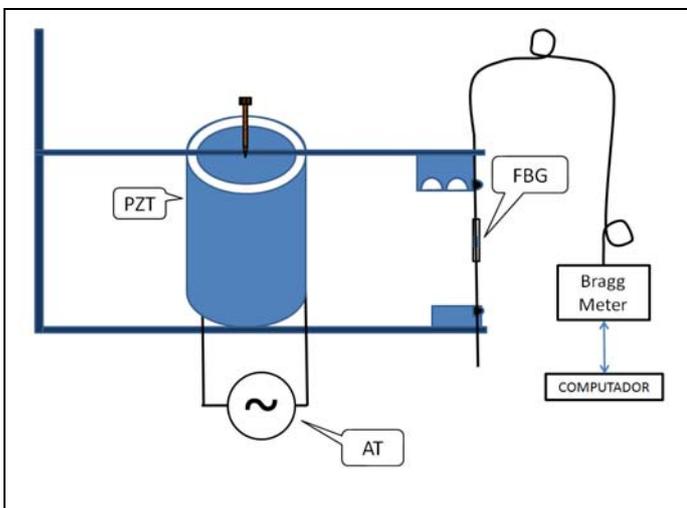


Figura 5.20 Diagrama em blocos do amplificador mecânico, Protótipo # 2.

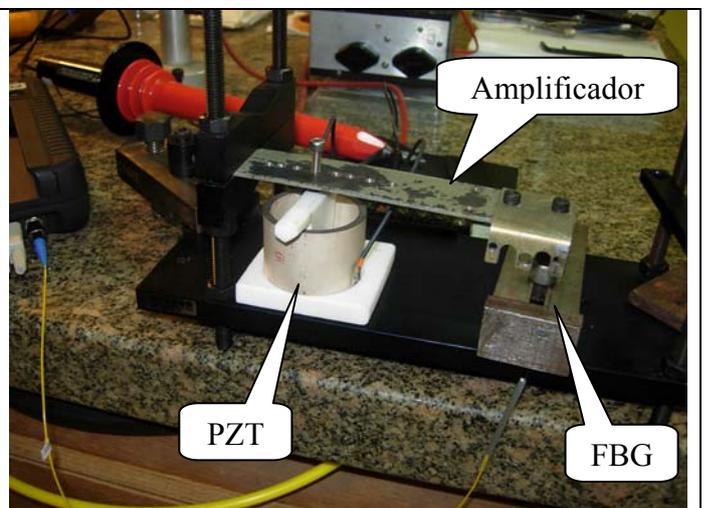
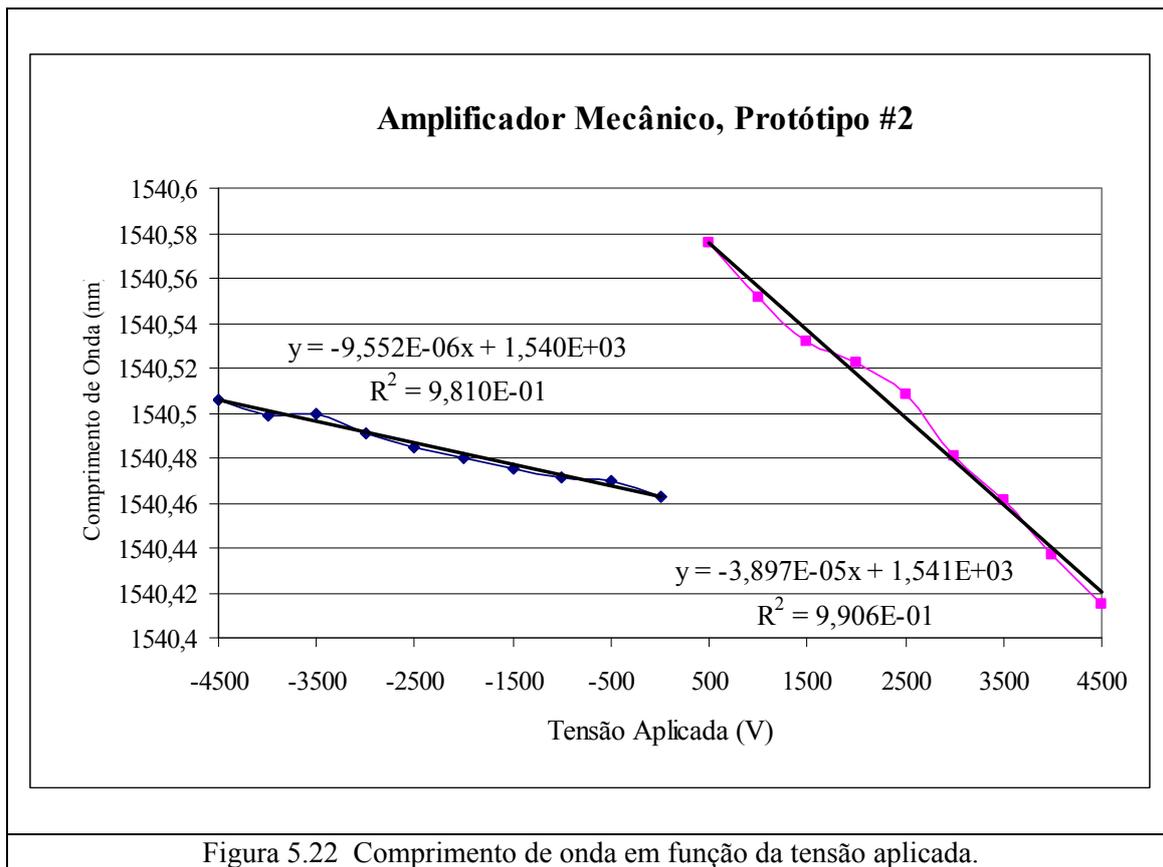


Figura 5.21 Fotografia do set up com amplificador mecânico de régua, Protótipo # 2.

5.3.4.1 Resultado

A Figura 5.22 mostra o gráfico: comprimento de onda (nm) X Tensão(V).



Foi observada mais uma vez pouca linearidade nos resultados, nos levando a confirmação das folgas também apresentadas decorrentes da régua utilizada neste amplificador. Isto nos motivou a pesquisar outra possibilidade de otimização do amplificador.

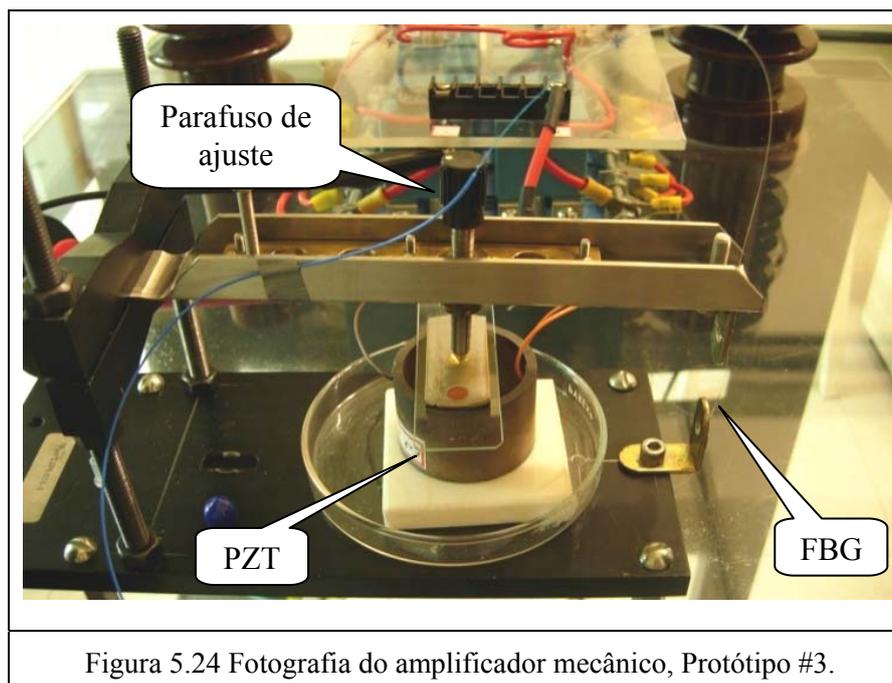
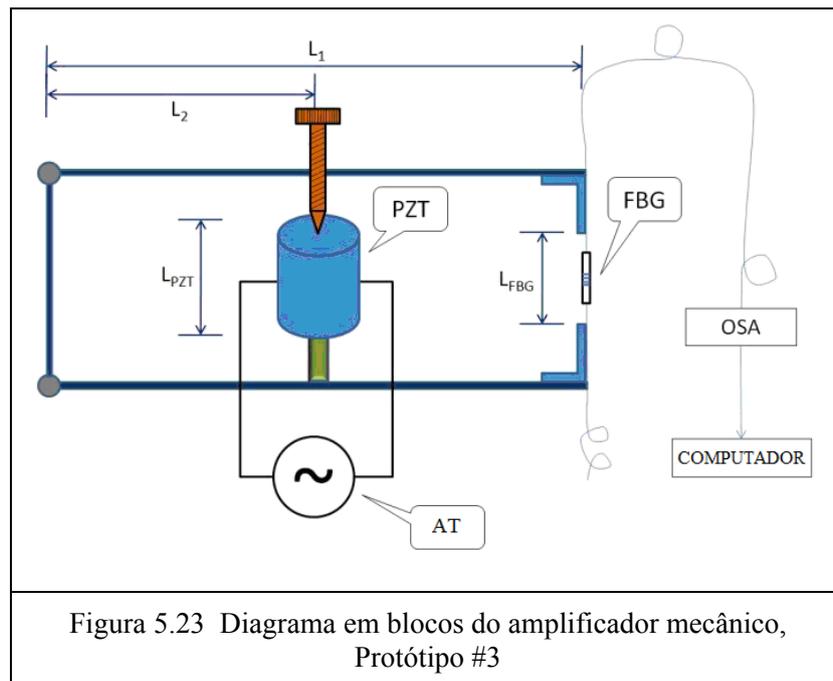
5.3.5. Técnica com amplificador mecânico, Protótipo #3

Ainda com objetivo de aumentar a sensibilidade dos resultados, uma nova configuração foi testada, visando uma *performance* dos amplificadores anteriores. O amplificador mecânico, Protótipo #3, consiste de duas alavancas com pinças em suas extremidades. O método de amplificação é semelhante ao anterior, o amplificador varia o ganho mudando a posição do parafuso de tensão mecânica ao longo da alavanca superior. A tensão mecânica do parafuso transfere o deslocamento do PZT para a fibra óptica, com a FBG colada nas pontas das alavancas através das pinças. Desta forma, estaremos usando o modo de deslocamento longitudinal do tubo PZT.

O *set up* consiste de uma fibra óptica com FBG central com $\lambda_B = 1560,025$ nm colada diretamente nas pinças do amplificador, PZT posicionado verticalmente em relação as alavancas do amplificador, um Bragg *meter* FS 2200 (Fiber Sensing) com

resolução de 1,0 pm e acurácia de 2,0 pm, fonte de alta tensão variável aplicada ao PZT e computador para traçar o sinal de reflexão da FBG e detectar o deslocamento do comprimento de onda de Bragg. O PZT utilizado apresenta as mesmas características do experimento anterior.

As Figuras 5.23 e 5.24 mostram o diagrama esquemático e a fotografia do ensaio com amplificador Protótipo #3, respectivamente.



Considerando esta técnica o protótipo ideal podemos agora desenvolver o modelo teórico da relação entre a tensão aplicada e o deslocamento de Bragg. Note que, através do processo utilizado na técnica sem amplificador mecânico (FBG colada diretamente no PZT), nós temos a deformação da FBG igualmente a deformação no PZT. Contudo, quando nós colamos a FBG na alavanca do amplificador mecânico, nós temos um deslocamento de PZT (ΔL_{PZT}) transferido para a FBG pela alavanca. A razão L_2 / L_1 representa a amplificação do ΔL_{PZT} aplicado na FBG, produzindo ΔL_{FBG} .

Se $L_1 = L_2$, nós deveríamos ter o mesmo deslocamento em ambos PZT e FBG:

$$\Delta L_{PZT} = \Delta L_{FBG} = \Delta L \quad (41)$$

E então, temos as seguintes deformações:

$$\epsilon_{FBG} = \frac{\Delta L}{L_{FBG}} \quad (42)$$

$$\epsilon_{PZT} = \frac{\Delta L}{L_{PZT}} \quad (43)$$

A razão entre estas duas deformações é L_{PZT} / L_{FBG} , significando que se nós fizermos o comprimento da FBG menor que o comprimento do PZT, nós obtemos outro fator de multiplicação.

Agora, combinando estas duas razões, nós encontramos o ganho total do amplificador mecânico:

$$G = \frac{L_1}{L_2} \times \frac{L_{PZT}}{L_{FBG}} \quad (44)$$

Neste *set up* a posição do parafuso de ajuste de tensão na alavanca inferior combinada com o comprimento do tubo do PZT e o comprimento da fibra óptica forneceu uma deformação $G=1,98$.

Iniciando, novamente a partir da Eq. (18) nós temos agora:

$$\frac{\Delta h}{h} = d_{32} \frac{V_{in}}{w} \quad (45)$$

Onde, $\Delta h/h$ é a mudança relativa na altura do tubo PZT, h é a altura do tubo, w é a espessura da parede e d_{32} é o coeficiente piezoelétrico na direção longitudinal. Estes parâmetros apresentam os seguintes valores: $h = 35$ mm, $w = 3,3 \times 10^{-3}$ m e $d_{32} = -122$ pm/V (*PIceramics, 2009*).

Substituindo as constantes acima em (45) nós temos:

$$\frac{\Delta h}{h} = -36.97 \times 10^{-9} V_{in} \quad (46)$$

Mas, uma vez que temos um fator de multiplicação de 1,98, a deformação experimentada pela fibra será:

$$\frac{\Delta L}{L} = 73.20 \times 10^{-9} V_{in} \quad (47)$$

Agora, substituindo (47) em (38):

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = -57.10 \times 10^{-9} V_{in} \quad (48)$$

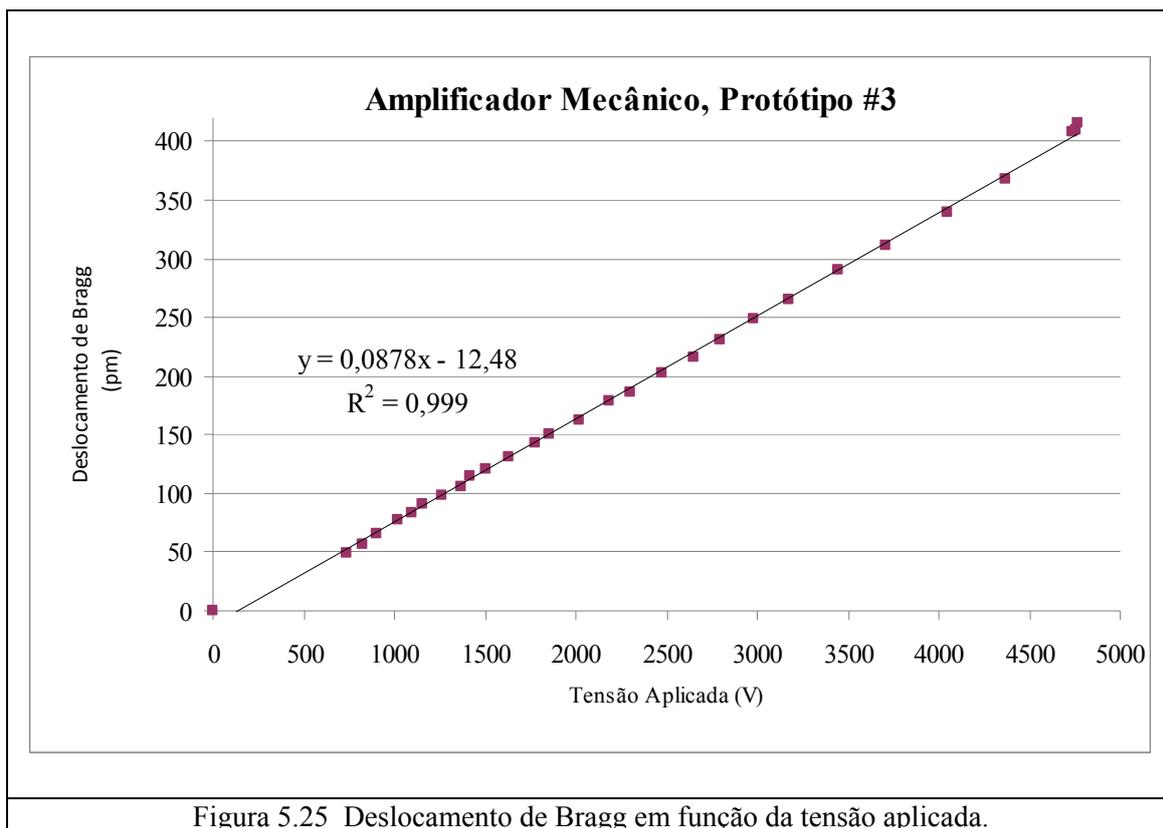
Considerando o comprimento de onda de Bragg central em repouso, $\lambda_B = 1560,025$ nm, nós chegamos na seguinte sensibilidade a partir da Eq. (48),

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\Delta V} = -89.07 \times \frac{10^{-9} \text{ pm}}{\text{V}} \quad (49)$$

Onde significa um desvio de 89,07 pm para cada 1000 V aplicados ao PZT.

5.3.5.1 Resultado

A Figura 5.25 mostra o resultado do primeiro experimento com o Protótipo #3.

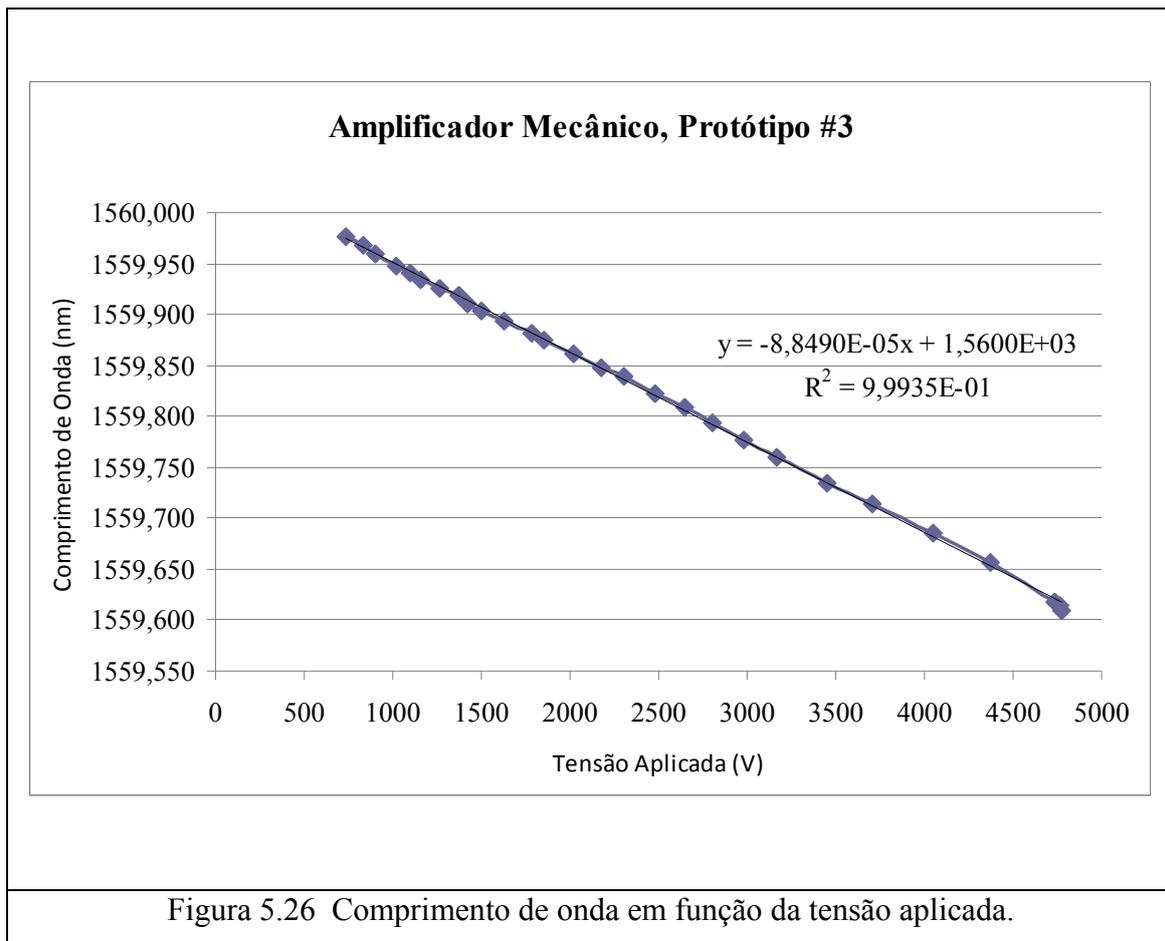


Notamos que o deslocamento de Bragg em função da tensão aplicada foi bem linear, com o coeficiente de correlação de 0,999, na faixa de tensão aplicada de 900 V a 4.700 V.

Outro experimento com o Protótipo #3 é apresentado e consiste de uma FBG em repouso, $\lambda_B = 1559,975$ nm, submersa em óleo mineral AV-60-IN (Lubrax Ind.). O óleo mineral isolante é produzido a partir de básicos naftênicos e atende às especificações da Resolução ANP nº 25/2005, sendo classificado como “óleo mineral isolante tipo A”. Sua rigidez dielétrica é de 35 kV/0,1 pol (13,8 kV/mm). Seu uso é específico para transformadores de todas as classes de tensão.

5.3.5.2. Resultado

A Figura 5.26 mostra o resultado.



Obtivemos também excelente coeficiente de correlação de 9,99 na faixa de 650 a 4770 V.

Podemos afirmar que os dois protótipos anteriores (Protótipos #1 e #2) apresentaram muitas folgas, tornando os resultados irregulares e insatisfatórios. Com o Protótipo #3 as falhas dos sistemas foram corrigidas e obtivemos resultados satisfatórios.

5.3.6. Técnica com STACK

Esta técnica consiste em agrupar um determinado número de cerâmicas, visando obter uma maior sensibilidade. O *set up* consiste de uma FBG em repouso, $\lambda_B = 1553,25$ nm, seis cerâmicas em forma de anel ($d = 6,3$ mm) coladas com cola EPO-TEK 302-3M e foram colocadas em uma estufa por 3 horas a uma temperatura de 65° C para cura. A FBG foi passada por dentro dos orifícios dos PZTs e suas extremidades coladas em duas bases de alumínio. Posteriormente, os PZTs foram interligados para aplicação de alta tensão, como pode ser observado nas Figuras 5.27 e

5.28 que mostram o diagrama esquemático do *Stack* com 6 PZTs e a fotografia, respectivamente.

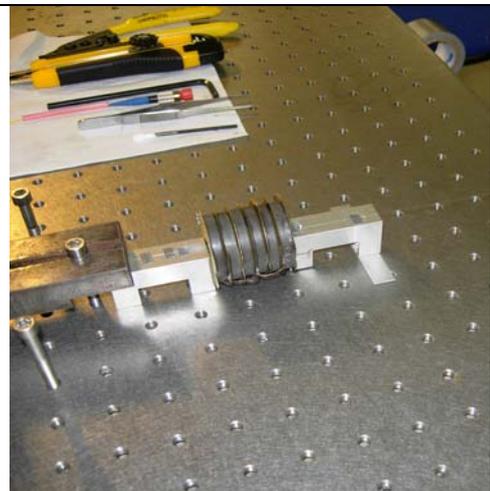
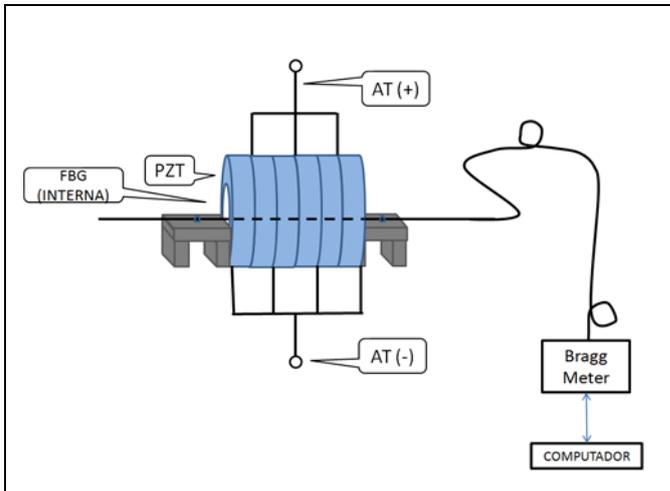


Fig 5.27 Diagrama esquemático do *STACK* com 6 PZTs

Fig 5.28 Fotografia do *STACK* com 6 PZTs

5.3.6.1. Resultado

A Figura 5.29 mostra o resultado deste experimento.

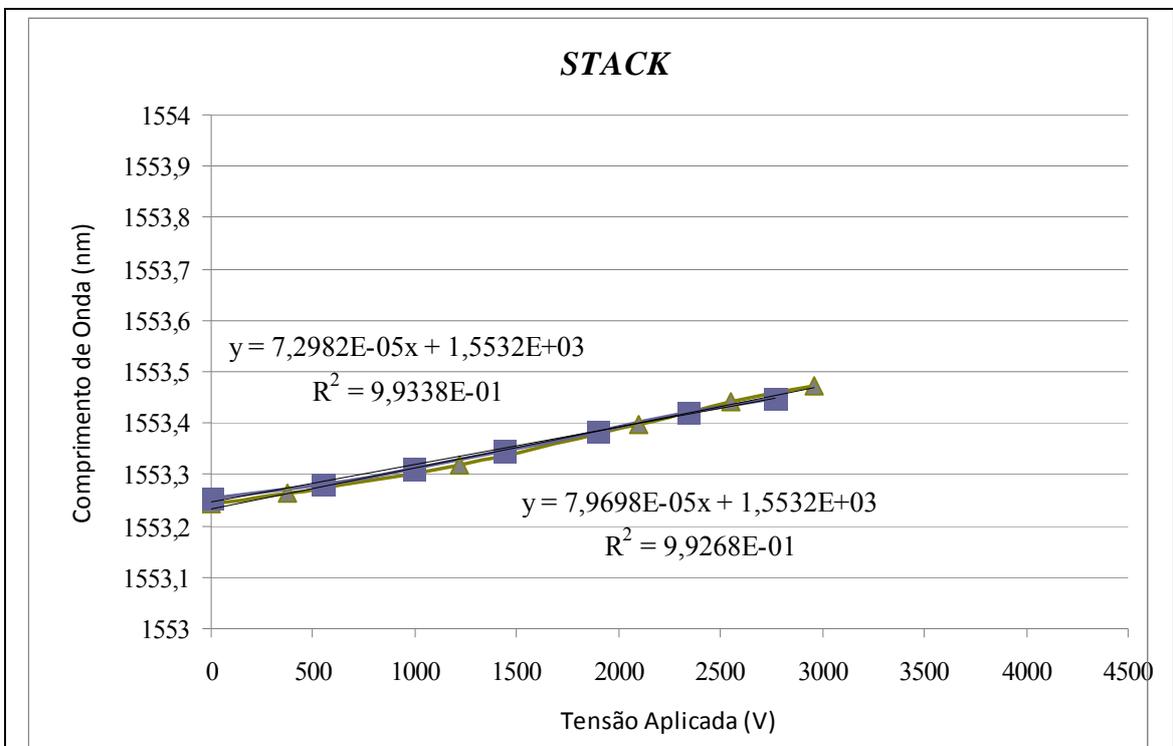


Figura 5.29 Resultado na faixa de 0 V a 2960 V.

O resultado apresentou boa sensibilidade e repetibilidade para a faixa de tensão aplicada de 0 V a 2960 V.

5.3.6.2. Técnica com *STACK* submerso em óleo

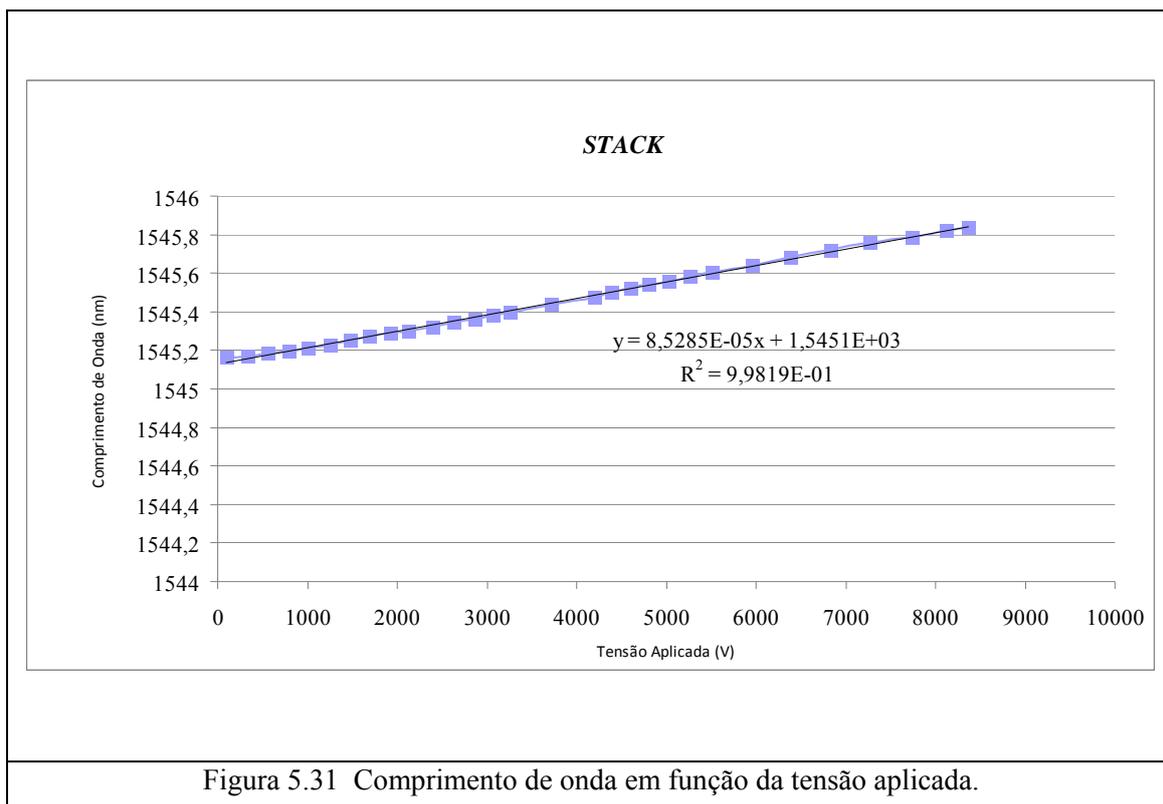
Esta técnica consiste das mesmas características do *set up* 5.3.6, com FBG com $\lambda_B = 1545,192$ nm, porém desta vez o *stack* foi submerso em óleo naftênico visando obter um aumento do valor da tensão aplicada. A Figura 5.30 mostra a fotografia do *stack* com 6 PZTs submersos em óleo.



Figura 5.30 Fotografia do *stack* submerso em óleo.

5.3.6.3. Resultado

A Figura 5.31 mostra o resultado deste experimento.



O resultado apresentou coeficiente de correlação de 9,99, boa repetibilidade e conseguimos aplicar até 8370 V.

5.3.6.4. STACK aplicando tensão nos PZTs separadamente

Este experimento tem como objetivo estudar a aplicação de alta tensão no *stack* inicialmente com 6 PZTs, mas, eliminando sequencialmente cada PZT, ou seja, ao término de cada medida eram excluídos os PZTs já ensaiados. O experimento foi iniciado com a aplicação de tensão nos 6 PZTs (ao terminar o ensaio foi eliminado 1 PZT), em seguida foi aplicada tensão em 5 PZTs (ao terminar o ensaio foram eliminados 2 PZTs) e assim, sucessivamente até chegarmos finalmente a aplicação de tensão em apenas 1 PZT. O processo de eliminação de cada cerâmica do *stack* foi realizado através de um curto circuito, que eliminava o PZT desejado do sistema. Esta técnica consiste das mesmas características do *set up* 5.3.6.2, com o *stack* submerso em óleo naftênico visando um valor máximo da tensão aplicada.

5.3.6.5. Resultado

A Figura 5.32 mostra o resultado deste experimento.

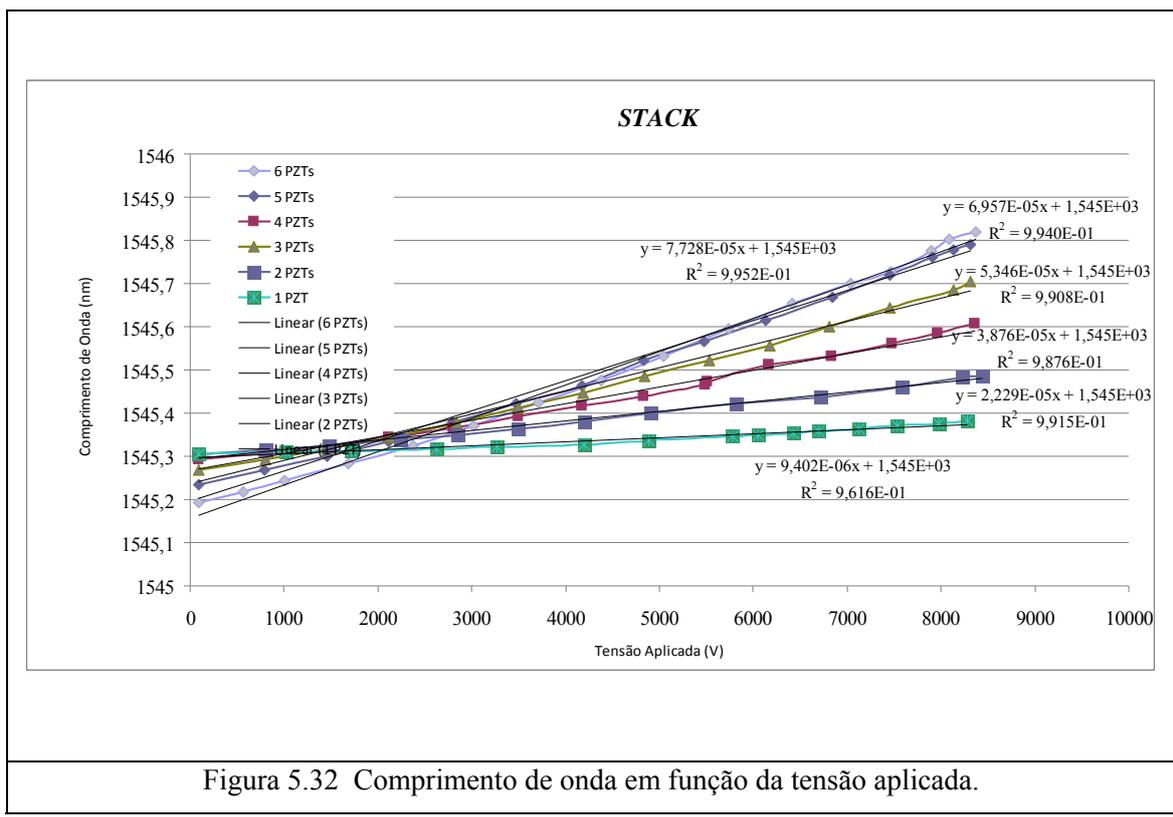


Figura 5.32 Comprimento de onda em função da tensão aplicada.

Verificamos que mesmo aplicando tensão, inicialmente com 6 PZTs e depois diminuindo o número de PZT gradativamente, ou seja, eliminando as cerâmicas uma a uma, através de um curto circuito, obtivemos um resultado coerente. Podemos observar que a cada alta tensão aplicada em um número menor de PZT a relação entre a tensão aplicada e o número de PZT diminuía. Vale mencionar que neste *set up* conseguimos aplicar um valor máximo de tensão no valor de 8440 V, devido o uso do óleo naftênico.

As tabelas a seguir reúnem as principais informações sobre os experimentos realizados com FBG-PZT.

A Tabela 5.1 mostra os parâmetros dos ensaios com FBG-PZT e *STACK*

TABELA 5.1. Parâmetros FBG-PZT com *STACK*

Parâmetros F.O.		Parâmetros PZT	
FBG (25°C)	1545,161 nm	Forma geométrica	Anel
Módulo de Young	74,52 GPa	Tipo	PZT S-4 /Tipo I (Sr)
L (Comprimento)	51,15 mm	D (diâmetro externo)	38,1 mm
A (Área)	$12,3 \times 10^{-9} \text{m}^2$	d (diâmetro interno)	12,7 mm
		x (espessura)	6,35 mm
		Máx campo elétrico direto (PI)	1-2 kV/mm
		Máx campo elétrico reverso (Morgan)	350-500 V/mm
		d_{33}	300 pm/V

Tabela 5.2. apresenta os principais parâmetros na utilização de um *STACK* para a aplicação de 1000 V.

TABELA 5.2. Principais parâmetros na utilização de *STACK*

STACK N°	$\Delta x/x$	$\Delta x = \Delta L$	$\Delta L/L$ ($\mu\epsilon$)	Ganho Calculado (pm/kV)	Ganho Medido (pm/kV)	Voltagem Máxima (V)	$E_{\text{máx}}$ (kV/mm)	$\Delta\lambda_B/\lambda_B$	$\Delta\lambda_B$ (pm)	Força (gr)
1	$47,2 \times 10^{-6}$	300 nm	5,87	7,06	9,402	8.280	1,3	4,58	7,06	0,5
2	“	600 nm	11,7	14,1	22,29	8.440	1,33	9,15	14,1	1,07
3	“	900 nm	17,6	21,2	38,76	8.360	1,32	13,7	21,2	1,61
4	“	1,2 μm	23,5	28,2	53,46	8.320	1,31	18,3	28,2	2,15
5	“	1,5 μm	29,3	35,3	69,57	8.320	1,31	22,9	35,3	2,69
6	“	1,8 μm	35,2	42,4	77,28	8.370	1,32	27,5	42,4	3,23

5.3.6.6. Discussão

Foram realizados três tipos de experimentos para medida de alta tensão através das técnicas: FBG colada e enrolada ao redor da cerâmica PZT, FBG colada no amplificador mecânico e FBG colada a um *stack*.

No primeiro experimento, somente tensão DC foi aplicada no PZT uma vez que, o interrogador óptico de Bragg usado para demodular o sinal da FBG é muito lento para responder a frequência de 60 Hz. A sensibilidade do sistema foi de 36,85 pm.

No segundo experimento, que consistiu de um amplificador mecânico visando a possibilidade de variar o ganho através da mudança da posição do parafuso de ajuste de tensão ao longo da alavanca, a sensibilidade do sistema foi de 89,07 pm, valor este superior ao experimento anterior sem o uso do amplificador mecânico.

Vale mencionar que nos experimentos em que foi utilizado óleo isolante, conseguimos alcançar valores mais altos de tensão aplicados ao PZT. No primeiro experimento (sem óleo) a tensão aplicada ficou em torno de 1000 V. Nos experimentos com óleo a tensão máxima aplicada foi de 8440 V.

Os coeficientes de correlação (R^2) obtidos variaram entre 0,9936, 0,9990 e 0,9981, para os experimentos sem amplificador mecânico, com amplificador mecânico (#3) e com *STACK*, respectivamente. Foi demonstrada muito boa correlação e repetibilidade dos resultados.

Os itens discutidos abaixo retratam os principais aspectos necessários para o desenvolvimento de um protótipo de um transformador de potencial, que pode ir além de medidas realizadas em laboratório e alcançar com sucesso aplicações em campo.

a) Sensibilidade

A sensibilidade medida nos experimentos com a fibra enrolada no PZT e usando amplificador mecânico foram inferiores ao valor teórico (-17,35 pm/kV e 36,85 pm/kV, respectivamente). Esta diferença pode ser atribuída ao fato de que a fibra ao ser enrolada no tubo PZT estava com seu revestimento primário. Contudo, o revestimento pode ser comprimido contra a parede externa do tubo e escorregar, diminuindo a deformação da fibra. A razão para manter o revestimento primário neste experimento é que ele protege a fibra, evitando torná-la quebradiça, devido a pequena curvatura do tubo PZT. Este efeito não é apresentado no experimento onde a FBG é colada e fixada somente em dois pontos no amplificador mecânico e não toca em outras partes.

b) Exatidão

Para o experimento com amplificador mecânico, notamos que existe uma boa relação entre comprimento de onda e a tensão aplicada com um coeficiente de correlação de 0,9990. Portanto inexactidões deste sistema seriam somente advindos da medida do deslocamento do comprimento de onda através do interrogador óptico de Bragg. Se, S é a sensibilidade do sensor em pm/V, uma inexactidão de 1 pm no interrogador de Bragg conduzirá a inexactidão de $1/S$ na tensão, ou seja, quanto maior for a sensibilidade, menor a inexactidão.

Para o experimento com a FBG enrolada no PZT a sensibilidade é dada pela Eq. (40), 36,85 pm por cada 1000 V aplicados no PZT. Neste caso, para uma inexactidão no comprimento de onda de 2 pm (incerteza do interrogador de Bragg), nós deveríamos ter uma inexactidão na tensão de 54,27, ou seja, cerca de 0,39 % da escala completa para linha de tensão de 13,8 kV. Obviamente, isto não é satisfatório para transformador na classe de 0,2 para aplicação em medidas de faturamento. A fim de aumentar a sensibilidade, o amplificador mecânico foi projetado de tal maneira que um deslocamento do PZT é transferido para a FBG, multiplicado pelo ganho do amplificador dado pela Eq. (44). No experimento com amplificador mecânico obtivemos uma sensibilidade de 89,07 pm para cada 1000 V aplicados no PZT conforme a Eq. (49). Então, uma inexactidão no comprimento de onda de 2 pm levará a uma inexactidão na tensão de 22,45 V. Numa linha de 13,8 kV este erro é 0,16 %, portanto atendendo a classe de 0,2 da norma de transformadores, IEC 60044-5 (*International Electrotechnical Commission*, 2004).

Uma vez que um aumento no ganho do amplificador dado pela Eq. (44) conduz a um maior nível de sensibilidade, nós podemos diminuir a distância do PZT na dobradiça do amplificador (L_2) ou diminuir o comprimento da FBG (L_{FBG}) e consequentemente diminuir a inexatidão.

c) Estabilidade Mecânica

Como poderiam as vibrações aplicadas nas configurações demonstradas, interferirem nos resultados obtidos nas aplicações em campo? O amplificador mecânico tem somente uma parte móvel, que é a alavanca superior. Esta parte foi feita de aço para ter mais alto módulo de elasticidade e com menor dimensão, para evitar uma grande massa. Desta forma, as vibrações aplicadas no amplificador mecânico será minimamente transferido para a FBG, devido a baixa inércia e alto módulo de Young da alavanca. Todas as outras partes são muito rígidas, incluindo a cerâmica PZT e a FBG, que apresenta um módulo de Young de 75 GPA, próxima ao do aço. Em um transformador de potencial ou um transformador de corrente, as vibrações são essencialmente de 60 Hz, devido ao movimento do núcleo magnético do transformador. No entanto, no caso de um TC óptico, não existirá núcleo de ferro para vibrar tornando este equipamento extremamente silencioso e não apresentando esse tipo de vibração.

d) Longevidade da fibra em aplicações em campo

Um dos componentes mais frágeis em um sistema óptico é a fibra óptica. A fibra completamente revestida é bastante resistente, mas antes do processo de inscrição da FBG, o revestimento primário é removido, porque não só absorve a radiação UV, mas também desfoca o período da grade projetada na fibra.

A deformação máxima a que uma fibra óptica pode ser submetida é determinada pela IEC60793, (*International Electrotechnical Commission*, 2008) como 1 %. Este valor é válido para as fibras intactas, mas quando uma fibra óptica está sujeita a inscrição de FBG, a exposição à radiação ultra-violeta diminui a resistência ao escoamento da sílica, como mencionado por Yoon e colaboradores (2007). Além disso, quando a fibra óptica é colada a um elemento de tração, o revestimento primário da fibra deve ser removido, caso contrário, a fibra vai escorregar dentro de seu revestimento. Desde então, a função do revestimento primário é proteger a fibra contra umidade e ruptura quando submetida a curvatura. Sendo assim, quando o revestimento é removido, tanto para a inscrição da FBG ou para ser colada em elemento submetido a

tração, a fibra óptica pode ter sua longevidade comprometida. Na realidade, a fibra sem seu revestimento se torna extremamente frágil, e particularmente quando é curvada e enrolada em volta do Cristal PZT.

O experimento com amplificador mecânico teve o maior ganho e, portanto, estabeleceu a deformação máxima na fibra com V_{in} aproximadamente de 8.000 V. A deformação está de acordo com a Eq. (47), $366 \mu\epsilon$, ou 0,037 %, o que está bem abaixo dos limites da IEC.

Mesmo com uma quantidade pequena de *stress*, quando a fibra não estiver revestida, a solução ideal é mantê-la com o revestimento sempre que possível. Algumas soluções estão disponíveis para contornar este problema. Müller e colaboradores (2008) sugerem mudar o revestimento primário da fibra (polimérico) para um revestimento metálico. Os autores depositaram cobre sobre a fibra usando a técnica de galvanoplastia. Desta forma, a fibra pode ser ligada a superfície do elemento de *stress* através de solda. Dong e colaboradores (1993) demonstraram um método de escrita durante a inscrição da FBG. Estas redes de Bragg são comercialmente conhecidas como *Draw Tower Gratings* (DTG) e estão disponíveis em alguns laboratórios. Além disso, um revestimento polimérico transparente à radiação UV foi recentemente desenvolvido. Gu e colaboradores (2006) têm demonstrado um processo a laser de fabricação de rede de Bragg, diretamente através do *buffer* da fibra usando fibra óptica com revestimento de polysiloxane e laser (pulsado de fentosegundos). Outra abordagem é o revestimento cerâmico, que é aplicado as fibras após o DTG. Porque esta cerâmica é muito rígida, estas FBGs podem ser coladas diretamente sem remoção de revestimento em uma estrutura para aplicação em sensoriamento.

e) Compensação da temperatura

É importante mencionar que a temperatura pode afetar os resultados do sensor de alta tensão, uma vez que a cada 1 °C na mudança de temperatura pode causar cerca de 14 pm referente ao deslocamento de Bragg. Desta forma, é preciso fornecer um meio para compensar as variações térmicas que ocorrem, principalmente nas aplicações em campo.

A Eq. (5) mostra que o deslocamento de Bragg é uma função de ambos, deslocamento e temperatura. Ao observar $\Delta\lambda_B$ não podemos dizer se o deslocamento foi devido à temperatura, tensão longitudinal ou de ambos. Para compensar este

deslocamento contra variações térmicas, uma solução seria usar um sensor de temperatura ligado ao PZT e aplicar o valor medido na Eq. (5). Mas, no nosso caso, não é possível utilizar um sensor de temperatura convencional pelo fato do PZT estar sob alta tensão. A alternativa é usar outra rede de FBG fixada ao PZT para medir a temperatura, mas de tal maneira que não seja submetida à tensão mecânica. Isso pode ser feito pela inserção da FBG livremente dentro de um tubo fino colada ao PZT, assim ambas estariam na mesma temperatura. As duas FBGs estarão na mesma fibra óptica e apresentarão duas diferentes reflexões, uma relacionada à temperatura e tensão longitudinal e outra relacionada somente a temperatura, para compensação. Da Eq. (5) temos para a primeira FBG:

$$\Delta\lambda_{B1} = K_{\varepsilon 1}\Delta\varepsilon + K_{T1}\Delta T \quad (50)$$

Onde:

$$K_{\varepsilon 1} = (1 - \rho_e)\lambda_{B1} \quad (51)$$

$$K_{T1} = (\alpha + \eta)\lambda_{B1} \quad (52)$$

Da mesma forma, para a outra FBG temos:

$$\Delta\lambda_{B2} = K_{\varepsilon 2}\Delta\varepsilon + K_{T2}\Delta T \quad (53)$$

Onde:

$$K_{\varepsilon 2} = (1 - \rho_e)\lambda_{B2} \quad (54)$$

$$K_{T2} = (\alpha + \eta)\lambda_{B2} \quad (55)$$

Uma vez que esta última FBG está livre da tensão longitudinal, o primeiro termo da Eq. (5) não existirá. As Equações (50) e (53) podem ser escritas em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (56)$$

A Eq. (56) pode ser chamada de matriz do deslocamento do comprimento de onda porque ela fornece o deslocamento do comprimento de onda em função da tensão longitudinal e da temperatura. Contudo, nós necessitamos encontrar a matriz sensora, que é, a tensão longitudinal e a temperatura em função do deslocamento do comprimento de onda. Multiplicando ambos os lados da Eq. (56) pelo inverso da matriz 2X2, obtemos:

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{bmatrix} \quad (57)$$

Invertendo a matriz 2X2 nós obtemos a matriz sensora:

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{\varepsilon 1} K_{T2} - K_{\varepsilon 2} K_{T1}} \begin{bmatrix} K_{T2} & -K_{T1} \\ -K_{\varepsilon 2} & K_{\varepsilon 1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{bmatrix} \quad (58)$$

Na Eq. (58) notamos que se,

$$K_{\varepsilon 1} K_{T2} \approx K_{\varepsilon 2} K_{T1} \quad (59)$$

Então nós não teríamos uma solução viável da Eq. (56) porque as Equações (50) e (53), seriam duas linhas quase paralelas. Isso aconteceria, por exemplo, se as duas FBGs tivessem os mesmos coeficientes e comprimentos de onda de Bragg e que consequentemente deslocariam igualmente. Note que as Equações (51) e (54) e (52) e (55), respectivamente, diferem somente pelo comprimento de onda de Bragg. Assim, para evitar a redundância na Eq. (59) podemos usar FBGs com reflexões de Bragg afastadas.

Agora, nós podemos resolver a Eq. (58) para tensão longitudinal e temperatura:

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{K_{\varepsilon 1} K_{T2} - K_{\varepsilon 2} K_{T1}} (K_{T2} \Delta \lambda_{B1} - K_{T1} \Delta \lambda_{B2}) \quad (60)$$

$$\Delta T = \frac{1}{K_{\varepsilon 1} K_{T2} - K_{\varepsilon 2} K_{T1}} (K_{\varepsilon 1} \Delta \lambda_{B2} - K_{\varepsilon 2} \Delta \lambda_{B1}) \quad (61)$$

A Equação (60) dá a tensão longitudinal real da FBG 1 medida por $\Delta\lambda_{B1}$, compensado contra a variação de temperatura medida por $\Delta\lambda_{B2}$. A Equação (61) dá a temperatura dos sensores. Ela pode ser usada para outras compensações, como por exemplo, a dilatação térmica das partes metálicas do *set up*.

A compensação da temperatura é importante em aplicações em DC porque o desvio causado pela variação da temperatura afetará todas as partes do sensor, produzindo desvios indesejáveis. É possível compensar a dilatação térmica das partes do amplificador mecânico usando materiais em técnicas conhecidas como efeito biomaterial. O princípio pode ser obtido quando a temperatura aumenta ao redor, onde uma tensão longitudinal negativa afrouxa a FBG produzindo um desvio do comprimento de onda de Bragg e então compensando os desvios de temperatura, demonstrado por Hsu e colaboradores (2006).

Capítulo 6. Conclusões

6.1. Sensor de temperatura

Este trabalho descreve a primeira aplicação real de uma matriz de sensores de FBG dentro de um gerador de potência totalmente operacional e ligado a rede da UHE.

O sistema começou a ser instalado na Máquina 5 da UHE Samuel em Novembro de 2007, aproveitando uma parada de sete dias da máquina para manutenção. A instalação foi concluída em Novembro de 2008 aproveitando outra janela de manutenção para troca dos retificadores.

No momento a máquina se encontra em operação e os sensores de FBG estão medindo as temperaturas dos radiadores de refrigeração do ar, que circula dentro da máquina.

Os resultados das medidas estão sendo enviados periodicamente para a Regional da Eletronorte de Belém e para o LIF/COPPE para análise.

O sistema de interrogação para o monitoramento das temperaturas foi instalado no rack do QLC da Máquina 3. Este rack foi escolhido porque a Máquina 3 fica situada no meio da usina, equidistante das Máquinas 1 e 2 de um lado e das Máquinas 4 e 5 do outro lado. Desta forma, quando houver a possibilidade de instalação desse sistema para medida de temperatura em outras máquinas, haverá uma economia no comprimento dos cabos que levam os sinais ópticos dos sensores para o sistema de interrogação.

Um fator relevante a ser mencionado é a dificuldade encontrada, quando há a necessidade de se trabalhar com máquinas em funcionamento no sistema elétrico brasileiro, pois ficamos restritos apenas ao agendamento das paradas para manutenção dos equipamentos. Normalmente, não se param máquinas apenas para instalações de sistema em pesquisa. Por esta razão, temos que nos ater somente as paradas previstas para reparo, que nem sempre são suficientes e apropriadas para as atividades de pesquisa.

Referente aos benefícios, vale destacar que atualmente é muito comum a utilização de sensores convencionais em todos os equipamentos de subestações ou usinas. Estes sensores necessitam de uma caixa próxima que recebe algum tipo de alimentação elétrica (CA ou CC) e contém uma eletrônica que recolhe os sinais, amplifica-os e os envia através de uma determinada comunicação para cada sensor convencional. Assim, temos dois fios para alimentação e mais dois para comunicação, perfazendo quatro fios por ponto de medida. Os sensores desenvolvidos neste projeto

não necessitam de energia elétrica local, são multiplexados e a grandeza é medida remotamente. Portanto somente um único cabo de fibra óptica interliga todos os sensores com o ponto de monitoramento.

Neste trabalho foi mostrado um sistema baseado em FBG para se obter a medida e o monitoramento contínuo de temperatura. O sistema foi capaz de fazer de forma confiável e precisa a medição e o monitoramento de temperatura no interior do gerador. Os resultados foram considerados satisfatórios, comprovando a utilização de sensores ópticos baseados na técnica de rede de Bragg para medida de temperatura de geradores de potência em usina hidroelétrica.

6.2. Sensor de alta tensão

Foi observado nos ensaios com o sensor de FBG sem revestimento primário, enrolado na cerâmica PZT, que a fibra óptica se torna extremamente frágil. Porém, ao colarmos a fibra no PZT com o revestimento, não é adequado, pois ela escorrega, perdendo a confiabilidade da medida.

Foi verificada a importância de não ultrapassar o valor máximo do campo elétrico na cerâmica, fornecido pelo fabricante. Primeiro, pelo fato de não ocorrer despolarização e segundo, devido a incidência de centelhamento do cristal piezoelétrico.

Os resultados que apresentaram maior sensibilidade foram realizados com o multiplicador mecânico, protótipo #3 (de pinça). E que ao utilizar óleo isolante conseguimos chegar a tensões mais elevadas (8440 V).

Podemos concluir que neste trabalho foi demonstrado um novo sistema de medida para o desenvolvimento de um transformador óptico com precisão, repetibilidade, confiabilidade e que principalmente atende a norma IEC 60044-5, parâmetros fundamentais para um instrumento apropriado para aplicação em campo. A conclusão principal é que esta configuração pode ser usada na prática como um núcleo de um transformador na classe 13,8 kV, uma vez atendendo as questões acima mencionadas. Além disso, a diferença entre a tensão máxima permitida para ser aplicada no PZT e a classe de 13,8 kV pode ser facilmente obtida através de um divisor capacitivo. O divisor também será utilizado quando o sistema for aplicado para testes na classe de 500 kV. Estes resultados são preliminares e uma configuração mais adequada está ainda em desenvolvimento. O novo *set up*, ainda em desenvolvimento, consistirá na técnica de redes gêmeas para a demodulação em tensão CA e *stack* de cerâmicas PZT para aumentar o deslocamento longitudinal, resultando em um melhor nível de precisão.

Capítulo 7. Trabalhos futuros

Este capítulo apresenta a proposta para a continuidade deste trabalho.

7.1. Medida de temperatura

- Continuidade deste projeto, através da proposta da medida e monitoramento de temperatura em todas as unidades geradoras da UHE de Samuel.
- Pontos de monitoramento: óleo do mancal, transformadores, dutos de óleo e água, turbinas e equipamentos nas subestações.
- Visando um sistema capaz de acessar a Internet, facilitando o sensoriamento remoto.

7.2. Medida de alta tensão

- Demodulação com redes gêmeas: a demodulação será efetuada através da técnica de redes de FBG gêmeas, que se resume na utilização de uma segunda rede gêmea (λ próximo) daquela à ser monitorada, medindo a potência no espectro de correlação entre as duas. Inviável demodular com o interrogador óptico (Spectral Eye-400, FOS&S), pois a velocidade é insuficiente para operar em CA.
- Primeiramente, será desenvolvido um protótipo para a tensão de 13,8 kV para a validação da tecnologia. Entretanto, a tecnologia adotada poderá ser aplicada para qualquer tensão na classe EAT (500 kV).
- Projetar um DCP (divisor capacitivo de potencial) devido à diferença entre o valor máximo de tensão permitido pelo PZT e as tensões que serão medidas.
- Caracterização e calibração do protótipo para o levantamento dos seguintes parâmetros: sensibilidade, espalhamento, repetibilidade e linearidade.
- Visando validar o sistema com normas específicas.

Capítulo 8. Referências

8.1. FBG

Archambault, Dong, L., Reekie, J. L., Russel, L., Payne, P. S. J., “Single-pulse Bragg gratings written during fibre drawing”, *Electronics Letters* 29 (17): 1577-1578, 1993.

Archambault, J. L., Reekie, L., Russell, P.S.J., “100-percent reflectivity Bragg reflector produced in optical fibres by single excimer-laser pulses” *Electronic Letters* 29 (5): 453-455, 1993.

Askins, C. G. et al, em “Fiber Bragg reflectors prepared by a single excimer pulse”, *Opt. Lett.* 17, 11, 833-835, 1992.

Atkins, C. G., Putnam, M. A. e Friebele, E. J., “Instrumentation for interrogation many-element fiber Bragg grating arrays”, *Proc. SPIE*, vol. 2444, pp. 257-257, 1995.

Barbosa, C. L. et al, “Técnica da máscara de fase para a fabricação de grades de Bragg em fibras ópticas” *Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, 9, João Pessoa-PB, 2000.

Barbosa, C. L. et al, “Fabricação e Caracterização de grades de Bragg através do uso da técnica da máscara de fase”, *Revista Científica Periódica – Telecomunicações*, 2000.

Besley, J. A., Wang, T., Reekie, L., “Fiber cladding mode sensitivity characterization for long-period gratings”, *Journal of Lightwave Technology*, 21 (3): 848-853 Mar, 2003.

Betz, D. C., Thursby, G., Culshaw, B., Staszewski, W. J., “Acousto-ultrasonic sensing using fiber Bragg gratings”, *Smart Materials and Structures*, v. 12, p. 122-128, 2003.

Bjerkkan, Leif, “Application of fiber-optical Bragg grating sensors in monitoring environmental loads of overhead power transmission lines”, *Optical Society of America (OCIS codes: 060.2370, 120.7280, 010.3920)*, 2000.

Canning, J., Sommer, K. e Englund, M., “Fibre gratings for high temperature sensor applications”, *Meas. Sci. Technol.* 12, 824-828, 2001.

Carneiro, E. e Girão, F., “Centro de Massa e aplicações à geometria”, *VII Semana Olímpica, UFMG-BH*, 2004.

Caucheteur, C., Chah, K., Lhommé, F., Blondel, M. e Mégret, P., “Autocorrelation demodulation technique for fiber Bragg grating sensor”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, nº. 10, 2004.

Cazo, R. M. et al, “Sensor de deformação usando grades de Bragg”, *Revista Científica Periódica-Telecomunicações*, vol. 03, nº 02, dezembro, 2000.

Culshaw, B., “Fiber Optics in Sensing and Measurement”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, no. 6, pp 1014-1021, 2000.

Culshaw, B., “Fiber optics in sensing and measurements”, *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 6 (6): 1014-1021 Nov-Dec, 2000.

Delgado-Pinar, M., Zalvidea, D., Díez, A., Péres-Millán, P., Andrés, M. V., “Q-switching of an all-fiber laser by acoustic modulation of a fiber Bragg grating”, *Opt. Express*, v. 14, p. 1106-1112, 2006.

- Erdogan, T., "Fiber Grating Spectra", *Journal of Lightwave Technology* 15 (8): 1277-1294: 10.1109/50.618322, 1997.
- Ezbiri, A., Kanellopoulos, S. E. e Handerek, V. A., "High resolution instrumentation system for fibre-Bragg grating aerospace sensors", *Opt. Commun.*, vol. 150, pp. 43-48, 1998.
- Farnoosh Rahmatian, Member, IEEE, Patrick P. Chavez and Nicolas A. F. Jaeger, Member IEEE, "230 KV optical voltage transducers using multiple electric field sensors", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no 2, April, 2002.
- Flannery, B., Press, W. H., Teukolsky, S., Vetterling, W., "Numerical Recipes in C", New York, Cambridge University Press, 1992.
- G. Meltz, W.W. Moorey, W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method", *Optics Letters*, v. 14, pp. 823-825, 1989.
- Grabarski, L., Silva, J. C. C. da e Kalinowski, H. J., "Estatic and dinamic measurements using a simple fiber Bragg grating interrogation unit", *SBA Controle & Automação*, (v., pp., ANO)
- Grosso, P., Bosc, D., "Bragg grating photo-writing method suitable for ITU grid wavelengths", *Optics Communications* 214, 129-132, 2002.
- Hill, K. O. et al, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication", *Appl. Phys. Lett.* 32, 647, 1978.
- Hill, K. O., Malo, B., Bilodeau, F., Johnson, D. C., Albert, J., "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask", *Appl. Phys. Lett.* v.62, p. 1035-1037, 1993.
- Hill, K. O., Meltz, G., "Fiber Bragg Gratings Technology: Fundamentals and Overview", *J. Lightwave Technol.*, v. 15, pp. 1263-1276, 1997.
- Hill, O. K. L. et al, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fibre by LTV exposure through a phase mask", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pp. 1035-7, 1993.
- Huang, C., Jing, W. J., Liu, K., Zhang, Y. e Peng, Gang-Ding, "Demodulation of fiber Bragg grating sensor using cross-correlation algorithm", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, n°. 9, 2007.
- Jeffrey D. Bull, Student Member IEEE, Nicolas A. F. Jaeger, Member IEEE and Farnoosh Rahmatian, Member IEEE, "A new hybrid current sensor for high-voltage applications", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no 1, January 2005.
- Jobmann, M. et al, "Fibre Optic Monitoring Systems for Operational Safety Requirements of Underground Waste Disposal Sites", *Distec 98*, Hamburg, Germany, 9-11 September, 1998.
- Kalinowski, H. J., Fabris, J. L., Müller, M., "Desenvolvimento de sensores com redes foto refrativas em fibra óptica para o setor de petróleo", *II Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás*, RJ, Junho, 2003.
- Kalinowski, H. J. et al, "Sistema de Leitura de Redes de Bragg para Medidas Estáticas e Dinâmicas", *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, vol. 17, no. 1, Março, 2004.
- Kanellopoulos, Soliris E., Handerek, Vincent A., e Rogers, Alan J., "Simultaneous strain and temperature sensing with photogenerated in fiber gratings", *Vol. 20, No. 3/ Optics Letters*, February, 1995.

- Kashyap, R., "Fiber Bragg Grating", Academic Press, 1999.
- Kashyap, R., "Photosensitive Optical Fibers: Devices and Applications", *Opt. Fiber Technology*, 1, 17-34, 1994.
- Kashyap, R., Wyatt, R. et al, "Wideband gain attenuated erbium fibre amplifier using a photosensitive fibre blazed grating", *Electron. Lett.*, v. 29, pp. 154-6, 1993.
- Kersey A. et al, "Fiber Grating Sensors", *Lightwave Technol.*, v. 15, n° 08, pp. 1442-1463, 1997.
- Kersey, A. D., and Marrone, M. J., "Fibre Bragg high-magnetic-field probe", in *Proc. 10th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Glasgow, UK, 53-56, 1994.
- Kersey, A. D., Davis, Michael A., Patrick, Heather J., LeBlanc, Michel, Koo, K. P., Member, IEEE, C.G. Askins, M. A. Putnam, and E. Joseph Friebele, "Fiber Grating Sensors", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, No. 8, pp. 1442-1463, august, 1997.
- Klemba, F., "Sensores ópticos a fibra aplicados a área de petróleo", Tese de Mestrado, UTFPR, Curitiba, PR, 2005.
- Lam, D. K. W. and Garside, B. K., "Characterization of single-mode optical fiber filters", *Applied Optics*, 20, 3, 440-445, 1981.
- Laudati, A., Mennella, F., Giordano, M., D'altrui, G., Tassini, C. C., Cusano, A., "A fiber-optic Bragg grating seismic sensor", *Photonics Technol. Letters*, v. 19, n° 24, p. 1991-1993, 2007.
- LeBlanc, M. et al, em "Distributed strain measurement based on a fiber Bragg grating and its reflection spectrum analysis", *Opt. Lett.* 21, 17, 1405-1407, 1996.
- Lemaire, P.L. et al, "High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres", *Elect. Lett.* 29, 13, 1191-1193, 1993.
- Masters, T., Neural, "Novel & Hybrid Algorithms for time series prediction", New York, John Wiley & Sons, 1995.
- Melle, S. M., Liu, K., and Measures, R. M., "Practical fiber-optic Bragg grating strain gauge system", *Appl. Opt.* 32, 3601-3609, 1993.
- Meltz, G. et al, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", *Opt. Lett.* 14, 15, 823-825, 1989.
- Morey, W.W., Meltz, G. and Glenn W. H., "Fibre optic Bragg grating sensors", in *Fiber Optic and Laser Sensors VII*, Proc. SPIE 1169, 98-107, Boston, USA, 1989.
- Morikawa, S. R. K. et al, "Triaxial Bragg Accelerometer", XV International Conference on Optical Fiber Sensors, pp. 95-98, Portland, Oregon, EUA, 2002.
- Niewczas P., Willshire, A. J., Dziuda, L., McDonald, J. R., "Performance analysis of the fiber Bragg grating interrogation system based on an arrayed waveguide grating", IEEE Instrumentation and Measurement, Technology Conference, Colorado, USA, 2003.
- Nunes, L.C.S., Valente, L. C. G., Braga, A. M., "Analysis of a demodulation system for fiber Bragg grating sensor using two fixed filters", *Optics and Laser in Engineering*, v. 42, pp. 529-542, 2004.

- Othonos, A. and Kalli, K., "Inscribing Bragg gratings in optical fiber, in "Fiber Bragg Gratings", Cap 4, pp. 149-170, Artech House, Boston, USA, 1999.
- Othonos, A. e Kalli, K., "Fiber Bragg Gratings – Fundamentals and applications in telecommunications and sensing", Artech House, 1999.
- Paterno, A. S. et al, "Approximation methods of optical spectra: an analysis of the application of constructive RBF networks in fiber optic sensing", Learning and Nonlinear Models - Revista da Sociedade Brasileira de Redes Neurais (SBRN), vol. 3, n° 2, pp.61-70, 2005.
- Patrick P. Chavez, Nicolas A. F. Jaeger, Member IEEE and Farnoosh Rahmatian, Member IEEE, "Accurate voltage measurement by the quadrature method", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, January 2003.
- Rao, Y. J. et al, "Strain sensing of modern composite materials with a spatial/wavelength-division multiplexed fiber grating network", Opt. Lett. 21, 9, 683-685, 1996.
- Rao, Y. J., Henderson, P. J., Jackson, D. A. et al, "Simultaneous strain, temperature and vibration measurement using a multiplexed in-fibre-Bragg-grating/fibre Fabry-Perot System", Electron. Lett. 33, 24, 2063, 1997.
- Rao, Y. J., Webb, D. J, Jackson, D. A., Zhang, L. and Bennion, I., "In-fiber Bragg-grating temperature sensor system for medical applications", J. Lightwave Technol. 15, 779-784, 1997.
- Rego, G., Okhotnikov, O., Dianov, E., Sulimov, V., "High-temperature stability of long-period fiber gratings produced using an electric arc", Journal of Lightwave Technology, 19 (10): 1574-1579 Oct, 2001.
- Ricetti, R., Buschle, M. S., Kuller, F., Muller, M., Fabris, J. L., "Interrogation system intensity coded for Bragg grating based sensors", XXIX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2006.
- Silva, C. C. da, Martelli C., Diesel, B. W., Fabris, J. L., Kalinowski, H. J., Goothoff, N. e Canning, J., "Termômetro de alta temperatura (0 – 400 °C) baseado em redes de Bragg em fibra óptica para aplicação no setor de petróleo", III Seminário Nacional de Controle e Automação: industrial, elétrico e de telecomunicações, Salvador, 2003.
- Simpson, A. G., Kalli, K., Zhou, K., Zhang, L., Bennion I., "An ideal method for the fabrication of temperature compensating IA-I strain sensors", OFS16, 2003.
- Simpson, A.G., "Optical fibre sensors and their interrogation", Ph.D Thesis, Aston University, 2005.
- Sinclair, I., "Sensors and Transducers – A guide for technicians, BSP, 1988.
- Telecommunications and Sensing", Artech House, 1999.
- Udd, E., "Fiber Optic Sensors: an introduction for engineers and scientists", by John Wiley & Sons, Inc, 1991.
- Valente, L. C. G., Silva, L. C. N. da, Ribeiro, A. S., Triques, A., Regazzi, R. D. e Braga, A. M. B., "Técnicas de leitura para sensores a fibra óptica baseados em redes de Bragg, 6a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos-COTEQ, Salvador, 2002.
- Wang, Z. J., Zhou, Y., Wang, X. W., Jin, W., "A fiber-optic Bragg grating sensor for simultaneous static and dynamic temperature measurement on a heated cylinder in

cross-flow”, International Journal of heat and mass transfer, 46 (16): 2983-2922 Jul, 2003.

Werneck, M. M., “Transdutores e Interfaces”, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 1996.

Werneck, M. M., Maciel, F. L., Allil, R. C. S. B., Carvalho, C. C., Yugue, E. S., Guimarães C. R. F. e Mandello, P. R., “Desenvolvimento de tecnologia óptica para medição multiponto de temperatura em filtros de harmônicos”, I Seminário de P&D de FURNAS, RJ, Março, 2009.

Xu, M. G., Reekie, L., Chow, Y. T. and Dakin, J. P., “Optical in-fibre grating high pressure sensor”, Electron. Lett. 29, 398-399, 1993.

Zhang, P., Cerecedo-Nunez, H. H., Pickrell, Qi. B., Pickrell, G., Wang, A. B., “Optical time-domain reflectometry interrogation of multiplexing low-reflectance Bragg-grating-based sensor system”, Optical Engineering, 42 (6):1597-1603 Jun, 2003.

Zhao, Y., Liao, Y. B., Lai, S. R., “Simultaneous measurement of down-hole high pressure and temperature with a bulk-modulus and FBG sensor”, IEEE Photonics Technology Letters, 14 (11): 1584-1586 Nov, 2002.

Zhao, Y., Liao, Y., “Discrimination methods and Demodulation Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors”, Optics and Lasers in Engineering, 2003.

Teses:

Cazo, R. M., “Sistemas interrogadores de sensores baseados em grade de Bragg”, Tese de mestrado/Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA, São José dos Campos, 2001.

Junior, P. T. N., “Análise temporal do espectro óptico em redes de Bragg em fibra”, Ph.D. Thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, 2008.

Silva, J. C. C. da, “Monitoração de vibrações de estruturas com o emprego de sensores em fibra óptica”, Ph.D. Thesis, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 2005.

Normas, Manuais e Handbook:

Handbook of Optical Fiber and Cables

IEC 60793-1-1, “Optical Fibres-Part 1-1: Measurement methods and test procedures-General and guidance”, International Electrotechnical Commission, 2008.

BICSI - Building Industry Consulting Service international - LAN Design Manual Telecommunications Distribution Methods Manual, Vol. I, II. Murata, Hiroshi - Handbook of Optical Fibers and Cables.

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers - Optical Fiber Technology ANSI/TIA/EIA Telecommunications Building Wiring Standards ANSI/TIA/EIA-568-A Commercial Building Standards for Telecommunications Cabling Standards (October, 1995) TIA/EIA TSB-72 Centralized Optical Fiber Cabling Guidelines - Draft (September, 1995).

Manual do Interrogador óptico (Spectraleye-400, FOS&S)

Halliday, 1997

Sistemas de Medição, Capítulo 4, Certificação Digital N° 0015622/CA, PUC-RJ (AUTORES E DATA)

Carmelo, J. A. B. F., Capítulo X, Sistemas de Comunicações Ópticas, Comunicação Digital I, Escola Politécnica de Pernambuco – UPE (DATA)

Links:

http://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_Grating

<http://directindustry.com/prod/safty-electronic-technology/platinum-resistivity-temperature-probe-39472-396043.html>

<http://picotech.com/applications/pt100.html>

<http://www.iupac.org>

<http://www.glassproperties.com>

http://engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html

<http://www.britglass.co.uk/recycling>

<http://Doremus.com>

<http://www.zirtec.com.br/areia/silica.htm>

[http://wikipedia.org/wiki/tabela de conversão](http://wikipedia.org/wiki/tabela_de_conversao)

8.2. FBG e PZT

Barros, I. N. – “Introdução à Teoria de Transdutores Hidroacústicos” – Parte I, Instituto de Pesquisas da Marinha-IPqM, Rio de Janeiro, 1991.

Buchanan, R.C., “Ceramic Materials for Electronics, Processing, Properties and Applications”, New York and Basel, 1986.

C. J. Sun, W. M. Myers, K. M. Schmidt, S. Sumida, and K. P. Jackson, "High Silica Waveguides on Alumina Substrates for Hybrid Optoelectronic Integration". IEEE

Cady, W. G., “Piezoelectricity: an introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals, Dover Press, 1964.

Gallego, J., Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers, J. Phys. E:Sci. Instrum., 22, 804-816, 1989.

Halliday, R., Fundamentals of Physics, 5th Ed. Extended, Wiley 1997;

Ian G. PLATT and Ian M. WOODHEAD, “The Use of Bragg Gratings in the Core and Cladding of Optical Fibres for Accurate Strain Sensing”. Sensors & Transducers Journal (www.sensorsportal.com), Volume 90, Special Issue, April 2008.

International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). <http://www.iupac.org/>;

IUPAC Compendium of Chemical Terminology - the Gold Book. Internet edition <http://goldbook.iupac.org/>;

Jaffe, B., Cook, W. R. E., et al, “Piezoelectric Ceramics”, Academic Press, London and New York, 1971.

Kuide Qin, "Multi-Scale Modeling of the Slurry Flow and the Material Removal in Chemical Mechanical Polishing". Dissertation of PhD, Graduate School of the University of Florida, 2003.

Marteletto, M. "Procedimentos Práticos de Caracterização de Cerâmicas Piezoelétricas", Anais do 36º Congresso Brasileiro de Cerâmica, vol.II, pp.741, Caxambú, MG, Junho, 1992.

Marteletto, M., Barros, I. N. e Sittrop, N., "Teste de Produção Laboratorial de Amostras Piezocerâmicas Normatizadas", Anais do 38º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Santa Catarina, Blumenau, Junho, 1994.

Photonics Technology Letters, vol. 4, n° 6, June, 1992.

Santos, M. A. P., "Síntese e Caracterização de cerâmica piezoelétrica tipo PZT utilizada em transdutores eletroacústicos a partir de insumos nacionais", Dissertação de Mestrado, PEMM/COPPE/UF RJ, 1998.

Statistical Calculation and Development of Glass Properties. Glassproperties.com.

Suslick, K. S., "The chemical effects of ultrasound, Scientific American, February, 1989.

Villegas, M. G., "Preparacion y Estudio de Materiales Ceramicos Piezoelétricos del Sistema $PbZrO_3 - PBTiO_3$ (PZT) y Relaxores del Sistema $PB (Mg_{1/3} (Nb_{2/3}))O_3 - PB ZrO_3 - Pb TiO_3$ (PMN-PZT)", Tese D.Sc Química, Inst. de Ceramica y Vidrio, Universidad Autónoma de Madri, Facultad de Ciências Químicas, 1993.

Werneck, M. M., "Transdutores e Interfaces", LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 1996.

Manuais, Livros e Handbook:

Standards on Piezoelectrics Crystal: Measurements of Piezoelectric Ceramics, 1961).

Weast, Robert, Ed., "CRC Handbook of Chemistry and Physics, 1st Edition", CRC Press, Inc, 1988.

Links:

<http://www.atcp.com.br>

<http://www.piceramic.com>

http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html(<http://www.fibercore.com/05hb-hbp.php>)

<http://www.nist.gov/data/materials.htm>- NIST - National Institute of Standards and Technology

ANEXOS

1- Processamento de Sinais e Software: Sensor Bragg

2- Artigos em Congressos

3- Publicação em Periódicos Internacionais

4- Tabelas

5- Instalação do Software do interrogador óptico de Bragg

ANEXO 1. Processamento de Sinais e Software – Sensor Bragg

Software para Monitoramento do Deslocamento do Comprimento de Onda de Bragg para Medição da Temperatura Interna de Geradores de Potência

RESUMO

O presente relatório descreve o trabalho realizado ao longo do projeto *Software para Monitoramento do Deslocamento do Comprimento de Onda de Bragg para Medição da Temperatura Interna de Geradores de Potência* pela HB Pinto Estudos e Pesquisas Ltda. para o Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF).

Este relatório consolidado aborda de maneira sucinta todas as fases do projeto, desde a especificação e os objetivos do trabalho, passando pela metodologia implementada e chegando ao software desenvolvido, com dada especial ênfase a este último item.

CONTEÚDO

1	INTRODUÇÃO	3
2	REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA	3
3	PROCESSAMENTO E ANÁLISE DO ESPECTRO ÓTICO.....	4
4	ALGORITMO DESENVOLVIDO	5
5	DESCRIÇÃO DO SOFTWARE DESENVOLVIDO	5
5.1	ESPECIFICAÇÃO DO SOFTWARE.....	6
5.1.1	<i>Apresentação.....</i>	6
5.1.2	<i>Arquivos de Dados.....</i>	6
5.1.3	<i>Rotinas</i>	7
5.1.4	<i>Condições de Operação</i>	7
5.1.5	<i>Informações programáveis (Painel de Controle).....</i>	7
5.2	SOFTWARE DESENVOLVIDO	8
5.2.1	<i>Instalação.....</i>	11
5.2.2	<i>Configuração do Programa: Aquisição dos ensaios térmicos e das respostas do interrogador óptico.....</i>	11
5.2.3	<i>Calibração</i>	12
5.2.4	<i>Tela de controle</i>	18
5.2.5	<i>Tela de gráficos.....</i>	18
6	CONCLUSÃO	22
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
	ANEXO I – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO	24
	ANEXO II – RELATÓRIO DE CALIBRAÇÃO	25

1 Introdução

O objetivo deste trabalho reside na descrição das atividades realizadas no desenvolvimento do projeto *Software para Análise do Espectro Óptico de Redes de Bragg para Medição da Temperatura Interna de Geradores de Potência*. Visto que os aspectos teóricos do projeto já foram extensamente discutidos no Relatório de Atividades do Projeto Número 1, neste trabalho será dada ênfase especial ao software desenvolvido, com as questões acerca da metodologia implementada sendo mencionadas de forma sucinta.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. No item 2, são resumidamente apresentadas as redes de Bragg em fibra óptica. Questões sobre o processamento e análise do espectro óptico são assuntos do item 3. O software desenvolvido é motivo de discussão dos itens subsequentes, com o algoritmo implementado, incluindo processamento e análise do espectro óptico, calibração e medição, sendo apresentado no item 4, e a descrição e apresentação do software cabendo ao item 5.

2 Redes de Bragg em Fibra Óptica

Redes de Bragg em fibra óptica são formadas por uma modulação periódica e longitudinal no índice de refração da fibra [1], [2]. Essa modulação provoca a reflexão seletiva de uma banda estreita de luz, centrada no comprimento de onda de Bragg, λ_B da rede, o qual sofre mudança quando a rede é submetida à ação de agentes externos, tais como deformação longitudinal ou temperatura, resultando em um deslocamento espectral do comprimento de onda de Bragg, λ_B .

A relação direta entre variações na temperatura e variações em λ_B permite a utilização destes dispositivos como sensores de temperatura, podendo ser citadas as seguintes vantagens [3]:

- Imunidade à interferência eletromagnética;
- Isolamento elétrico;
- Sensoriamento remoto;
- Acesso em ambientes exíguos;
- Inertes quimicamente e imunes a corrosão;
- Flexibilidade;
- Capacidade de multiplexação de vários sensores;
- Faixa de temperatura elevada;
- Medidas em tempo real de temperatura dentro de equipamentos de potência.

Para utilização destes dispositivos como sensores de temperatura, é necessária a estimação do deslocamento espectral do comprimento de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$. A partir destes espectros, deve ser determinada a respectiva variação $\Delta\lambda_B$ gerada em virtude da variação ΔT na temperatura, obtendo assim a medição de temperatura desejada.

3 Processamento e Análise do Espectro Ótico

Conforme mencionado na seção anterior, é necessária a determinação do comprimento de onda de Bragg a partir das informações espectrais. Dado o espectro, existem diversas soluções na literatura para determinação da variação no comprimento de onda de Bragg $\Delta\lambda_B$, podendo ser citados: a medição direta do pico, o cálculo do centróide do espectro e conseqüente determinação do comprimento de onda associado, aproximações funcionais do espectro e conseqüente determinação do pico destas funções, que podem ser polinomiais ou gaussianas [2], [7], [8], [9], [10], e aproximações não-paramétricas baseadas em técnicas de inteligência artificial, como redes neurais [11].

Medição direta do pico do espectro e estimativa do comprimento de onda central através do cálculo do centróide do espectro são de simples implementação, porém com aplicabilidade e precisão comprometidas na presença de ruído.

Técnicas de filtragem do espectro ótico baseadas em aproximações paramétricas, através de funções polinomiais ou gaussianas, não são eficientes devido a restrições impostas pela própria estrutura.

Técnicas não-paramétricas apresentam maior flexibilidade e maior robustez na presença de dados ruidosos. Aproximações baseadas em redes neurais requerem um elevado custo computacional, comprometendo sua utilização em aplicações em tempo real. Uma técnica não-paramétrica comumente utilizada para filtragem espectral consiste no filtro de *Savitzky-Golay* [12]. Diante da flexibilidade apresentada por este filtro para aproximação espectral, juntamente com o reduzido custo computacional requerido para implementação e operação do mesmo, para filtragem dos espectros óticos oriundos das redes de Bragg foi implementado um filtro de *Savitzky-Golay* de segunda ordem e comprimento médio igual a 16.

A partir dos dados filtrados, foram testadas duas técnicas para estimação do comprimento de onda de Bragg $\Delta\lambda_B$, mais especificamente a medição direta e o cálculo do centróide. A técnica baseada no cálculo do centróide foi a que apresentou melhor desempenho em relação ao ajuste da reta de calibração, sendo então escolhida para ser implementada no software final.

Determinado o centróide λ_c de um espectro ótico de um sensor com comprimento de onda de Bragg λ_B , está estimada a variação $\Delta\lambda_B$ associada à variação de temperatura ΔT desejada. Para determinação da variação de temperatura ΔT , é necessária a estimação da curva de calibração do sensor. Esta curva pode ser estimada utilizando um modelo de regressão linear ou através da interpolação de uma tabela de calibração específica para cada sensor.

Definido o sistema de processamento e análise do espectro ótico a ser utilizado, incluindo o procedimento para filtragem dos dados, o algoritmo para cálculo da variação $\Delta\lambda_B$ e as técnicas para estimação da curva de calibração, o algoritmo desenvolvido pode ser resumido de forma sucinta, conforme apresentado na próxima seção.

4 Algoritmo desenvolvido

Conforme descrito na seção anterior, o espectro ótico fornecido pela rede de Bragg deve ser processado e analisado, podendo assim estimar as respectivas temperaturas. Desta forma, para conversão da informação de comprimento de onda em informação de temperatura, é necessária a estimação de uma reta de calibração ou a criação de uma tabela de calibração. Estimada a reta ou criada a tabela de calibração, o algoritmo está apto a estimar um conjunto de temperaturas a partir de um dado espectro óptico. A Figura 1 apresenta um fluxograma descrevendo as tarefas a serem realizadas pelo algoritmo. O algoritmo desenvolvido para processamento e análise dos espectros óticos oriundos das redes de Bragg pode ser resumido no fluxograma apresentado na Figura 2. Após o processamento do espectro, é necessária a estimativa da reta de calibração ou criação da tabela de calibração. A descrição de cada um dos passos do algoritmo foi apresentada no Relatório de Atividades do Projeto Número 1.

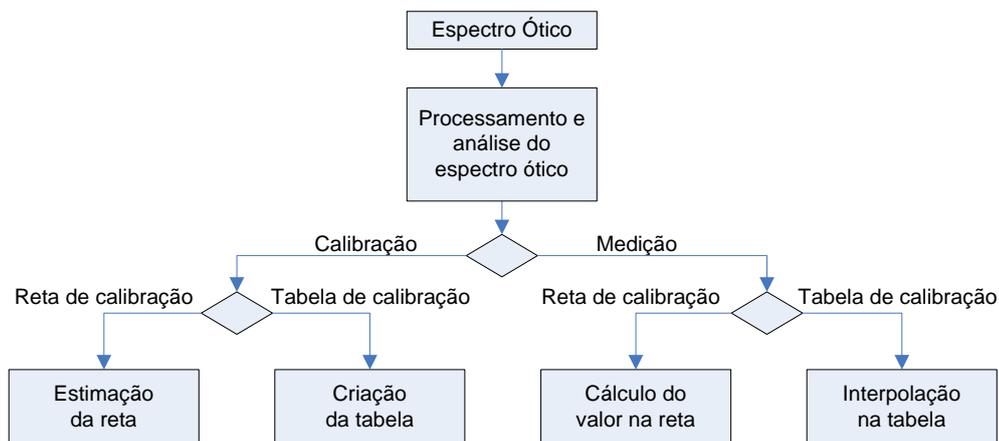


Figura 1 – Fluxograma do algoritmo para processamento e análise do espectro ótico

5 Descrição do software desenvolvido

O software desenvolvido neste projeto será apresentado nesta seção. Inicialmente, será apresentada a especificação do software, incluindo uma apresentação geral do programa desenvolvido, os arquivos de dados a serem utilizados e/ou gerados pelo programa, as rotinas implementadas, as condições de operação e algumas informações programáveis. Em seguida, será apresentado o software desenvolvido, incluindo suas funcionalidades, interfaces com usuário e saídas geradas pelo programa.



Figura 2 – Fluxograma do algoritmo para processamento e análise do espectro óptico

5.1 Especificação do software

5.1.1 Apresentação

O programa apresenta sempre duas telas em tempo real que podem ser vistas alternadas através da tecla TAB. A TELA 1 é o painel de controle e a TELA 2 é a Tela Gráfica. O Painel de Controle contém os parâmetros programáveis tais como, níveis de alarme, mensagens de execução e mensagens de possíveis erros de processamento. A Tela Gráfica apresenta a variação de temperatura de cada sensor contra o tempo.

5.1.2 Arquivos de Dados

1. FOSS.txt – Contém as aquisições do interrogador óptico.
2. Calibra_Temperatura.txt – Contém a tabela de calibração.
3. Temperatura x Tempo-ano_mes.txt – contém a variação da temperatura contra o tempo para cada mês.

4. Parametros_usuario-n.txt – Guarda os parâmetros do usuário utilizados para o controle do programa, podendo haver vários arquivos diferenciados pelo “n”.
5. Centroides-ano_mes.txt - Contém os centróides de Bragg x Tempo.

5.1.3 Rotinas

A rotina principal seguirá a seguinte ordem:

1. Lê parâmetros de controle previamente gravados pelo usuário (arquivo Parametros_usuario-n.txt), podendo haver diferentes conjuntos de parâmetros diferenciados pelo “n”. O Painel de Controle pede para o usuário informar o arquivo de dados, podendo salvar novos arquivos com diferentes configurações.
2. Lê arquivo “FOSS.txt”.
3. Identifica duas últimas aquisições.
4. Identifica os picos de acordo com os parâmetros do usuário.
5. Calcula o comprimento de onda de centróide de cada pico ($\lambda_{c1}, \lambda_{c2}, \dots, \lambda_{cn}$).
6. Armazena dados no arquivo “Centroides-ano_mes.txt” que contém os centróides de Bragg x Tempo ($\lambda_{c1}, \lambda_{c2}, \dots, \lambda_{cn}$) versus tempo (ano, mês, dia, hora, minuto, segundo).
7. Lê tabela de calibração no arquivo “Calibra_Temperatura.txt”.
8. Calcula pela tabela de calibração as temperaturas (T1, T2, ..., Tn).
9. Armazena dados no arquivo “Temperatura x Tempo-ano_mes.txt”.
10. Plota na TELA 2 o gráfico Temperatura X Tempo (A, M, D, H, m, s) para cada um dos n sensores.
11. Apaga o arquivo “FOSS.txt”.
12. Cada 24 horas gera um novo gráfico.

5.1.4 Condições de Operação

1. Ao apresentar a tela de programação o programa de aquisição não interrompe.
2. Haverá um ícone de impressão em ambas as telas.
3. O software identificará a ausência de pico, desta forma evitando leitura incorreta, informando o erro no Painel de Controle.
4. O software deverá gerar mensagens de erro em casos em que o cálculo da centróide apresentar valores fora dos intervalos de confiança.

5.1.5 Informações programáveis (Painel de Controle)

1. Intervalos de confiança onde os picos deveriam se encontrar (Eixo y em mW e Eixo x em nm).
2. Periodicidade do cálculo dos centróides.

3. Escala de tempo do gráfico.
4. Número de sensores que serão utilizados.
5. Comprimento de onda aproximado (λ) em nm de cada sensor a 25° C.
6. Os limiares de identificação dos picos.
7. Dois níveis de alarme: Advertência e Trip para cada sensor.
8. Lê arquivo de controle (“Parametros_usuario-n.txt”).
9. Salva novas configurações de controle no arquivo “Parametros_usuario-n.txt”.

5.2 Software Desenvolvido

O programa *SensorBragg* foi desenvolvido para monitoramento do deslocamento do comprimento de onda de Bragg visando a medição da temperatura interna de geradores de potência. O software foi desenvolvido em linguagem C e C++, utilizando a biblioteca *wxWidgets* para implementação de suas interfaces gráficas. Esta biblioteca, também conhecida como *wxWindows*, é um utilitário para a criação de *widgets* multi-plataforma e com código livre, características adequadas às aplicações atuais, marcadas pelo elevado grau de usabilidade e portabilidade devido à grande variedade de tipos de usuários existentes.

Todas as rotinas especificadas na seção 5.1 foram implementadas. Além das especificações requeridas, foi desenvolvida uma opção para o usuário relacionada à calibração do sensor, que pode ser realizada via tabela de calibração ou através de um modelo de regressão linear, conforme apresentado na seção 3.

O programa apresenta uma tela principal, contendo três telas, a saber: controle, relatório e gráficos. Estas telas são acessíveis em tempo real, podendo ser visualizadas alternadamente usando o mouse ou através das teclas ALT/TAB. A tela principal também apresenta três menus, Arquivo, Gráfico e Ferramentas. O primeiro menu, Arquivo, é responsável pelo gerenciamento de informações de usuários. O menu Gráfico gerencia algumas funcionalidades da tela de gráficos. O terceiro e último, Ferramentas, inclui configurações gerais do programa, como leitura de arquivos, e configurações do bloco de calibração. Os sinais verde, amarelo e vermelho presentes na tela principal informam quando as temperaturas estão abaixo do nível de advertência, acima deste nível e acima do nível de alarme, respectivamente. Estes sinais estão localizados no canto superior direito da tela principal, conforme evidenciado na Figura 3. O ícone de impressão, localizado no canto superior esquerdo da tela principal, é responsável pela impressão do relatório de medição, apresentando no Anexo I. Este relatório também pode ser impresso selecionando a opção *Imprimir* do menu *Arquivo* da tela principal.

A tela de controle, apresentada na Figura 3 e na Figura 4, contém os parâmetros programáveis, tais como níveis de alarme, mensagem de execução e mensagem de erro. A tela de relatórios, ou tela de log, apresentada na Figura 5, apresenta as medições e os seus respectivos status de erro. A tela de gráficos, apresentada na Figura 6, apresenta a evolução da temperatura medida por cada sensor ao longo do tempo, juntamente com os níveis de advertência e alarme.

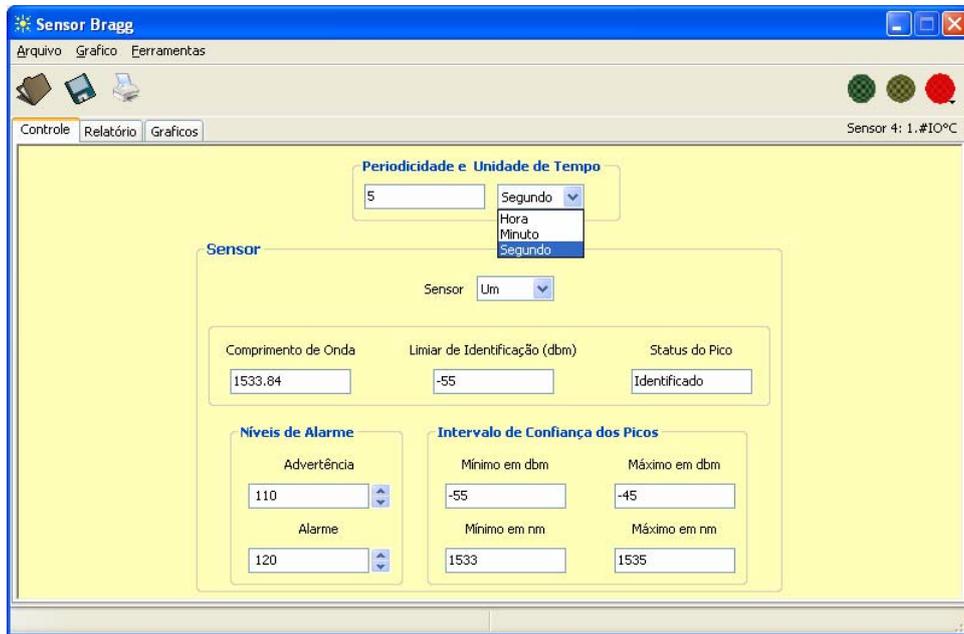


Figura 3 – Tela de controle, módulo básico do Programa *SensorBragg*

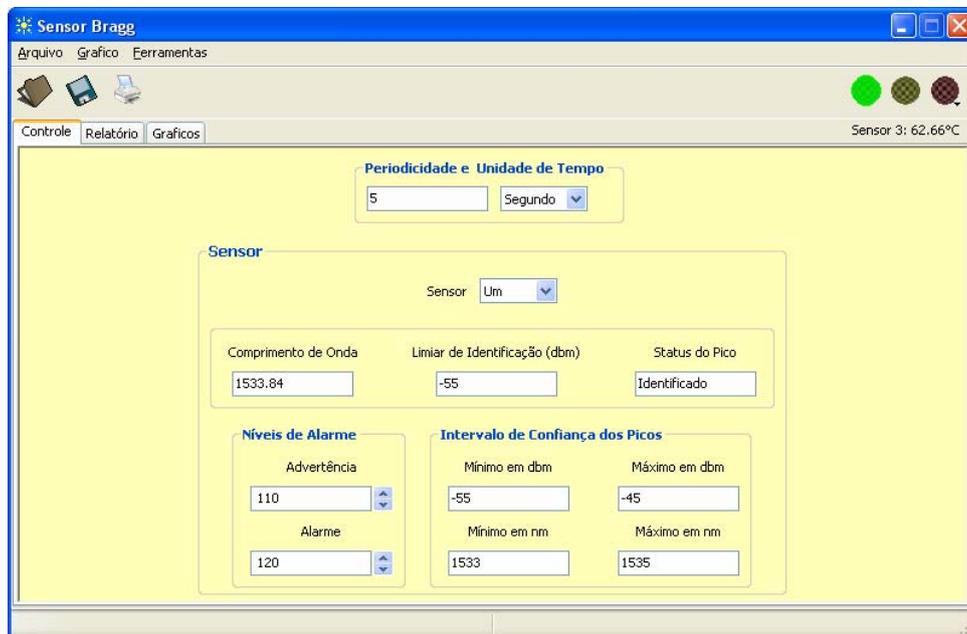


Figura 4 – Tela de controle, módulo básico do Programa *SensorBragg*

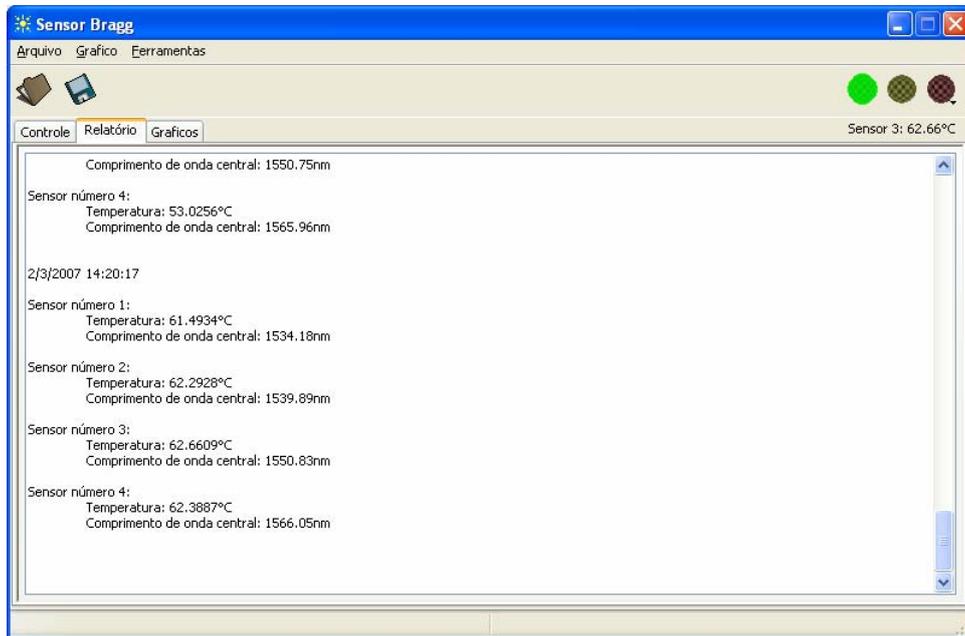


Figura 5 – Tela de log, módulos básicos do Programa *SensorBragg*.

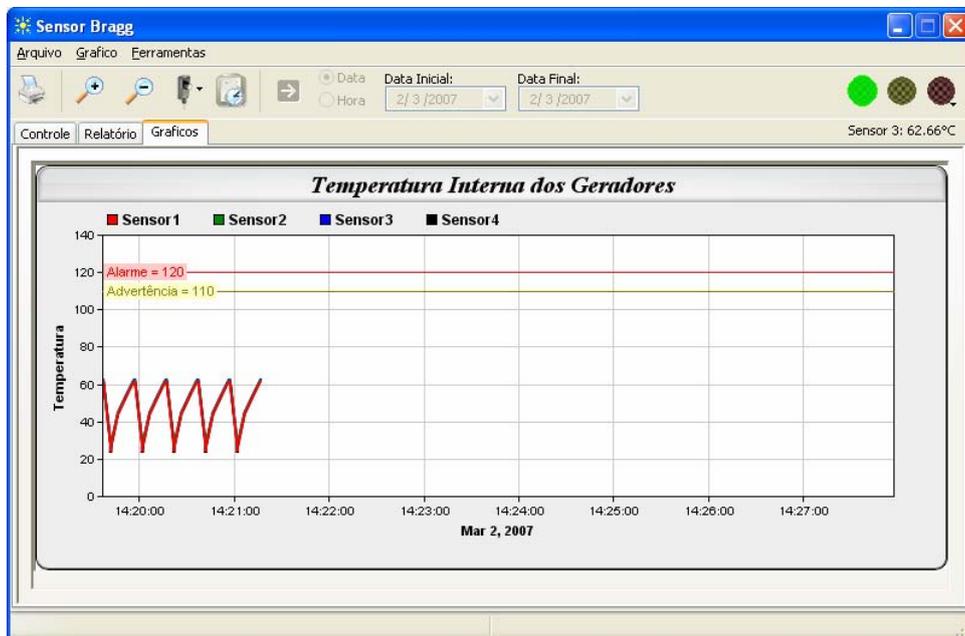


Figura 6 – Tela de gráficos, módulo básico do Programa *SensorBragg*.

Maiores detalhes sobre estas telas, assim como todas as demais funcionalidades do programa, são apresentadas nos itens seguintes.

5.2.1 Instalação

Para instalação do programa *SensorBragg*, é necessária a execução do programa *setupSensorBragg.exe*, localizado no diretório *raiz* do CD de instalação. A instalação é iniciada automaticamente a partir da execução deste programa. A configuração recomendada para adequada instalação e utilização do programa consiste em um microcomputador Pentium IV (ou equivalente) com um mínimo de 1 [Gbyte] de memória RAM e sistema operacional Windows XP.

Após a instalação, é necessária a importação dos arquivos texto correspondentes aos ensaios térmicos realizados com os sensores FBG, para que a calibração dos mesmos possa ser efetuada. No CD de instalação, dentro do diretório *Calibração*, estão localizados os arquivos texto contendo as informações fornecidas no início do projeto acerca dos ensaios térmicos realizados pela equipe do LIF. Estas informações podem ser carregadas pelo usuário para calibração inicial dos sensores.

5.2.2 Configuração do Programa: Aquisição dos ensaios térmicos e das respostas do interrogador óptico

Ao executar o programa pela primeira vez, a tela inicial, apresentada na Figura 7, é ativada. Nesta tela, o usuário deve escolher o arquivo com suas configurações, digitando o nome completo deste arquivo, ou então procurando o mesmo através do botão *Abrir*. Para iniciar o programa sempre com o usuário especificado, a opção *Iniciar Sempre com Este Usuário* deve ser selecionada. Novos perfis de usuário podem ser criados a partir do botão *Novo*, apresentado na Figura 7. Para calibração inicial dos sensores antes da utilização do programa, a opção *Realizar calibração inicial* deve ser escolhida. Vale ressaltar que é necessária a configuração do programa, através do arquivo de configurações do usuário, antes de ser realizada a calibração. O menu *Ferramentas* da tela principal, conforme ilustrado na Figura 8, disponibiliza funções para alterar as configurações do usuário, como também para realização de novas calibrações à medida que novos ensaios vão sendo disponibilizados.

Para alterar as configurações do programa posteriormente, deve ser escolhida a opção *Configuração* no menu *Ferramentas* da tela principal, conforme apresentado na Figura 8. Esta seleção ativa a janela apresentada na Figura 9, onde o usuário pode escolher diversas opções, como tipo de *token* para leitura dos arquivos, nível de precisão da leitura dos dados (número de casas decimais a serem lidas), arquivo de configurações de um dado usuário já existente, número de sensores a serem lidos em um dado espectro óptico (número de ciclos) e o diretório onde estão armazenados os arquivos de dados (*spectrum-1.txt*). Para concluir esta operação, é recomendada a seleção da opção *Salvar Usuário* no menu *Arquivo* da tela principal, da forma apresentada na Figura 10. Esta operação dá origem à tela da Figura 11, onde o usuário deve especificar o nome do arquivo onde serão salvas as suas configurações.

5.2.3 Calibração

Conforme mencionado no item 4, a partir de dados oriundos de ensaios térmicos realizados com os sensores, é necessária a estimação de uma curva ou tabela de calibração, a qual será responsável pelo fornecimento da informação de temperatura em virtude das variações dos comprimentos de onda medidos.

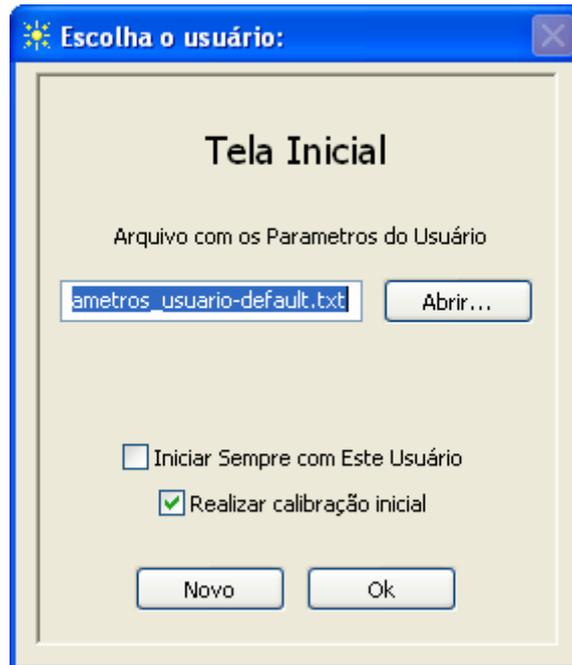


Figura 7 – Tela de inicial do Programa *SensorBragg*.

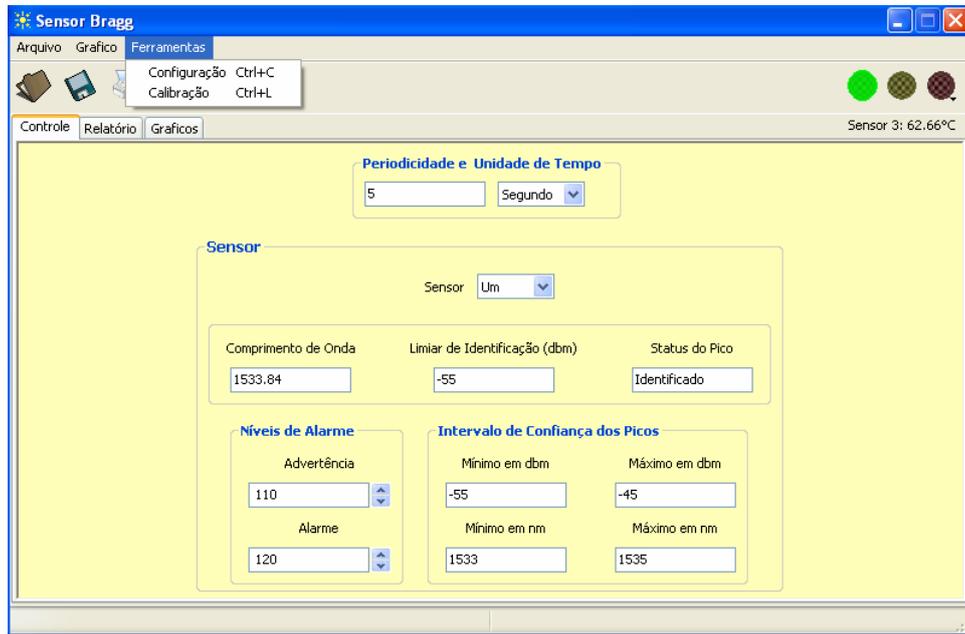


Figura 8 – Seleção do menu Ferramentas da tela principal do Programa *SensorBragg*.

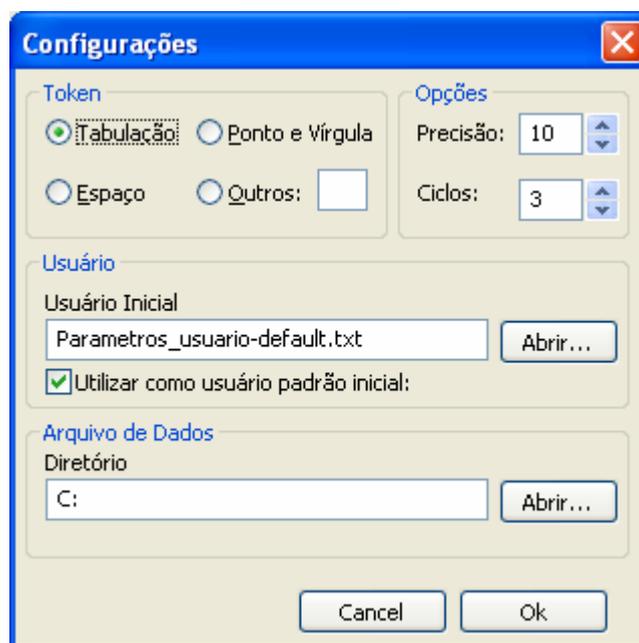


Figura 9 – Tela de configuração do Programa *SensorBragg*.

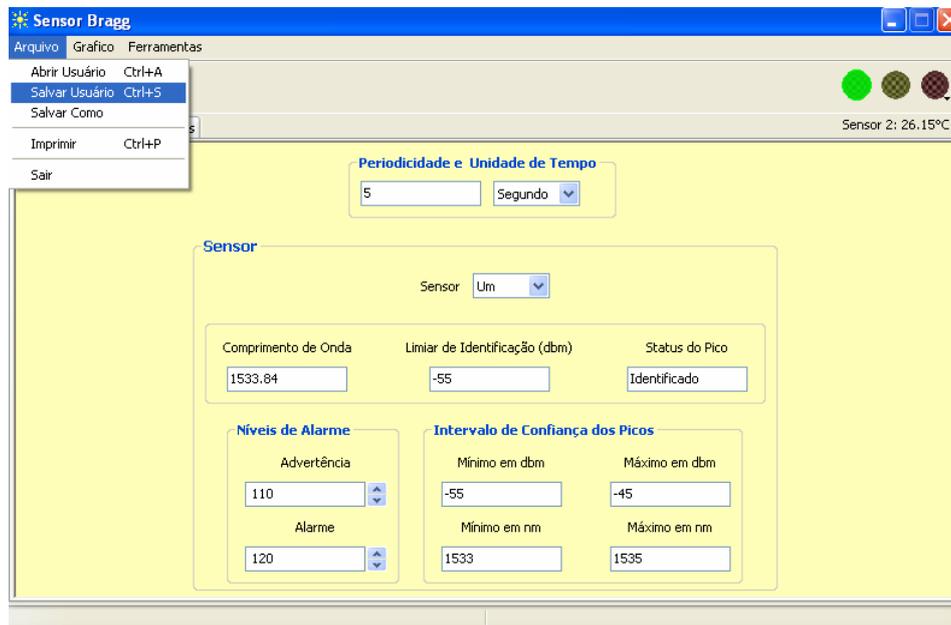


Figura 10 – Opção *Salvar Usuário* do menu *Arquivo* na tela principal do Programa *SensorBragg*.

Para calibração dos sensores, deve ser escolhida a opção *Calibração* no menu *Ferramentas* da tela principal, conforme ilustrado na Figura 8. Surgirá então a tela de boas vindas à calibração, mostrada na Figura 12. A seleção da opção *next* dá origem à tela da Figura 13, onde o usuário deve selecionar os arquivos de dados, todos do tipo *.txt*, a serem utilizados no processo de calibração. Para seleção dos arquivos, o usuário deve digitar seus nomes ou clicar no botão *Abrir*, operação esta que ativa a tela da Figura 14, onde podem então ser escolhidos os arquivos para calibração. Escolhidos os arquivos, a opção *next* dá continuidade ao processo de calibração.

Antes da obtenção da tabela de calibração, é necessária a definição dos limiares de identificação e dos intervalos de confiança de cada sensor. A Figura 15 apresenta a tela para escolha dos limiares de identificação, a qual é feita selecionando a opção correspondente ao respectivo sensor. Em seguida, o valor do limiar do sensor escolhido, em [dB], deve ser inserido manualmente pelo usuário. Escolhidos os limiares, a opção *next* permite avançar ao processo de escolha dos intervalos de confiança.

O intervalo de confiança de cada sensor é escolhido na tela da Figura 16. Nesta tela, o usuário pode escolher o sensor cujo intervalo de confiança será especificado selecionando o menu *Escolha o sensor* no canto superior esquerdo. Escolhido o sensor, os limites dos intervalos de confiança para a potência do espectro, em [dB], e para o comprimento de onda, em [nm], devem ser especificados manualmente pelo usuário. Especificados os intervalos de confiança de cada sensor, a opção *next* ativa a tela apresentada na Figura 17, que mostra a tabela de calibração estimada. A opção *Imprimir* nesta tela permite ao usuário a impressão de um relatório de calibração, apresentado no Anexo II.

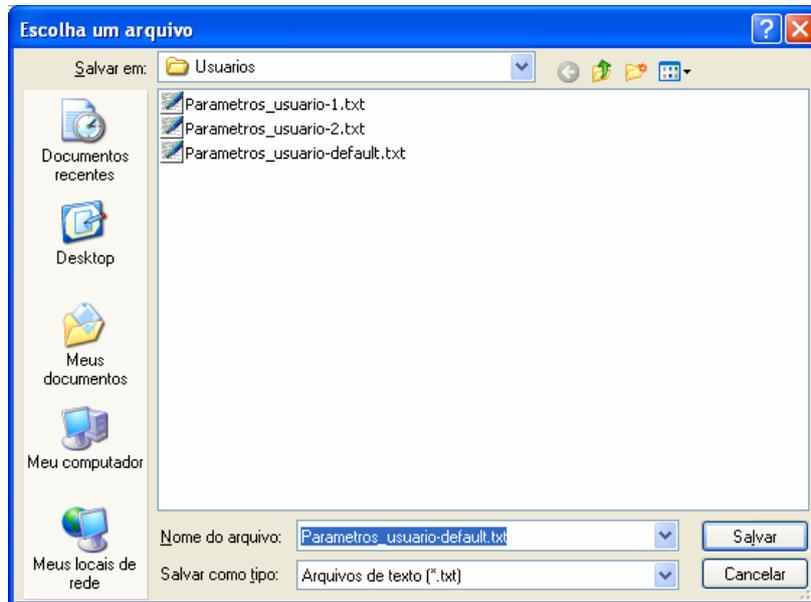


Figura 11 – Escolha do nome do arquivo onde serão salvas as configurações do usuário.

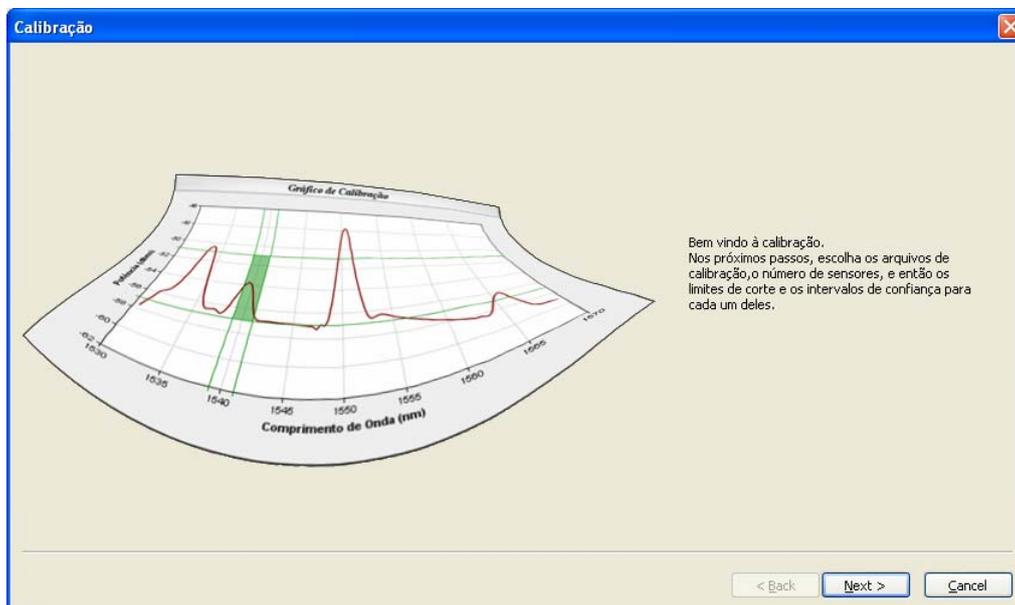


Figura 12 – Tela de boas vindas à calibração.

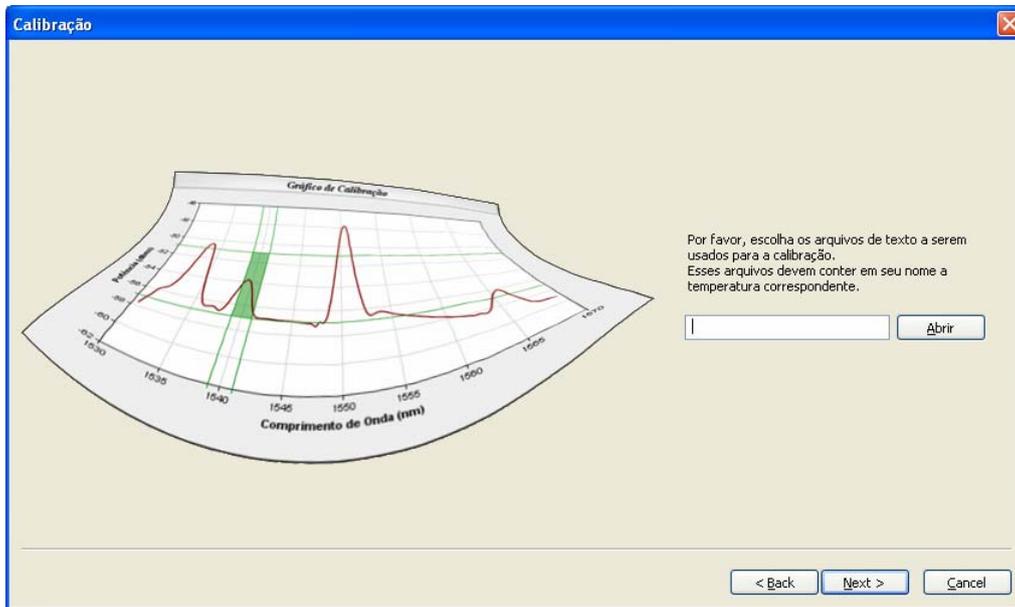


Figura 13 – Seleção dos arquivos textos pra calibração.

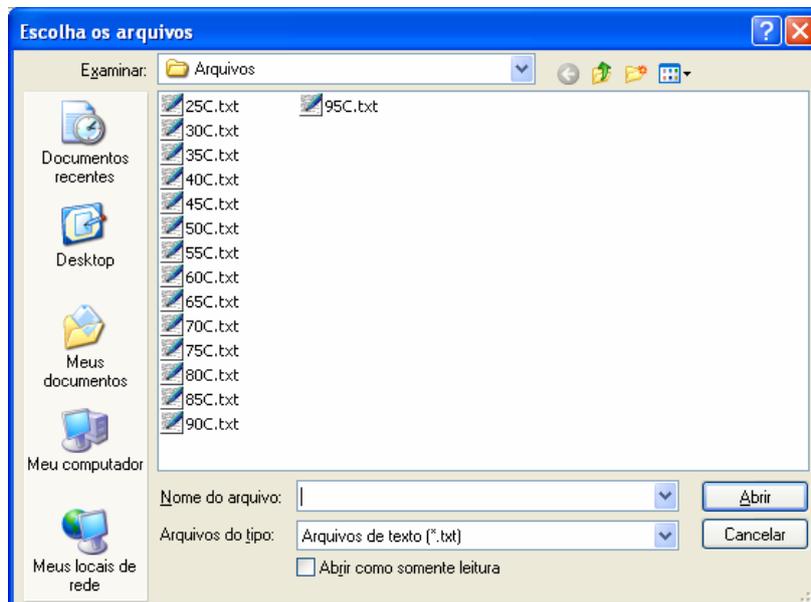


Figura 14 – Arquivos disponíveis para calibração.

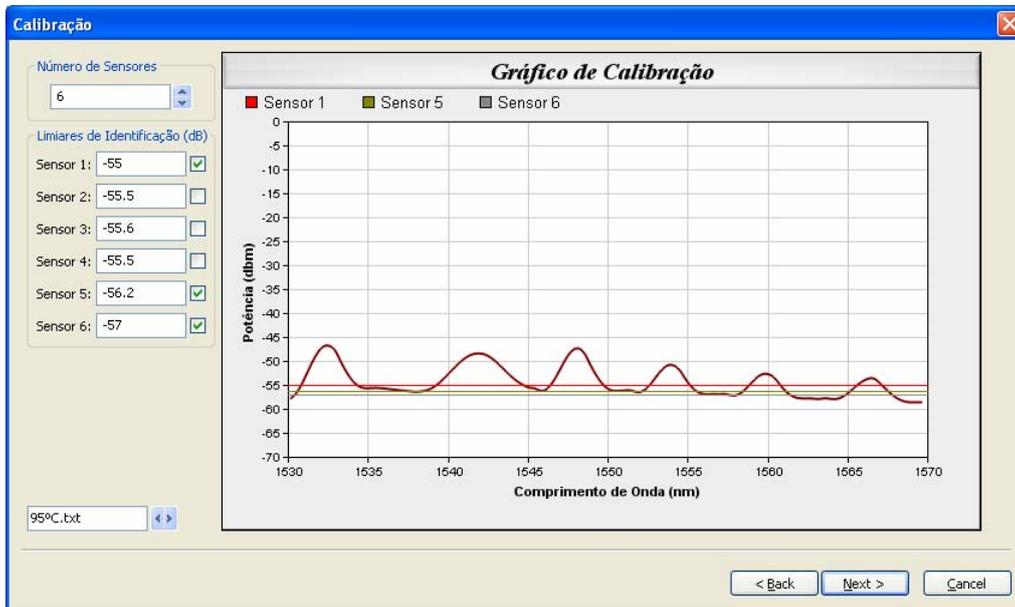


Figura 15 – Escolha dos limiars de identificação.

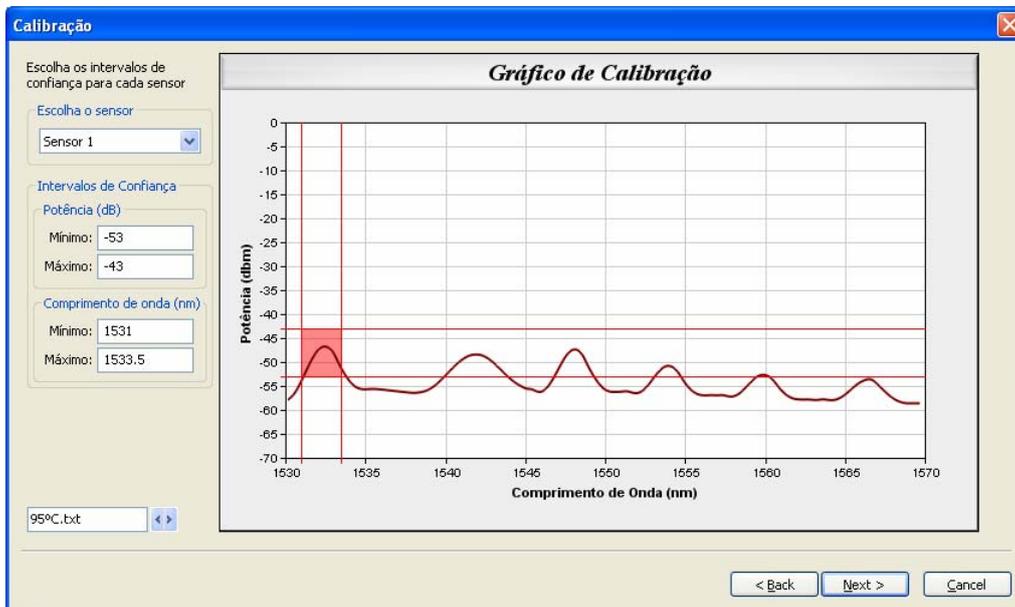


Figura 16 – Escolha dos intervalos de confiança.

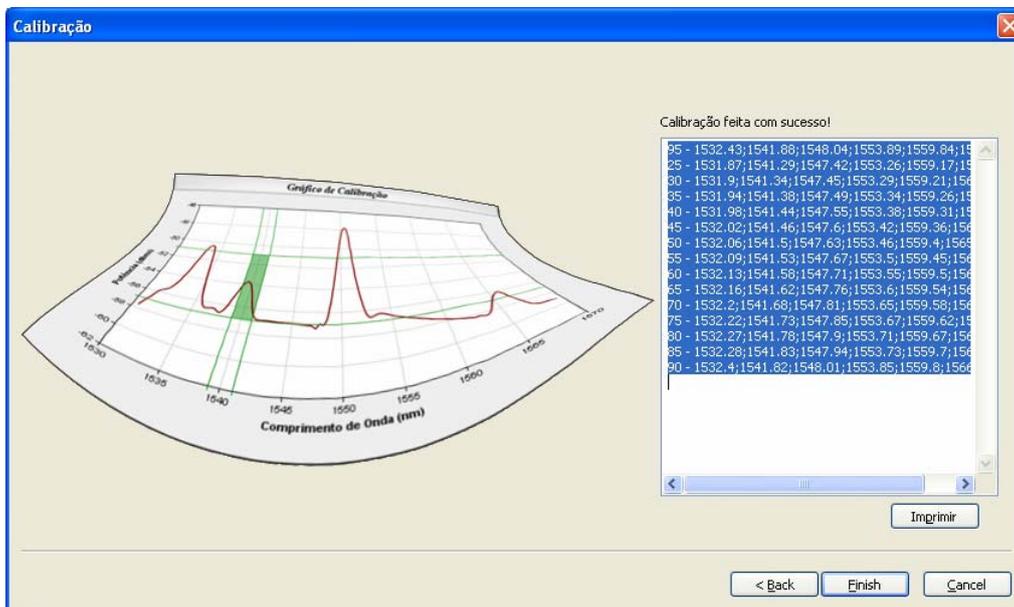


Figura 17 – Tabela de calibração obtida.

5.2.4 Tela de controle

Esta tela, apresentada na Figura 18, é utilizada para especificação de diversos parâmetros do programa, a saber: níveis de alarme, periodicidade da leitura, número de sensores visualizados, limiar de identificação e intervalo de confiança de cada sensor. Além destes parâmetros, esta tela apresenta uma mensagem relacionada com o status do pico do espectro medido. Conforme mencionado anteriormente, alguns destes parâmetros, como limiares de identificação e intervalos de confiança, são definidos na fase de calibração do programa.

5.2.5 Tela de gráficos

A tela de gráficos apresenta a evolução da temperatura de cada sensor ao longo do tempo, juntamente com os níveis de advertência, alarme e com a temperatura máxima verificada até o momento. A Figura 18 mostra um exemplo da evolução da temperatura medida por um dado sensor ao longo do tempo. No canto superior direito desta Figura, abaixo dos sinais de alarme, juntamente com a identificação do sensor é apresentada a temperatura máxima medida. Para impressão do gráfico, deve ser selecionada a opção *Imprimir* do menu *Arquivo* da tela principal.

O menu *Gráfico* na tela principal, conforme ilustrado na Figura 20, apresenta opções de inserção ou retirada de sensores da tela de visualização gráfica, seleção de visualização de histórico e itens para ampliação ou redução do gráfico.

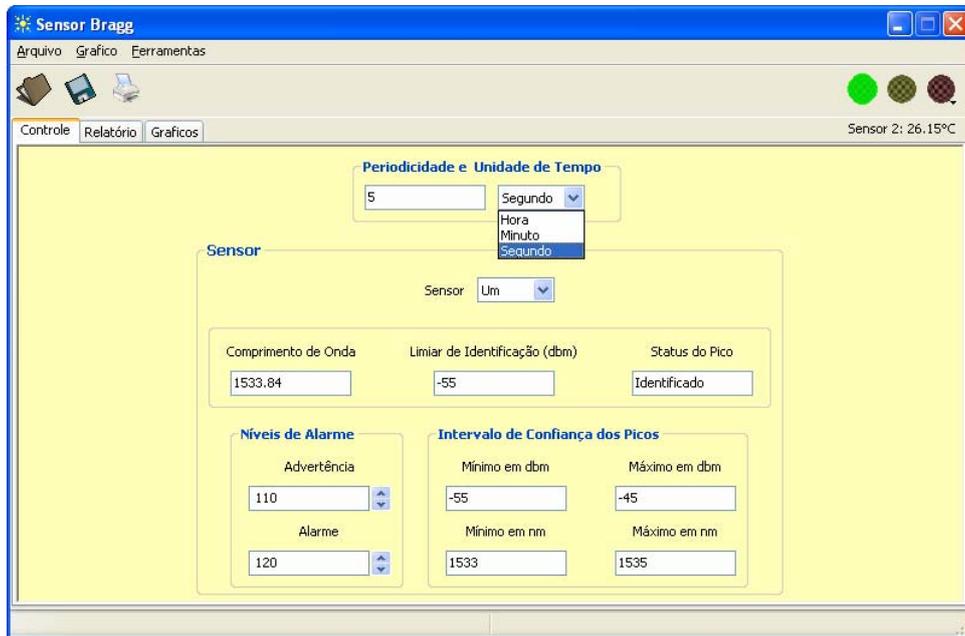


Figura 18 – Tela de controle: especificação da periodicidade da leitura da temperatura.

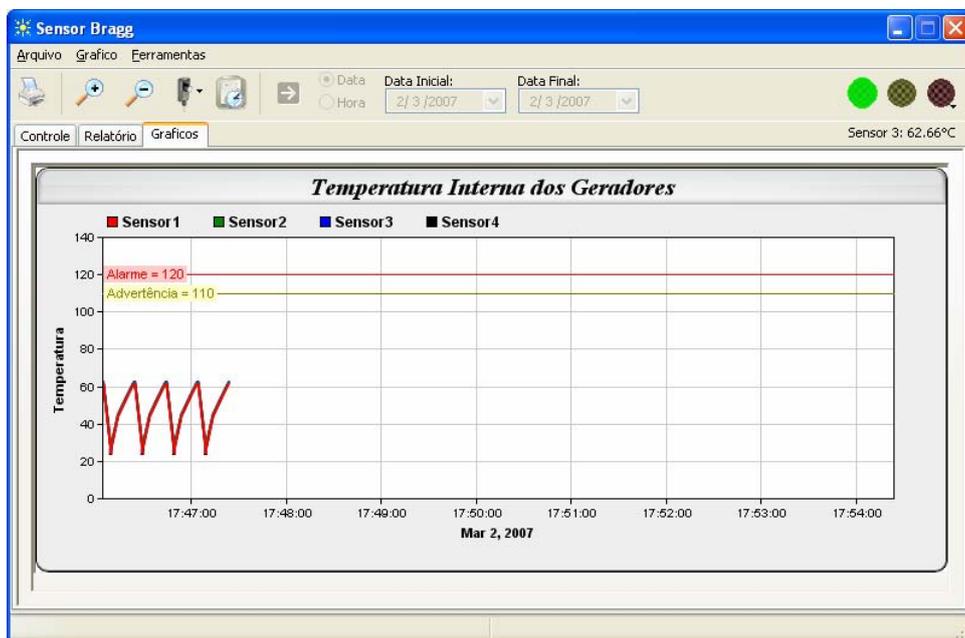


Figura 19 – Tela de gráficos.

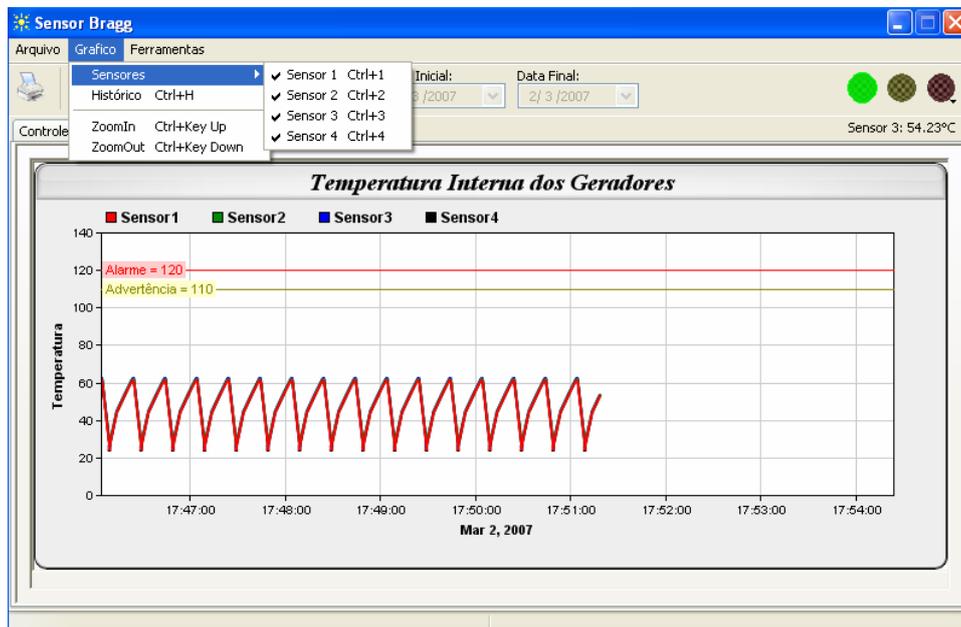


Figura 20 – Menu *Gráficos* da tela principal.

A seleção da opção *Histórico* no menu *Gráfico* da tela principal permite a visualização do histórico dos sensores previamente selecionados. A escolha desta opção ativa a janela da Figura 21, onde deve ser selecionado pelo usuário o período no qual é desejada a visualização do comportamento da temperatura medida. Escolhido o período, a opção *OK* dá origem à tela da Figura 22, onde pode ser visualizada a evolução da temperatura medida pelos sensores selecionados ao longo do período escolhido.

The 'Histórico' dialog box has a blue title bar and a close button. It is divided into two sections: 'Data' and 'Hora'. The 'Data' section contains 'Data Inicial:' and 'Data Final:' fields, both with dropdown menus showing '1/ 3 /2007'. The 'Hora' section contains 'Hora Inicial:' and 'Hora Final:' fields, both with spinners showing '10 :33 :43'. At the bottom, there are 'Cancelar' and 'OK' buttons.

Figura 21 – Tela para seleção do período histórico a ser visualizado.

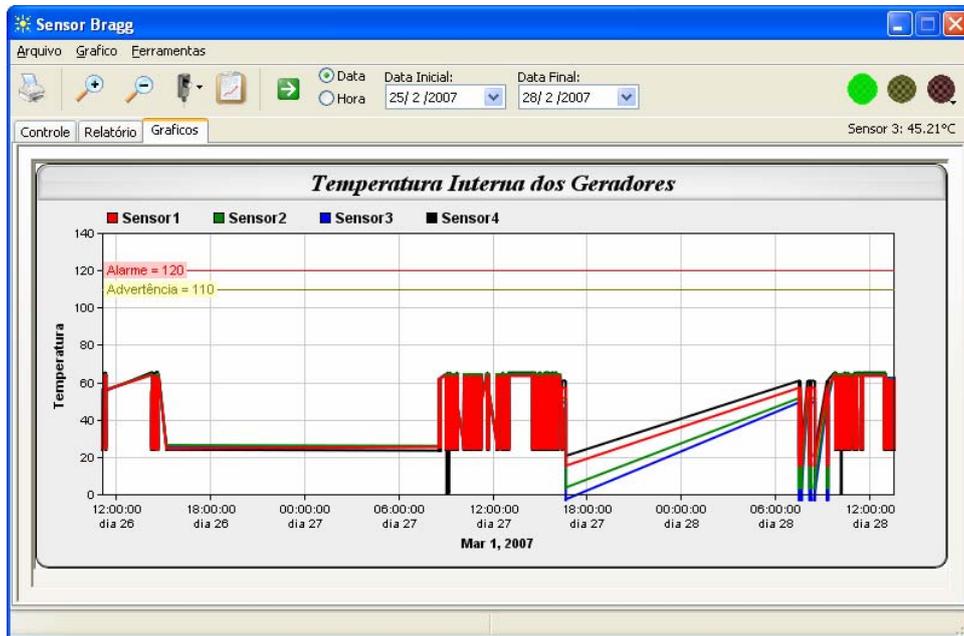


Figura 22 – Visualização da evolução da temperatura dos sensores selecionados ao longo do período histórico escolhido.

5.2.5.1 Barra de ferramentas da tela de gráficos

Esta barra de ferramentas foi criada para facilitar a execução e visualização das tarefas da tela de gráficos. Esta barra está localizada no canto superior esquerdo da tela de gráficos, logo abaixo dos menus *Arquivo*, *Gráficos* e *Ferramentas* da tela principal, conforme ilustrado na Figura 19. Apresenta quatro funcionalidades, a saber: impressão, zoom, sensores a serem visualizados e aquisição do histórico.

O primeiro ícone desta barra é responsável pela impressão do gráfico visualizado na tela de gráficos. Os próximos dois itens, representados por duas lentes com sinais positivo e negativo, são utilizados para ampliação ou redução da visualização do gráfico, respectivamente. O quarto ícone gerencia os sensores escolhidos pelo usuário para visualização. O quinto e último ícone está relacionado com a aquisição de dados históricos. Este ícone possui dois estados, visualização, mostrado na Figura 19, e aquisição de dados históricos, apresentado na Figura 22. No modo visualização, este ícone desabilita as opções *Data*, *Hora*, *Data Inicial* e *Data Final*, visto que estas opções são utilizadas somente na opção aquisição, onde tais informações são necessárias para correta aquisição dos dados históricos a serem visualizados. No modo aquisição, o usuário deve especificar o período histórico a ser visualizado, através das opções previamente citadas, e em seguida pressionar o botão de aquisição de histórico, representado na barra de ferramentas por um ícone verde com uma seta branca, conforme evidenciado na Figura 22.

6 Conclusão

Este relatório apresentou o trabalho desenvolvido no projeto *Software para Monitoramento do Deslocamento do Comprimento de Onda de Bragg para Medição da Temperatura Interna de Geradores de Potência*. Como os aspectos teóricos foram discutidos no Relatório de Atividades do Projeto Número 1, neste trabalho foi dado maior foco à apresentação do software desenvolvido. Todas as funcionalidades especificadas foram implementadas, abrangendo desde a metodologia para aquisição dos espectros ópticos até a geração de relatórios de medição, passando pela técnica de processamento e análise do espectro óptico, metodologias de calibração e interface gráfica com o usuário.

Para evitar um acúmulo de informações, este relatório tratou apenas da apresentação do software. A documentação técnica do programa desenvolvido será apresentada em um outro documento. Esta documentação foi gerada a partir do software *Doxygen*, de código livre e disponível gratuitamente no site <http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/index.html>.

7 Referências Bibliográficas

- [1] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, Boston, Artech House, 1999.
- [2] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, San Diego, Academic Press, 1999.
- [3] A.C. Zimmermann, C.L.N. Veiga, G.F. Tondello, M.M.S. Souza, R.H. Martins e R. Zimmermann, “Sensores Baseados em Redes de Bragg e Fibras Ópticas para Medição de Grandezas em Sistemas Elétricos de Alta Tensão”, *Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 17-19 de julho de 2006.
- [4] J.C.C. da Silva, C. Martelli, B.W. Diesel, J.L. Fabris, H. J. Kalinowski, N. Goothoff e J. Canning, “Termômetro de Alta Temperatura (0 – 400 °C) Baseado em Redes de Bragg em Fibra Óptica para Aplicação no Setor de Petróleo”, *Anais do III Seminário Nacional de Controle e Automação Industrial, Elétrica e de Telecomunicações*, Salvador, Bahia, Brasil, 2003.
- [5] A.D. Kersey, M.A. Davis, H.J. Patrick, M. LeBlanc, K.P. Koo, C.G. Askins, M.A. Putnam, E.J. Friebele, “Fiber Grating Sensors”, *Journal of Lightwave Technology*, v.15, n.8, pp. 1442-1463, August 1997.
- [6] Y.-J. Rao, D.J. Webb, D.A. Jackson, L. Zhang, I. Bennion, “In-Fiber Bragg-Grating Temperature Sensor System for Medical Applications”, *Journal of Lightwave Technology*, v.15, n.5, pp. 779-785, May 1997.
- [7] F. Klemba, *Sensores Ópticos a Fibra Aplicados à Área de Petróleo*, Tese de Msc., UTFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2005.
- [8] L.C.S Nunes, L.C.G. Valente, A.M.B. Braga, “Analysis of a Demodulation System for Fiber Bragg Grating Sensor Using Two Fixed Filters”, *Optics and Laser in Engineering*, v.42, pp. 529-542, 2004.

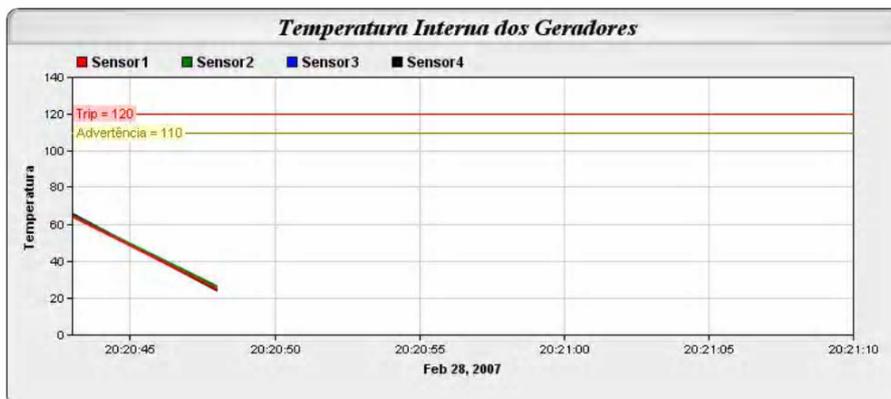
- [9] R. Ricetti, M.S. Buschle, F. Kuller, M. Muller, J.L. Fabris, “Interrogation System Intensity Coded for Bragg Gratings Based Sensors”, *Anais do XXIX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada*, São Lourenço, MG, Brasil, 09 – 13 de maio, 2006.
- [10] P. Niewczas, A. J. Willshire, L. Dziuda, J. R. McDonald, “Performance Analysis of the Fiber Bragg Grating Interrogation System Based on an Arrayed Waveguide Grating”, *IEEE Instrumentation and Measurement, Technology Conference*, Colorado, USA, May 21-23, 2003.
- [11] A.S. Paterno, L.V. Arruda and H.J. Kalinowski, “Radial Basis Function Network for the Approximation of Quasi-Distributed FBG Sensor Spectra with Distorted Peaks”, *17th International Conference on Optical Fiber Sensors – Proceedings of the SPIE*, vol.5622, pp. 976-980, 2005.
- [12] T. Masters, *Neural, Novel & Hybrid Algorithms for Time Series Prediction*, New York, John Wiley & Sons, 1995.
- [13] W.H. Press, B. Flannery, S. Teukolsky, W. Vetterling, *Numerical Recipes in C*, New York, Cambridge University Press, 1992.

Anexo I – Relatório de Medição

PAGE 1

Relatório de Medição

Usuário: Parametros_usuario-default.txt
Número de Sensores: 4
Sensor 1: -55;-45 1533;1535
Sensor 2: -57;-51 1539;1541
Sensor 3: -53;-40 1550;1552
Sensor 4: -58;-52 1565;1567
Periodicidade do cálculo de centróides:
5 segundos
Limiares de identificação dos picos
-56 dB
-56 dB
-56 dB
-58 dB
Níveis de Alarme:
Advertência: 110°C ; Trip: 120°C
Advertência: 110°C ; Trip: 120°C
Advertência: 110°C ; Trip: 120°C
Advertência: 110°C ; Trip: 120°C



Anexo II – Relatório de Calibração

Página 1

Relatório de Calibração

Usuário: Parametros_usuario-default.txt

Número de Sensores: 6

Limiares de identificação dos picos

- 55 dB
- 55.5 dB
- 55.6 dB
- 55.5 dB
- 56.2 dB
- 57 dB

Intervalos de Confiança

- Sensor 1: -53dB; -43dB / 1531nm; 1533.5nm
- Sensor 2: -53dB; -44dB / 1540nm; 1543.5nm
- Sensor 3: -53dB; -42dB / 1546.7nm; 1549nm
- Sensor 4: -55dB; -47dB / 1552.5nm; 1555nm
- Sensor 5: -56dB; -49dB / 1558.2nm; 1561nm
- Sensor 6: -56.5dB; -50dB / 1565nm; 1567.5nm

Arquivos usados na calibração

- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\95°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\125°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\130°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\135°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\140°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\145°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\150°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\155°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\160°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\165°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\170°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\175°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\180°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\185°C.txt
- C:\SensorBraggspectrum060307\Calibração\Arquivos\190°C.txt

Tabela de Calibração

Temperatura	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5
95°C	1532.428	1541.884711	1548.0441	1553.893277	1559.83571
25°C	1531.870321	1541.29392	1547.415032	1553.257872	1559.173681
30°C	1531.901281	1541.336348	1547.452251	1553.291747	1559.213733
35°C	1531.942278	1541.380952	1547.494523	1553.338802	1559.262211
40°C	1531.98225	1541.435634	1547.548707	1553.375832	1559.312864
45°C	1532.017327	1541.461941	1547.597021	1553.423324	1559.355992
50°C	1532.055626	1541.495937	1547.630471	1553.460794	1559.402509
55°C	1532.091796	1541.533342	1547.667361	1553.504336	1559.450815
60°C	1532.13039	1541.579335	1547.711834	1553.550516	1559.498186
65°C	1532.163758	1541.619933	1547.758726	1553.600203	1559.54357
70°C	1532.195433	1541.67775	1547.810815	1553.647655	1559.584886
75°C	1532.220246	1541.731025	1547.851116	1553.672517	1559.623937
80°C	1532.267416	1541.775512	1547.898522	1553.713314	1559.673507
85°C	1532.278595	1541.826278	1547.941398	1553.726847	1559.702545
90°C	1532.404628	1541.819185	1548.007298	1553.852306	1559.802857

Temperatura	Sensor 6
95°C	1566.391043
25°C	1565.702603
30°C	1565.747554
35°C	1565.789533
40°C	1565.839535
45°C	1565.87902
50°C	1565.931413
55°C	1565.976598
60°C	1566.023331
65°C	1566.061997
70°C	1566.122858
75°C	1566.168528
80°C	1566.219772
85°C	1566.268633
90°C	1566.320637



ANEXO 2. Artigos em Congressos

R.C.S.B. Allil, M.M.Werneck, C. L. Barbosa e R. P. Oliveira, “Sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica para monitoramento de temperatura em geradores de potência”, XXX SBF, São Lourenço, Maio, 2007.

R.C.S.B. Allil, M.M.Werneck, C. L. Barbosa e R. P. Oliveira “Sensores a fibra óptica para monitoramento de máquinas”, XII ERIAC, Foz do Iguaçu, Maio, 2007.

R.C.S.B. Allil, M.M.Werneck e C. L. Barbosa “Sensores ópticos baseados em redes de Bragg para monitoramento de temperatura de geradores de potência em UHE”, XX SNPTEE, Recife, Novembro, 2009.

Fiber Bragg Grating Temperature Sensing System for Large Air Cooled Hydrogenerators

M. M. Werneck and R. C. S. B. Allil

Abstract-This paper describes the research, project, construction, calibration, installation and operation of a fiber Bragg grating based fiber-optic system applied to a hydro-electric generator to perform a continuous monitoring of temperature. After being deployed for two and a half years, the system has proved itself to be capable of reliably and accurately measuring and monitoring temperatures inside the generator, even taking into consideration the harsh environment of the stator. The results were considered satisfactory, demonstrating the usefulness of the fiber-optic system in power generation equipment.

Index Terms-Fiber Bragg grating, fiber-optic sensor, power generator, temperature measurement, hydro-electric plant.

I. INTRODUCTION

THE technology of power generation by hydro-electric plants (HEP) in Brazil has reach a high level of sophistication and investment. Nowadays about 73% of all electric energy produced in the country is from HEPs, including very large ones such as Itaipu and Tucuruí with 14 and 8.3 GW respectively. This figure will be further increased by the Rio Madeira Complex which is already under construction and whose 88 turbines will produce over 6.8 GW and Belo Monte with 11.3 GW in licensing processes.

This electric grid represents a very high capital invested, which is also of very expensive maintenance. Each minute down time of any piece of equipment could cost the energy providers thousands of dollars in profit losses of undelivered energy and also from several types of fines applied by the National Electric Power Agency to which they are subjected.

For this reason the reliability of equipment has become a matter of the highest priority and many control systems have been designed to protect and perform real time diagnosing for prompt shutdown or warnings if faults should occur.

This work was supported in part by the Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. – Eletronorte.

Marcelo M. Werneck is with Instrumentation and Photonics Laboratory, Electrical Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), RJ, Brazil (e-mail: werneck@lif.coppe.ufrj.br).

Regina C. S. B. Allil is also with the Sensors and Optronic Laboratory, Brazilian Army Technology Center (CTEx), RJ, Brazil (e-mail: regina@lif.coppe.ufrj.br).

The main control parameter in any HEP or substation is, of course, the electric current that can rise without limits if a short-circuit or excess load occurs. The second parameter in importance is the voltage that may present surges or transients due to switching or atmospheric discharges. The third parameter, normally a consequence of the current, is the temperature that must be under extremely close observation since rises above 100°C can accelerate aging of the insulating material and conductors or even destroy them, causing a general failure of the generators or transformers. Paradoxally, since current and voltage maintain their values approximately the same all over the HEP, there are many more temperature control points in a HEP than there are for current or voltage.

With the idea of decreasing the number of copper wires, facilitating maintenance, possibility of remote sensing and consequently decreasing costs, we designed a fiber-optic multiplexed temperature sensor for application in large air cooled HEP. The system has the objective of covering all temperature monitoring needs of an HEP that would also overcome some of the disadvantages presented by the conventional RTD (resistive temperature detector) network.

The Eletronorte, the largest electric energy producer in Brazil, contracted the Instrumentation and Photonics Laboratory at the Federal University of Rio de Janeiro to project, develop, test and install a complete FBG system to monitor the temperatures inside the hydrogenerator.

This paper relates the world's first real application, test and operation of an FBG temperature sensor array inside a fully operational and connected-to-the-grid hydro-electric power generator.

II. HYDROGENERATOR TEMPERATURE MONITORING

Although hydrogenerators are very reliable, the temperature monitoring of these machines is a well-established procedure. The reason for this is that the stator windings, cooper and insulation age over time and tend to degrade when the machine operates at relatively high temperatures such as those in the range of 100-120°C [1]. Keeping the temperature below these limits is not easy because large hydrogenerators stators and rotor can weigh as much as 1,000 tons and 1,700 tons, respectively, and as a consequence, these machines have a big thermal time constant.

In order to keep the temperature below these limits, large hydro-electric machines of 40 MW or more are normally air cooled. These generators are supplied with a

closed air-cooling circuit where the air is cooled by a water refrigerated radiator. In this type of generator the air temperature is monitored before and after it passes through the radiators.

The temperature monitoring of the cooling air or directly inside the stator winding conductors are the most reliable methods of assuring the proper operation of the power generator [1] and for these measurements, the most popular sensor is the Pt-100, meaning 100 Ω platinum resistance sensor, also known as RTD. These sensors are placed at various locations within the generator, for instance, in the cooling air passages, inside the lubricant and hydraulic oil pipes, in the bearings and also inserted into the slots of the stator core, adding up to about fifteen or more sensors for each machine.

These reliable, accurate and relatively inexpensive sensors have been in use by the industry for almost a century and perfectly fulfill all temperature monitoring needs of an HEP. They have disadvantages, though, that can be mentioned: a) sensitivity to electromagnetic interference (EMI), demanding low pass filters; b) tendency to carry the high voltage of the generator to the control room if short-circuits occur; c) tendency to burn inside the slots of the stator winding where they cannot be replaced. Additionally, each sensor is driven by a three-wire harness that needs to go all the way from the machine to the control room where a large rack with many modules receives each sensor harness. For larger distances, it is necessary to use a current loop to carry the information signals, therefore a terminal box must be installed close to the sensor location with amplifiers, filters and converters to 4-to-20 mA, for example. In a relatively large HEP with ten generators, there are many terminal boxes, harnesses, plug-in modules and racks all over the plant with hundreds of kilometers of electric wires. This is the principal aspect where a multiplexed sensor array can help, as with only a few fiber-optic cables the system can manage all temperature check points of the whole plant.

The feasibility of applying FBG sensors in electric machines for temperature monitoring has been the theme of many recent works. One of them is the paper from a Siemens AG engineering team [2] in which the authors investigate the application of FBG sensors embedded into the stator core of a generator on a test bench. This test demonstrated the viability of the FBG technique applied to generators. More recently, the internal temperatures of oil-immersed power transformers were measured by FBG arrays extending the application of this kind of fiber-optic sensor in electric machines [3]-[5].

III. FBG THEORY

Fiber Bragg Grating (FBG) technology is one of the most popular choices for optical-fiber sensors for strain or temperature measurements due to their simple manufacture (UV photo-inscribed) and relatively strong reflected signal strength. They are formed by a periodic modulation of the index of refraction of the fiber core along the longitudinal direction and can be produced by various techniques [6].

Since the strain or temperature measurands are encoded into wavelength shifts, these sensors are also self-calibrated because wavelength is an absolute parameter. Thus, these sensors do not drift on the total light levels, losses in the connecting fibers and couplers or light source power. Additionally, the wavelength encoded nature of the output also allows the use of the wavelength division multiplexing technique (WDM) by assigning each sensor to a different wavelength range of the available light source spectrum.

In the FBG, due to the periodic modulation of the index of refraction, light guided along the core of the fiber will be weakly reflected by each grating plane. The reflected light from each grating plane will add up with the other reflections in the backward direction. This addition can be constructive or destructive, depending on whether the wavelength of the incoming light satisfies the Bragg condition, given by:

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

Where n_{eff} is the effective index of refraction of the fiber core and Λ is the modulation period of the index of refraction.

Equation (1), also known as the Bragg reflection wavelength, is the peak wavelength of the narrowband spectral component reflected by each FBG of the array. The FWHM (full-width-half-maximum) or bandwidth of this reflection depends on several parameters, particularly the grating length. Typically, the FWHM is 0.05 to 0.3 nm in most sensor applications. Equation (1) also shows that the Bragg wavelength is a function of Λ and n_{eff} . Thus we conclude that a longitudinal deformation due to an external force can change both Λ and n_{eff} , the latter by the photo-elastic effect and the former by increasing the pitch of the grating. Equivalently, a variation of temperature can also change both parameters, by thermal dilation and by the thermo-optic effect respectively.

With such a device, by injecting a spectrally broadband source of light into the fiber, a narrowband spectral component at the Bragg wavelength will be reflected by the grating. In the transmitted light, this spectral component will be missed but the remainder of this light can be used to illuminate other FBGs in the same fiber, each one tuned to a different wavelength. The final result of such an arrangement is that we will have all Bragg peak reflections of each FBG at the beginning of the fiber each one in its specific wavelength range.

Now, by designing the proper interface, measurands can be made to impinge perturbation on the grating resulting in a shift in the Bragg wavelength which can then be used as a parameter transducer.

Starting from the theorem of the conservation of energy and momentum, after a series of algebraic manipulations, very clearly detailed in [7], one arrives at the following equation, which establishes the relationship

between the Bragg wavelength, strain and temperature applied to the FBG:

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

Where, ϵ_z is the longitudinal strain; ΔT is the temperature variation; ρ_e is the photo-elastic coefficient; α is the thermal expansion coefficient and η is the thermo-optic coefficient, representing the temperature dependence of the refractive index (dn/dT). For materials with positive thermal expansion coefficient, the index of refraction normally decreases with temperature. These parameters have the following values for a silica fiber with a germanium doped core: $\rho_e=0.22$; $\alpha=0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ and $\eta=8.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

Since we only want to measure the temperature, we must protect the fiber against strain by placing the grating portion of the fiber inside something such as protective tubing. Thus the sensitivity of the grating to temperature at the wavelength range of 1550 nm, after substituting the constants in (2) is:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 14.18 \frac{\text{pm}}{^\circ\text{C}} \quad (3)$$

This theoretical value, though, is not absolute as each FBG of the same fabrication batch will present slightly different sensitivities, as we will see later in the following sections.

IV. CALIBRATION OF SENSORS

Before installing the sensors into the generator they had to be calibrated because, as already mentioned, (3) is not valid for all FBGs as they may have different thermo-optic coefficients and they are tuned into different wavelengths.

The calibration procedure of the sensors followed two steps. In the first set of measurements, the six sensors were calibrated simultaneously by immersion into a temperature controlled bath and the Bragg wavelengths were monitored along with the temperature in order to calculate the sensitivity of each sensor, as predicted by (3).

This first set of measurements allowed us to observe and measure the Bragg shift of each FBG as a function of temperature in the range of 25°C to 95°C. Fig. 1 shows all Bragg reflection of each temperature superimposed. In this experiment it is important to make sure that each pulse does not enter its neighbor's range during its displacement.

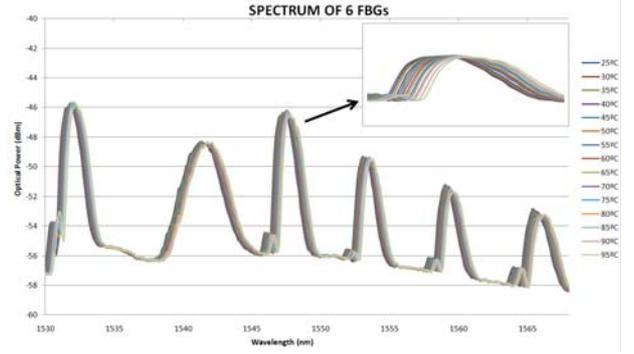


Fig. 1. Superimposed wavelength shift of each FBG as temperature varies from 25°C to 95°C.

From this data the software calculates the center wavelength of each Bragg reflection and plots the Bragg shift versus temperature for each FBG, producing the graph shown in Fig. 2.

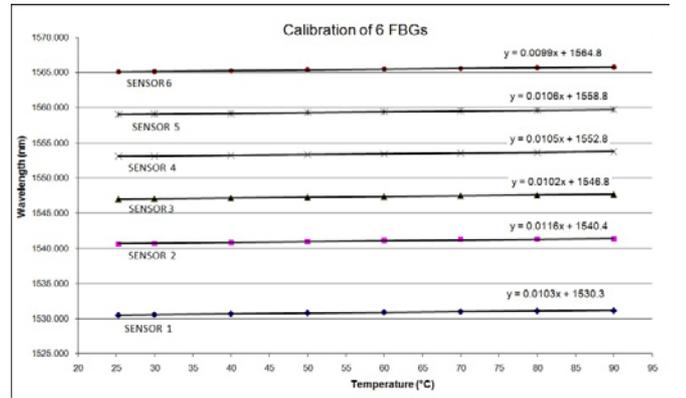


Fig. 2. Wavelength shift versus Temperature for each FBG.

Table I summarizes the information acquired from the last experiment.

TABLE I
THEORETICAL AND MEASURED SENSITIVITIES OF EACH FBG

Sensor #	Theoretical Sensitivity (pm/°C)	Measured Sensitivity (pm/°C)	Wavelength @ 25°C (nm)
1	14.00	10.3	1530,534
2	14.10	11.6	1540,667
3	14.16	10.2	1547,027
4	14.21	10.5	1553,035
5	14.27	10.6	1559,063
6	14.32	9.9	1565,090

Notice in Table I that, the theoretical sensitivities predicted by (3) are different from those obtained in the calibration experiment. But, since all FBGs were made out of the same optical-fiber reel, α , the silica coefficient of temperature should be the same for all FBGs produced from that fiber. The other parameter in (3) is η , the thermo-optic coefficient, representing the temperature dependence of the refractive index (dn/dT). Equation (1) teaches us that λ_B is a function of n_{eff} , the average index of refraction between the pristine fiber core and that of the ultra-violet-irradiated core. Remember that during the FBG fabrication, the radiation time for each FBG inscription is not the same

as the operator turns off the laser only when she observes the Bragg reflection above a certain level. Since the UV irradiation modifies the index of refraction of the fiber core, it is possible that it could also modify the values of η in each FBG, differently, resulting in the slightly dispersed sensitivities found above. However, to the best of our knowledge, there is no mention of this effect whatsoever in the literature.

The data obtained from Fig. 2 also allows us to calculate the linear relationship between wavelength and temperature for each FBG. These equations were fed into the software of the optical interrogation system (see next section) in order to calculate the temperature of each sensor.

The second step of the calibration procedure was the comparison between the calculated temperatures by the optical interrogator software with the calibrated temperatures of each FBG, as given by a precision thermometer. From this experiment it was possible to calculate the inaccuracy of the measurement which was less than 0.5°C , quite sufficient for this application. The correlation coefficient of the linear curve fitting was 0.9994 as shown in Fig. 3.

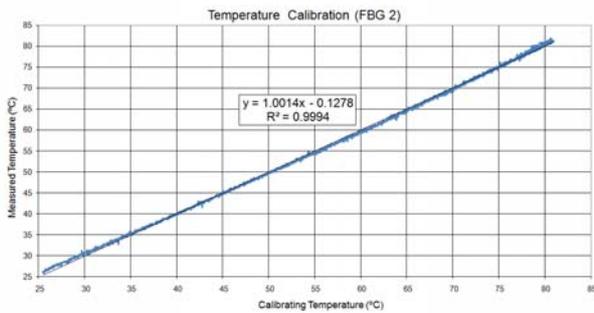


Fig. 3. Calibration of FBG 2.

V. INSTALLATION OF SENSORS AND RESULTS

The HEP chosen for this experiment was the UHE-Samuel, in Brazil's far west city of Porto Velho, close to the border with Bolivia. UHE-Samuel is located on the Jamari River, a tributary of the Madeira River, which in turn, is one of the major tributaries of the Amazon River. The UHE-Samuel generates 216 MW and counts on five Kaplan-type turbines with each one generating about 42 MW.

The system was first installed in the generator number five in November 2007. This process was performed at two opportunities: during a five-day shutdown of the machine for maintenance and in another five-day window for retrofit (exchange of rectifiers).

For the installation of the sensors inside the stator it is obviously necessary to turn off the machine, which is not an easy task. This is because, as with the majority of HEPs in Brazil, UHE-Samuel is a national-grid-connected HEP therefore to be turned off, one needs special authorization issued by the National System Operator. The request is normally dispatched six months in advance, and if granted,

the machine is allowed to be turned off during a five-day window.

The machine, which operates at a normal temperature of around 95°C , needs 24 hours to drop its temperature to about 45°C in order to make it possible for someone to enter the stator hall to install the sensors. The stator environment can be considered to be one of the worst places in which a sensor can be installed. Its average temperature is about 95°C , peaking up to 110°C with air humidity close to 100%. It presents a dense oily atmosphere; very high electro-magnetic interference at a few millimeters from 15 kV conductors carrying a current of 2 kA; vibrations of every kind up to 0.3 G and among heavy parts that are frequently assembled and disassembled using heavy tools with huge force. How can such a fragile sensor, such as a 125- μm -diameter-glass-optical-fiber, be installed in such a harsh environment and in spite of this keep its reliability during the expected 40-year life span?

An FBG used as a temperature sensor presents a very small time constant because it has a small mass. In order to protect this sensor and not deteriorate such a valuable parameter, the sensor was loosely installed inside a piece of thin U-form copper tubing in order to allow good heat transfer between the cooling air and the optical fiber, as shown in Fig. 4. The tubing, which also protects the fiber against strain, goes out and back again from an IP65 polymeric enclosure.

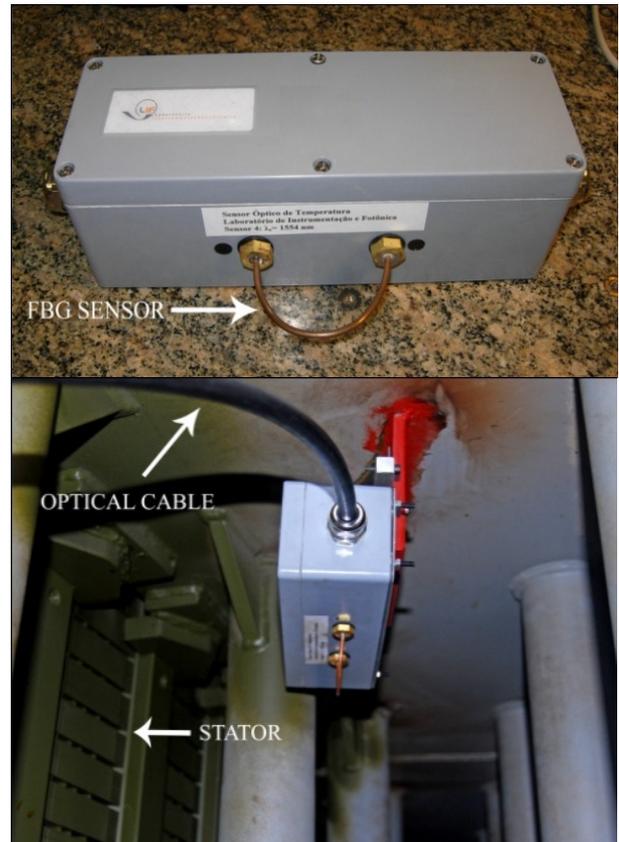


Fig. 4. Box containing the fiber-optic splices with the FBG inside the U-shape copper tubing (top) and installed inside the generator (above).

An adequate fiber-optic cable connected all six boxes as they were installed around the stator winding behind each radiator of the generator. The optical cable was then placed within the existing cable trays along with other electric cables extending all the way up from the generator to the HEP control room, where the optical interrogator and an industrial PC were installed.

The optical interrogation setup consists of a broad band optical source that illuminates all FBGs in the array. The return signal of each FBG is detected by the optical interrogator (Spectral Eye 400-FOS&S) that identifies the center wavelength of each FBG reflection pulse. The optical interrogator communicates with an industrial PC via RS-232 interface, running a LabView software for calculation and storage of the temperatures. The PC publishes all data on the company's Intranet that automatically and instantaneously becomes available to the HEP central software control. Fig. 5 shows the generator in detail with sensors connected to the interrogation system shown as a block diagram and Fig. 6 shows the cross section of the generator.

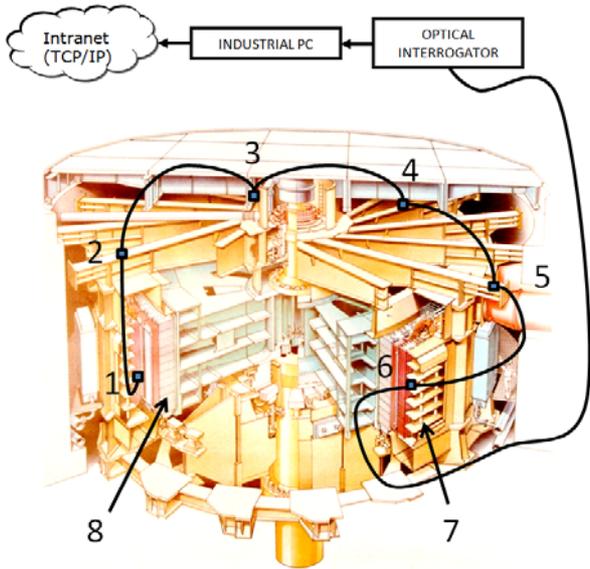


Fig. 5. Depiction of a cross-section of the hydrogenerators showing the generator in detail with sensors connected to the interrogation system. 1 to 6) FBG sensors; 7) Radiator; 8) Stator.

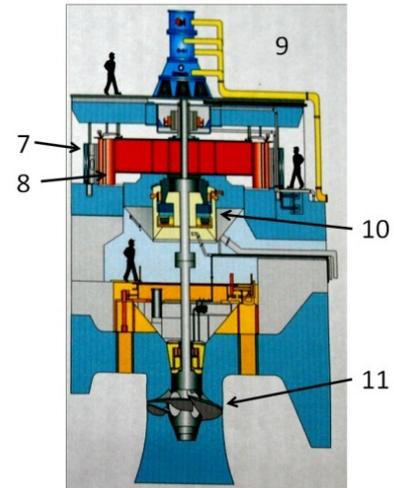


Fig. 6. Depiction of a cross-section of the hydrogenerators. 7) Radiator; 8) Stator; 9) Machine room floor; 10) Bearing; 11) Kaplan turbine.

However, the proposed system will theoretically go much further than this. After the approval of the current system, the proposed project plans to use this technology to fulfill all temperature needs of the HEP, including turbines, air, oil and water ducts and other electrical equipment at the substation as well (see Fig. 7). Since a single optical fiber cable can monitor about 16 or more sensors, only one cable is necessary per piece of equipment for all temperature measurements. There is also the intention that the system will be able to access the Internet so as to be able to be accessed remotely, even from another location. This is especially advantageous for automatic unmanned substations.

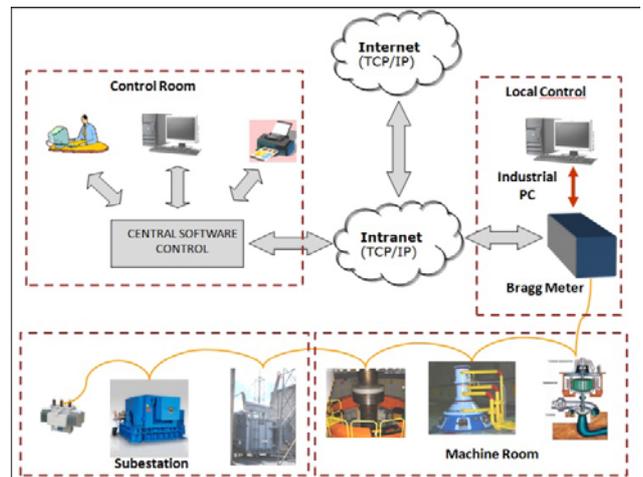


Fig. 7. Proposed extension of the system including all monitoring needs of the hydro-electric plant.

Shortly after the installation we noticed that the last two FBGs in the fiber-optic cable were not being identified by the optical interrogator due to a malfunction of the optical connectors. However there was no time to reopen the inspection windows of the stator as the machine was programmed to start up immediately. Since then, the

machine has been running constantly as our requests for shutting down have not so far been granted. Currently, at the time of writing this article, the machine has been in operation for two and a half years and the fiber-optic system is monitoring four radiators normally. The results of the measurements are periodically sent to the company's head-quarters in Belém, some 1,800 km north and from there to our laboratory located in Rio de Janeiro, 2,400 km south.

Immediately after the installation, the system started monitoring the temperatures, producing the graph shown in Fig. 8. We can observe all signals superimposed at about 33°C.

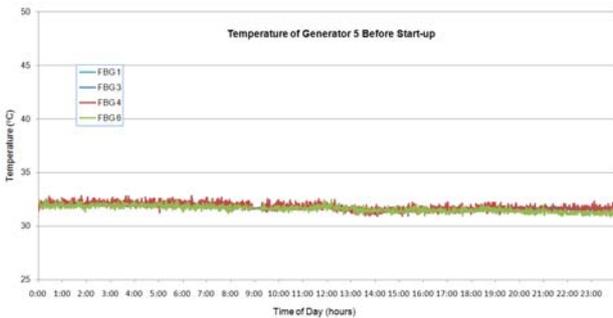


Fig. 8. Temperature of generator 5 before start up.

As part of the test procedures, the machine was started up and shut down several times. The graph in Fig. 9 shows the evolution of the temperature during the last start up test of the generator. Notice that, differently from Fig. 8, the temperatures of the radiators were not the same before start up. This is because previously the machine was working with different temperatures around the stator, which, as we will see later is normal. At 9 AM the turbine was opened to the dam and the machine started-up. The temperature at FBG 3 rose from around 35°C to 85°C while the turbine accelerated up to 90 rpm until in phase with the 60 Hz grid frequency. Then, at 6 PM the generator was switched to the national grid and the temperature rose again up to 95°C, stabilizing thereafter.

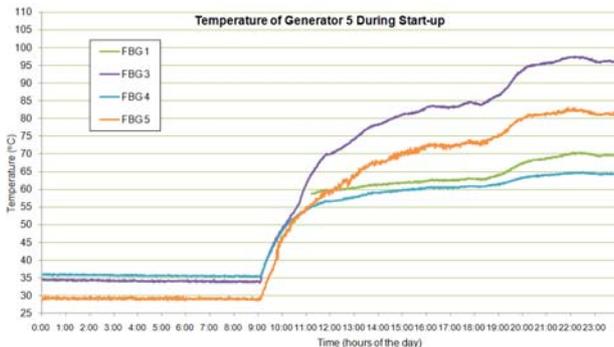


Fig. 9. Temperature evolution of generator 5 during start up.

Fig. 10 shows the temperature of the generator in normal operation. At this time the generator was producing 22 MW with an average water flow of 82 m³/s.

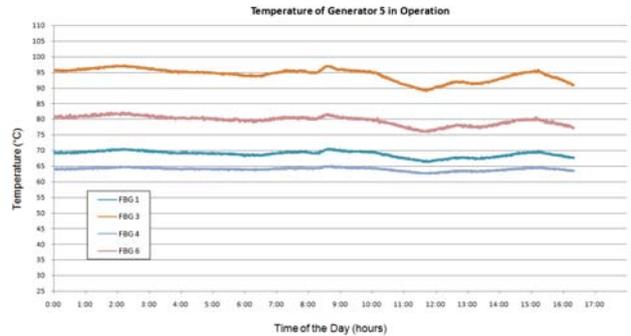


Fig. 10. Temperature of generator 5 in operation.

As in Fig. 9, in Fig. 10 we can still observe a difference in temperature between different sections of the generator. In order to explain this behavior, it is first necessary to understand how the cooling system works. The cold water from the bottom of the dam is taken by a pipe and, following a chlorine treatment, it feeds the radiators, one after the other, in a row. But as the water pipe goes around the stator feeding each radiator, the water loses pressure so that the first radiator has a higher water flow than the second, and so on until the water reaches the last radiator which receives much less water. Therefore, each section of the stator is cooled down to different temperatures leading to the behavior observed in Fig. 9 and Fig. 10. Of course a load imbalance between the phases would also lead to different temperatures, but in a five-machine plant with all generators interconnected it would be very difficult for this occur.

Observing Fig. 10, it is possible to notice that, even in a steady state, the generator temperatures vary with time, with all temperatures following the same pattern. This is how the generator responds to the energy demands by the load.

VI. CONCLUSIONS

This paper described the world's first real application, test and operation of an FBG temperature sensor array inside a fully operational and connected-to-the-grid hydroelectric power generator. The FBGs sensors have been installed inside the generator since November 2007 and the whole system has been operating normally since then. The system was capable of reliably and accurately measuring and monitoring temperatures inside the generator, even considering the harsh environment of the stator generator.

With this system in operation a large reduction of installation and maintenance costs could be avoided since many kilometers of electric wire would be saved.

Another conclusion of such an experiment is that it is very difficult to conciliate research and commercial interests. Scientists working with power generation encounter enormous difficulty in having machines turned off, particularly those connected to the national grid. Power operation authorities are so concerned about system reliability and energy production without discontinuities that they often refuse any kind of research proposals that could, in any way, put machine integrity in jeopardy or interrupt energy production.

VII. REFERENCES

- [1] Stone, G.C., "Overview of Hydrogenerator Stator Winding Monitoring", International Conference on Electric Machines and Drives – IED' 99, pp 806-808, Seattle, WA, 9 to 12 May 1999.
- [2] Theune, N.M.; Muller, M.; Hertsch, H.; Kaiser, J.; Willsch, M.; Krammer, P. and Bosselmann, T.: "Investigation of stator coil and lead temperatures on high voltage inside large power generators via use of fiber Bragg gratings". Proceedings of IEEE Sensors, Vol.2, pages: 1603 – 1607, 12 to 14 June 2002.
- [3] Myonghwan Kim; June-Ho Lee; Ja-Yoon Koo; Minh Song: "A study on internal temperature monitoring system for power transformer using optical fiber Bragg grating sensors". International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2008), Yokkaichi, Mie, Japan, pages: 163–166, 7-11 September 2008.
- [4] Chen Wei-gen; Liu Jun; Wang You-yuan; Liang Liu-ming; Zhao Jian-bao and Yue Yan-feng: "The Measuring Method for Internal Temperature of Power Transformer Based on FBG Sensors". International Conference on High Voltage Engineering and Application, (ICHVE 2008), Chongqing, China, pages: 672 – 676, November 9-13, 2008.
- [5] A. B. Lobo Ribeiro; N. F. Eira; J. M. Sousa; P. T. Guerreiro and J. R. Salcedo: Multipoint Fiber-Optic Hot-Spot Sensing Network Integrated Into High Power Transformer for Continuous Monitoring. IEEE Sensors Journal, Vol. 8, no. 7, July 2008.
- [6] G. Meltz; W. W. Moorey and W. H. Glenn: "Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by Transverse Holographic Method". Optics Letters, Vol. 14, pages: 823-825, 1989.
- [7] A. Othonos and K. Kalli: "Fiber Bragg Gratings". Artech House, Inc., Boston, 1999.

VIII. BIOGRAPHIES



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 coordinator of the Instrumentation and Photonics Laboratory at the Electrical Engineering Program of UFRJ. His research interests include fiber optics, sensors, transducers, and instrumentation.



Regina Célia da Silva Barros Allil, was born in Rio de Janeiro, Brazil. She graduated as an Electronic Engineering from the Faculdade Nuno Lisboa, Rio de Janeiro in 1988. She is a researcher at the Brazilian Army Technology Center (CTEx), Rio de Janeiro. Her MSc. degree was obtained from the Biomedical Engineering Program of the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ) in 2004. Currently she is a PhD student of the Electronic Engineering Program in the Instrumentation and Photonics Laboratory at the Federal University of Rio de Janeiro. Her research interest lies in fiber optics sensors and infrared night vision systems.

Optical High Voltage Sensor Based in Fiber Bragg Grating and PZT Piezoelectric Ceramics

R. C. S. B. Allil and M. M. Werneck

Abstract-Electric power facilities, such as substations, rely on voltage transformers for measuring and protection. These pieces of equipment are bulky, heavy and tend to explode, destroying nearby equipment and posing a threat to substation personnel. Optical voltage transducers offer many improvements on traditional inductive and capacitive voltage transformers such as linear performance and wider dynamic range, lighter weight, smaller size and improved safety. This paper relates to the development of a high voltage sensor system using a PZT piezoelectric crystal as transducer and an FBG as a sensor for an optical voltage transformer for 13.8-kV-class. The results show that the developed sensor is capable of attaining the IEC 0.2%-accuracy class for the revenue metering system.

Index Terms- High-voltage techniques, Optical fiber transducers, Piezoelectric transducers, Substation measurements, Voltage transformers.

I. INTRODUCTION

ELECTRIC power facilities, such as substations, rely on instrument transformers for their functionality and protection. These are divided into voltage transformers (VT) and current transformers (CT) for measuring and controlling voltage and current, respectively. The role of the instrument transformer is to provide accurate signals for protection, control and metering systems, including revenue metering. These requirements place stringent demands on the accuracy and reliability of the instrument transformer to guarantee the correct functionality for protection systems and precise measurement for metering purposes.

Created over a century ago, they are reliable for over-voltage and over-current protection, allow 0.2% revenue metering accuracy and their behaviour is well known under both normal and abnormal conditions. Nevertheless, these pieces of equipment are made entirely of copper, ceramic and iron with all empty spaces filled with oil, which are weighty materials, producing bulky, heavy and clumsy equipment. On top of that, they tend to explode without prior warning, resulting in the potential destruction of nearby equipment by pieces of sharp ceramics and furthermore putting the substation personnel at risk.

The magneto-optic effect was first reported by the English chemist and physicist Michael Faraday in 1845. The Pockels effect or Pockels electro-optic effect, which produces birefringence in an optical medium induced by an electric field, was studied for the first time in 1893 by the German physicist Friedrich Carl Alwin Pockels. In the past decades these two effects have been implemented in such a way that they have become precise and reliable methods of measuring voltage and current.

Optical voltage and current sensing systems using Faraday and Pockels effects have been studied since the 90's as candidates to substitute conventional CTs and VTs and nowadays are finding wide applications in high voltage substations [1], [2].

Optical voltage transducers offer many improvements over traditional inductive and capacitive voltage transformers. These advantages include linear performance and wider dynamic range, not to mention, lighter weight, smaller size, and improved safety. Since optical fibers carry the measurements as light signal to and from the sensor head, workers and all substation control equipment are electrically isolated from the high voltage environment. Due to their small footprint and light weight, these pieces of equipment allow the maintenance of emergency mobile substations that are deployed on site by trucks and start working in a matter of a few hours. Optical CTs and VTs for power systems have been used in the last decades and are commercially available from a few companies today [3].

On the other hand, both Pockels and Faraday effects have drawbacks. The first one is that both Faraday and Pockels system components are not stable with temperature and stress, demanding the use of complicated compensation techniques [4] or specially designed optical fibers [5] in order to become reliable. Additionally, Pockels cells are made of bulk crystals, e.g. lithium niobate, demanding an open optics approach with lenses and polarizing filters resulting in an unstable and difficult-to-align system. The main drawback, however, is the high cost of this still relatively new technology, not only for acquisition but also for maintenance, demanding specialty skills uncommonly available among company personnel.

Marcelo M. Werneck is with Instrumentation and Photonics Laboratory, Electrical Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), RJ, Brazil (e-mail: werneck@lif.coppe.ufrj.br).

Regina C. S. B. Allil is also with the Sensors and Optronic Laboratory, Brazilian Army Technology Center (CTEx), RJ, Brazil (e-mail: regina@lif.coppe.ufrj.br).

The Instrumentation and Photonics Laboratory of the Federal University of Rio de Janeiro has been awarded a contract from a major electric power company in Brazil to design, develop, fabricate, integrate and test a complete 13.8-kV-class voltage

measuring system (instrument transformer) prototype. This prototype will be used to demonstrate scalability towards a 500-kV-class voltage transformer. The requirements are: an optical system which is lighter and safer than conventional VTs and also complying with the appropriate standards.

From the demands of this project and the observations above, came the motivation for developing a practical VT system with two basic characteristics: a) intrinsic fiber optic sensors avoiding open optics and b) using a well known and proven form of technology that would lead to a competitive price system as compared to conventional inductive VTs.

We have already designed and tested a hybrid electro-optical low cost monitoring system for the 13.8-kV distribution line [6], but nowadays the best technology for meeting the above demands is the fiber Bragg grating (FBG) that is relatively easy to deal with, reliable and very sensitive to strain.

This paper relates the development of a high voltage measuring system to be used as the core of a 13.8-kV-class VT for the electric power industry application using a PZT crystal as voltage transducer (sensing element) and an FBG as a strain measuring sensor. This equipment is expected to have the appropriate level of accuracy, which is required by the IEC 60044-5- Instrument Transformers [7], under the accuracy class of 0.2%.

II. FBG AND PZT THEORY

FBG technology is one of the most popular choices for optical-fiber sensors for strain or temperature measurements due to their simple manufacture (UV photo-inscribed) and relatively strong reflected signal strength. They are formed by a periodic modulation of the index of refraction of the optical fiber core along the longitudinal direction and can be produced by using various techniques [8].

Since the strain or temperature measurands are encoded into wavelength shifts, these sensors are also self-calibrated because wavelength is an absolute parameter. Thus, these sensors do not drift on the total light levels, losses in the connecting fibers and couplers or light source power. Additionally, the wavelength encoded nature of the output also allows the use of the wavelength division multiplexing technique (WDM) by assigning each sensor to a different wavelength range of the available light source spectrum.

In the FBG, due to the periodic modulation of the index of refraction, light guided along the core of the fiber will be weakly reflected by each grating plane. The reflected light from each grating plane will add up with the other reflections in a backwards direction. This addition can be constructive or destructive, depending on whether the wavelength of the incoming light satisfies the Bragg condition, given by:

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

Where n_{eff} is the effective index of refraction of the fiber core and Λ is the modulation period of the index of refraction.

Equation (1), also known as the Bragg reflection wavelength, is the peak wavelength of the narrowband spectral component reflected by each FBG of the array. The FWHM (full-width-half-maximum) or bandwidth of this reflection depends on several parameters, particularly the grating length. Typically, the FWHM is 0.05 to 0.3 nm in most sensor applications. Equation 1 also shows that the Bragg wavelength is a function of Λ and n_{eff} . Thus we conclude that a longitudinal deformation due to an external force can 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 of temperature can also change both parameters, by thermal dilation and by the thermo-optic effect respectively.

With such a device, by injecting a spectrally broadband source of light into the fiber, a narrowband spectral component at the Bragg wavelength will be reflected by the grating. In the transmitted light, this spectral component will be missed but the remainder of this light can be used to illuminate other FBGs in the same fiber with each one tuned to a different wavelength. The final result of such an arrangement is that we will have all Bragg peak reflections of each FBG at the beginning of the fiber with each one being in its specific wavelength range.

Now, by designing the proper interface, measurands can be made to impinge perturbation on the grating, resulting in a shift in the Bragg wavelength, which can then be used as a parameter transducer.

Starting from the theorem of the conservation of energy and momentum, after a series of algebraic manipulations, which are very clearly detailed in [9]-[11], one arrives at the following equation which establishes the relationship between the Bragg wavelength, strain and temperature applied to the FBG:

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

Where, ε_z is the longitudinal strain; ΔT is the temperature variation; ρ_e is the photo-elastic coefficient; α is the thermal expansion coefficient and η is the thermo-optic coefficient, representing the temperature dependence of the refractive index (dn/dT). These parameters have the following values for a silica fiber with a germanium doped core: $\rho_e=0.22$; $\alpha=0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ and $\eta=8.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

Thus the sensitivity of the grating to temperature at the wavelength range of 1550 nm, after substituting the constants in (2) is:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 14.18 \frac{\text{pm}}{^\circ\text{C}} \quad (3)$$

and the sensitive of the grating to strain is:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\epsilon} = 1.2 \frac{\text{pm}}{\mu\epsilon} \quad (4)$$

These theoretical values, though, are not absolute as each FBG of the same fabrication batch will present slightly different sensitivities, as we will see later in the following sections.

PZT is an acronym for lead (Plumbum) Zirconate-Titanate piezoelectric ceramic. The application of an electric field to an unrestrained piezoelectric body results in its deformation. For this reason PZTs are also used as nano-actuators, particularly applied in optical setups. The amount of movement is a function of the voltage applied, polarity of this voltage and the direction of the polarization vector (poling) of the ceramics as much as the PZT composition.

PZT crystals are normally used in many applications of the Sagnac fiber optic interferometer. The Sagnac effect manifests itself in a setup called ring interferometer, when a beam of light is split in two and each one is made to follow trajectories in opposite directions. In one of the paths the optical fiber can be wound around a cylindrical PZT crystal driven by a sinusoidal voltage signal in order to induce a periodical length variation in this light path. This technique is called super-heterodyne demodulation and can be used in fiber optic gyros, for example. It was with this idea in mind that we designed this sensor system in which the optical fiber with an FBG inscribed in it is glued to the PZT in order to measure its deformation under the application of an electric field. Niewczas et al [12] have demonstrated the use of PZT together with an FBG focused on monitoring drive voltage of electrical pumps destined for the oil and gas industry.

The present paper however, is mainly directed at the application of this technique in the electric power industry and consequently is concerned with complying with the IEC standards for instrument transformers.

When the PZT is submitted to an electric field, there will be a change in its dimensions and the FBG will be strained accordingly. The basic electromechanical equation for a piezoelectric ceramic is [13]:

$$\frac{\Delta X}{X} = d_{ij} E \quad (5)$$

Where $\frac{\Delta X}{X}$ is the relative change in length of a ceramic element, E is the electric field [V/m] applied to the PZT electrodes and d_{ij} is the piezoelectric displacement coefficient [m/V] being “ i ” a designation for the direction of crystal polarization end “ j ” the Cartesian coordinate. The direction of polarization (axis 3) is established by a strong electrical field applied between the electrodes during the poling process.

Therefore, in a tubular PZT with electrodes deposited in the inside and outside walls, d_{31} stands for a tangential displacement (increase in circumference) and d_{33} stands for wall thickness displacement.

III. MATERIALS AND METHODS

This section will develop the relationship between the resulted Bragg wavelength displacement when the optical fiber is submitted to a force applied by the PZT, when the latter is subjected to an electric field. We will also show the optical setup used in the experiments.

Before demonstrating the mathematical model that correlates the Bragg displacement with the applied voltage, it is important to know how the temperature will affect our results. Bearing in mind that one degree in temperature change will cause about 14 pm Bragg wavelength displacement, we must provide a means of compensating temperature variations that will occur, particularly for field applications.

Equation (2) shows that the Bragg displacement is a function of both strain and temperature. By observing $\Delta\lambda_B$ one cannot tell if the displacement was due to strain, temperature or both. In order to compensate this displacement against temperature variations one can use a temperature sensor attached to the PZT and apply the measured value in (2). But in our case it is not possible to use a conventional temperature sensor as the PZT is at high voltage. The alternative is to use another FBG, fixed to the PZT to measure the temperature, but in such a way that it will not be subjected to the strain. This can be accomplished by

inserting the FBG loosely inside a thin tube bonded to the PZT, so that both FBGs will be at the same temperature. The two FBGs will be in the same fiber-optic and will provide two different Bragg reflections, one dependent on strain and temperature and the other dependent only on temperature, for compensation.

From (2) we have for the first FBG:

$$\Delta\lambda_{B1} = K_{\varepsilon1}\Delta\varepsilon + K_{T1}\Delta T \quad (6)$$

Where

$$K_{\varepsilon1} = (1 - \rho_e)\lambda_{B1} \quad (7)$$

$$K_{T1} = (\alpha + \eta)\lambda_{B1} \quad (8)$$

Similarly, for the other FBG we have:

$$\Delta\lambda_{B2} = K_{\varepsilon2}\Delta\varepsilon + K_{T2}\Delta T \quad (9)$$

Where,

$$K_{\varepsilon2} = (1 - \rho_e)\lambda_{B2} \quad (10)$$

$$K_{T2} = (\alpha + \eta)\lambda_{B2} \quad (11)$$

But since this FBG is strain free, the first term of (4) will not exist. Equations (1) and (4) can be written in matrix form:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon2} & K_{T2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (12)$$

Equation (12) can be called the wavelength shift matrix because it produces the wavelength displacement as a function of strain and temperature. However, we need to find the sensing matrix, that is, the strain and temperature as a function of the wavelength displacement. Multiplying both sides of (12) by the inverse of the 2x2 matrix we get to:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon2} & K_{T2} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Inverting the 2x2 matrix we have the sensing matrix:

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{\varepsilon 1} K_{T2} - K_{\varepsilon 2} K_{T1}} \begin{bmatrix} K_{T2} & -K_{T1} \\ -K_{\varepsilon 2} & K_{\varepsilon 1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

In (14) we notice that if

$$K_{\varepsilon 1} K_{T2} \approx K_{\varepsilon 2} K_{T1}, \quad (15)$$

then we would not have a viable solution of (12) because (6) and (9) would be two almost parallel lines. This would happen, for instance, if the two FBGs had the same coefficients and Bragg wavelength reflection and would, therefore, displace equally. Notice that (7) and (10) and (8) and (11) respectively, differ only by the Bragg wavelength. So, to avoid the redundancy in (15) we can use FBGs with Bragg reflections wide apart.

Now we can solve (14) for strain and temperature:

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{K_{\varepsilon 1} K_{T2} - K_{\varepsilon 2} K_{T1}} (K_{T2} \Delta \lambda_{B1} - K_{T1} \Delta \lambda_{B2}) \quad (16)$$

$$\Delta T = \frac{1}{K_{\varepsilon 1} K_{T2} - K_{\varepsilon 2} K_{T1}} (K_{\varepsilon 1} \Delta \lambda_{B2} - K_{\varepsilon 2} \Delta \lambda_{B1}) \quad (17)$$

Equation (16) gives the real strain of FBG 1 as measured by $\Delta \lambda_{B1}$, compensated against temperature variation measured by $\Delta \lambda_{B2}$. Equation (17) gives the temperature of the sensors. It can be used for further compensation, as for instance the thermal dilation of the metallic parts of the setup.

Temperature compensation is important in DC applications because the drift caused by temperature variation will affect all parts of the sensor, producing unwanted drifts. It is possible to compensate the temperature dilation of the amplifier parts by using appropriated materials in a technique known as biomaterial effect. The working principle is that when the surrounding temperature increases, a negative strain to loosen the FBG is incurred, producing blue shift of the Bragg wavelength and thus compensating for the temperature drifts [14]. However, when dealing with AC measurements, such as 60 Hz line voltage, temperature variation occurs very slowly; it's a nearly-DC variation. Therefore a simple high-pass filter will easily filter out temperature drifts from the output signal, leaving only AC variations.

Having solved the problem of temperature drift, we can now develop the relationship between applied voltage and Bragg displacement.

As a first setup approach, the FBG was wound around a cylindrical PZT tube in a constant temperature environment as shown in the picture of Fig. 1.

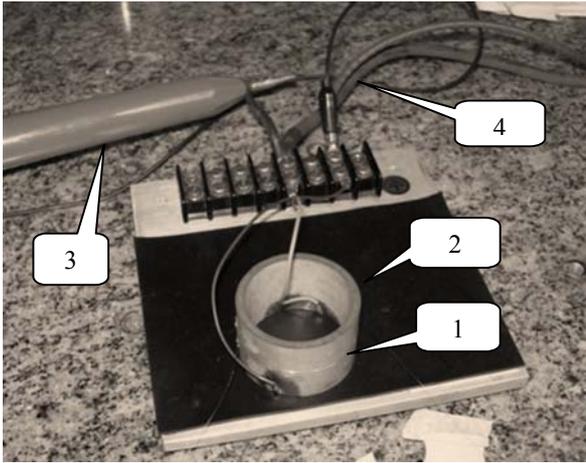


Fig. 1. The optical fiber with a FBG (1) wound around the PZT crystal (2). Also shown are the high voltage probe (3) and the high voltage power supply leads (4).

As explained in the last section, when an electric field is applied to the PZT electrodes, the tube experiences both a circumference contraction (d_{31} is negative) and an increase in the wall thickness (d_{33} is positive). We can apply (5) for calculating the net strain considering both effects.

Then, for wall thickness displacement, we have from (5):

$$\frac{\Delta w}{w} = d_{33} E \quad (18)$$

and therefore,

$$\Delta w = d_{33} E w . \quad (19)$$

But since the electrical field is

$$E = \frac{V_{in}}{w} , \quad (20)$$

then we have:

$$\Delta w = d_{33} V_{in} . \quad (21)$$

Where V_{in} is the applied voltage and w is the wall thickness.

The cylinder wall thickness displacement will account for a variation of its diameter and consequently the length of the tube circumference, L , around which the fiber was wound.

Since $L=2\pi R$, we have $\Delta L=2\pi\Delta R$. Also, if the wall thickness is w , then, when the thickness increases by Δw , the radius R will increase by $\Delta w/2$, since half of the increase was in an inwards direction and does not account for ΔR . Then, we have:

$$\Delta L = 2\pi \frac{\Delta w}{2} = \pi \Delta w . \quad (22)$$

Substituting (3) into (4), we have the following fiber strain as a consequence of the wall thickness displacement:

$$\Delta L = \pi d_{33} V_{in} \quad (23)$$

But, as a result of the applied voltage, we also have a displacement of the circumference of the PZT tube. The relative increase of the circumference is, according to (5):

$$\frac{\Delta L}{L} = d_{31} E \quad (24)$$

or

$$\Delta L = 2\pi R d_{31} E \quad (25)$$

But, as $E = V_{in}/w$, we have:

$$\Delta L = 2\pi R d_{31} \frac{V_{in}}{w} \quad (26)$$

Finally, we add equations [23] and [26] to obtain the net effect:

$$\Delta L = V_{in} \left(\pi d_{33} + 2\pi R \frac{d_{31}}{w} \right) \quad (27)$$

or

$$\frac{\Delta L}{L} = V_{in} \left(\frac{d_{33}}{2R} + \frac{d_{31}}{w} \right) \quad (28)$$

For the PZT tube we have the following constants:

$d_{31} = -122$ pm/V; $d_{33} = 300$ pm/V; $R = 22.56 \times 10^{-3}$ m and $w = 3.3 \times 10^{-3}$ m.

Substituting the above constants in (28) we have

$$\frac{\Delta L}{L} = -30.32 \times 10^{-9} V_{in} \quad (29)$$

From (2) in a constant temperature environment and substituting the constants we have:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = 0.78 \frac{\Delta L}{L} \quad (30)$$

Substituting (28) in (30) we finally have:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -23.65 \times 10^{-9} V_{in} \quad (31)$$

Now, considering the central Bragg wavelength at rest, $\lambda_B=1558.024$ nm, we get to the following sensitivity for our system:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta V} = -36.85 \times \frac{10^{-3} \text{ pm}}{\text{V}}, \quad (32)$$

which means a Bragg wavelength shift of 36.85 pm per each 1,000 V applied to the PZT.

As a second approach, in order to increase the sensitivity, another setup was tested which is shown schematically in Fig. 2. It makes use of a mechanical amplifier with the possibility of varying the gain by changing the position of the tension screw along the upper lever. The tension screw transfers the PZT displacement to the optical-fiber, with the FBG bonded on the levers' tips so that we now use the longitudinal mode strain of the PZT tube: the length displacement.

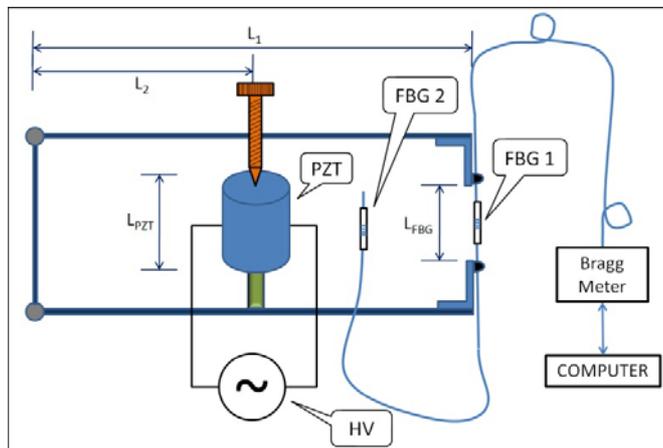


Fig. 2. The setup with a variable-gain mechanical amplifier.

Notice that by bonding the FBG on the PZT as we did in the first setup, we have the strain on the FBG equal to the strain on the PZT. However, when we bond the FBG in to the mechanical amplifier's levers, we have the displacement of the PZT (ΔL_{PZT}) transferred to the FBG by the levers. The ratio L_2/L_1 (see Fig. 2) represents the amplification of ΔL_{PZT} applied to the FBG, producing ΔL_{FBG} .

If $L_1=L_2$, we would have the same displacement in both PZT and FBG:

$$\Delta L_{PZT} = \Delta L_{FBG} = \Delta L \quad (33)$$

and then we have the following strains:

$$\varepsilon_{FBG} = \frac{\Delta L}{L_{FBG}} \quad (34)$$

$$\varepsilon_{PZT} = \frac{\Delta L}{L_{PZT}} \quad (35)$$

The ratio between these two strains is L_{PZT}/L_{FBG} , meaning that if we make the length of the FBG smaller than the length of the PZT, we get another amplification factor.

Now, combining these two ratios, we find the total gain of the mechanical amplifier:

$$G = \frac{L_1}{L_2} \times \frac{L_{PZT}}{L_{FBG}} \quad (36)$$

In the setup of the experiment the position of the tension adjustment screw in the upper lever combined with the length of the PZT tube and the length of the optical fiber provided a strain amplification $G=1.98$.

Starting again from (5) we now have:

$$\frac{\Delta h}{h} = d_{32} \frac{V_{in}}{w} \quad (37)$$

Where $\frac{\Delta h}{h}$ is the relative change in height of the PZT tube, h is the height of the tube, w is the wall thickness and d_{32} is the piezoelectric coefficient in the longitudinal direction. These parameters have the following values: $h = 35$ mm; $w=3.3 \times 10^{-3}$ m and $d_{32} = -122$ pm/V.

Substituting the above constants in (37) we get:

$$\frac{\Delta h}{h} = -36.97 \times 10^{-9} V_{in} \quad (38)$$

But since we have a multiplication factor of 1.98, the strain experienced by the fiber will be

$$\frac{\Delta L}{L} = 73.20 \times 10^{-9} V_{in} \quad (39)$$

Now substituting (39) in (30) we have:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = -57.10 \times 10^{-9} V_{in} \quad (40)$$

Considering a central Bragg wavelength at rest, $\lambda_B=1560.025$ nm, we arrive at the following sensitivity:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\Delta V} = -89.07 \times \frac{10^{-3} \text{ pm}}{\text{V}}, \quad (41)$$

which means a shift of 89.07 pm for each 1,000 V applied to the PZT.

Figure 3 shows a picture of the setup with the Bragg meter and the high voltage power supply and Fig. 4 shows a picture of the tube installed in the mechanical amplifier whose diagram was shown in Fig. 1. The electro-optic setup shown in Fig. 2 was composed of a Bragg meter, a 6-kV-DC variable power supply applied to the PZT, optical fibers inscribed with FBG and a computer to trace the FBG's return signal and detect the center wavelength displacement. The Bragg meter we used is the FS 2200 from Fiber Sensing, presenting a resolution of 1.0 pm and absolute accuracy of 2.0 pm.

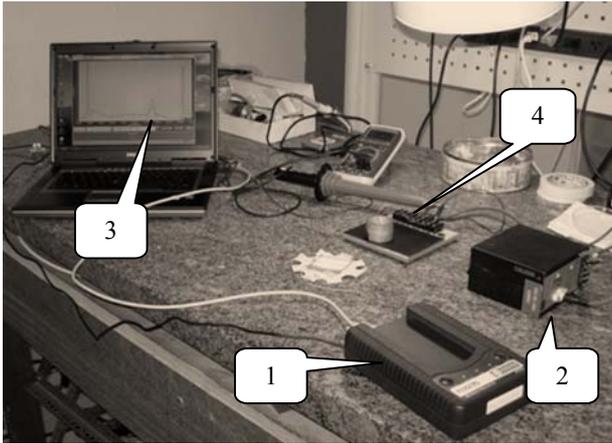


Fig. 3. The complete setup showing the Bragg meter (1), the high voltage power supply (2), the FBG spectrum (3) and the PZT crystal with the fiber wound around it (4).

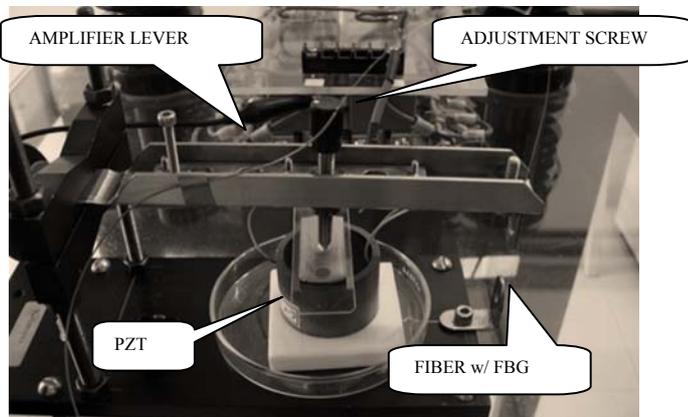


Fig. 4. The PZT ceramic on the mechanical amplifier.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

For the first experiment, only DC voltages were applied to the PZT since the Bragg meter we used to demodulate the FBG signal is too slow to respond to the 60-Hz line frequency. In the first setup the fiber was wound and glued around the PZT tube and for the second setup the tube was fixed to the mechanical amplifier shown in Fig. 4. This setup consists of a mechanical amplifier with the possibility of varying the gain by changing the position of the screw along the upper lever.

By applying a DC voltage to the PZT and recording the respective Bragg shift, it was possible to plot the graphs shown in Fig. 5. The lower graph is the wavelength shift of the first experiment and the upper graph is the response of the second experiment. In this last experiment we used insulating oil in order to increase the applied voltage. The correlation coefficients (R^2) were 0.9936 and 0.9990 for the first and second experiment, respectively, which showed very good correlations and repeatability of the results in all measurements.

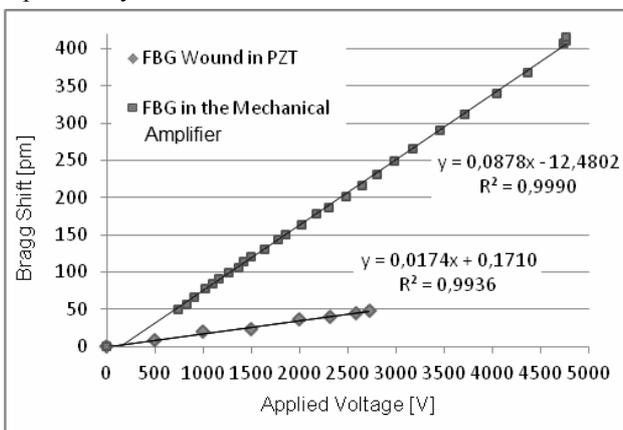


Fig. 5. Bragg shift vs. applied voltage. The upper trace was obtained with the mechanical amplifier; the lower trace was obtained with the fiber wound around the PZT.

The following items will separately discuss the different aspects necessary for the development of a robust instrument transform prototype that can leave the laboratory bench and go successfully to the field.

A) Sensitivity

The experimental sensitivity of the first experiment was smaller than that expected by the theoretical analysis: -17.35 pm/kV and -36.85 pm/kV , respectively. This difference can be attributed to the fact that the fiber was wound around the PZT tube with its primary acrylate coating. However, the coating can be compressed against the external tube wall, therefore decreasing the strain of the fiber. The reason for keeping the primary coating in this experiment is that it protects the fiber from breaking due to the small curvature of the PZT tube. This effect is not present in the second experiment, since the fiber is only fixed by two points and does not touch other parts.

B) Accuracy

Notice that in Fig 5 it is clear that there is a good relationship between wavelength and the applied voltage with a correlation coefficient of 0.9990. Therefore, the inaccuracy of this system could only come from the wavelength measurement by the Bragg Meter. If S is the sensitivity of the sensor in pm/V , an inaccuracy of 1 pm in the Bragg Meter will lead to $1/S$ inaccuracy in voltage, that is, the larger the sensitivity, the smaller the inaccuracy.

In the first experiment (fiber wound around PZT tube), the sensitivity is given by (32), or 36.85 pm per each $1,000 \text{ V}$ applied to the PZT. In this case, for an inaccuracy in wavelength measurement of 2 pm (the Bragg Meter's uncertainty), we would have an inaccuracy in voltage of 54.27 V or about 0.39% of full scale for 13.8 kV line voltage. Obviously, this is not satisfactory for a 0.2-class instrument transformer in revenue metering application.

In order to increase sensitivity, the mechanical amplifier was designed in such a way that a PZT displacement is transferred to the FBG, multiplied by the amplifier gain given by (36). In the second experiment (with mechanical amplifier), we obtained a sensitivity of 89.07 pm for each $1,000 \text{ V}$ applied to the PZT (Equation 41). Then, an inaccuracy in wavelength of 2 pm will lead to an inaccuracy in voltage of 22.45 V . In the TC's line voltage of 13.8 kV this error is 0.16% , therefore meeting the 0.2-Class of instrument transformer, IEC 60044-5.

Since an increase in the gain of the mechanical amplifier given by (36) leads to a greater level of sensitivity, we can decrease the distance from PZT to the amplifier hinge (L_2) or decrease the length of the FBG (L_{FBG}) and consequently decrease the inaccuracy.

C) Mechanical stability

How could the vibrations applied to the setup interfere with the results in field applications? The mechanical amplifier has only one movable part which is the upper lever (see Fig. 4). This part was made of steel to have the highest possible elastic modulus and with the smallest dimensions as possible so as to avoid a great mass. In this way, vibrations applied to the mechanical amplifier will be minimally transferred to the FBG, due to the low inertia and high Young modulus of the lever. All other parts are very rigid, including the PZT ceramics and the FBG itself which presents a Young modulus of 75 GPa , close to that of steel. In an instrument transformer, either a Current Transformer or a Voltage Transformer, the vibrations are mainly of 60 Hz , due to magnetic movement of the transformer core. However, in the case of an optical TC, there is no iron core to vibrate and then this equipment is noiseless and does not present these kind of vibrations.

D) Fiber longevity in field applications

One of the most fragile components within a fiber optic-based piece of equipment is, undoubtedly, the optical fiber. The completely coated fiber is fairly resistant, but prior to the process of inscription of the FBG, the primary coating must be removed because it not only absorbs the UV radiation but also defocuses the periodic grating projected on the fiber.

The maximum strain an optical fiber may be subjected to is determined by the IEC 60793 [15] as 1% . This figure is valid for pristine fibers, but when an optical fiber is subjected to an FBG inscription, the exposure to ultraviolet radiation decreases the silica yield strength [16]. Additionally, when bonding the optical fiber to a stress element, the fiber's primary coating must be removed, otherwise the fiber will slip inside its coating. Since, the role of the primary coating is to protect the fiber against humidity and breakage when curved, when the coating is removed, either for the FBG inscription or to bond the fiber onto the stress element, the fiber may have its longevity compromised. Indeed, the fiber without its coating becomes extremely fragile, particularly when accidentally curved or wound around the PZT crystal.

The second experiment had the greatest gain and therefore imposed the maximum strain on the fiber with $V_{\text{in}}=5,000 \text{ V}$. The strain is, according to (39), $366 \mu\epsilon$, or 0.037% which is well below IEC limits.

Even with such a small amount of stress, the fiber is still uncoated, when the ideal solution would be to keep it with its coating wherever possible. A few solutions are available to circumvent this problem. Müller et al [17] suggested changing the primary polymeric coating of the fiber to a metallic coating. They deposited copper over the fiber using the electroplating technique. In this way, the fiber may be surface bonded to the stress element by soldering.

In order to avoid the process of removing an already fabricated coating before the FBG inscription and obtain a grating with

the full mechanical strength, Dong et al [18] demonstrated a method of writing the FBG during fiber drawing. These FBGs are commercially known as Draw Tower Gratings (DTG) and are available from a few laboratories. Additionally, a polymeric coating transparent to the UV radiation has recently been developed. Indeed, Gu et al [19] have demonstrated a laser process of fabricating fiber Bragg grating directly through fiber buffer using a polysiloxane coated optical fiber and femtosecond-pulsed-laser. Another approach is the relatively new ceramic coating known as Organic Modified Ceramic (ORMOCER®) that is applied to the fiber after the DTG process. Because this ceramic is very stiff, these FBGs can be mounted directly onto a structure without coating removal for sensing applications.

V. CONCLUSIONS

In this paper we have demonstrated a new measurement scheme for developing an optical VT, concerned with accuracy, repeatability and reliability appropriated to a field instrument that complies with the standard IEC 60044-5.

The main conclusion of this work is that this setup can be used as a core of a practical 13.8 kV-Class VT if the issues mentioned above are resolved. Also, the difference between the maximum allowed voltage to be applied to PZT and the 13.8 kV expected to be measured can be easily obtained by a capacitive divider. The divider will also be used when this system will be scalable to the 500-kV-Class VT. These results are preliminary and a more appropriate setup is under development which will use the twin grating technique for the demodulation of AC voltages and a PZT disk stack to increase the longitudinal displacement, resulting in an improved level of accuracy.

REFERENCES

- [1] T. Sawa, K. Kurosawa, T. Kaminishi and T. Yokota, "Development of optical instrument transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 5, No. 2, pages 884-891, April 1990.
- [2] T. W. Cease, J. G. Driggans, and S. J. Weikel, "Optical voltage and current sensors used in a revenue metering system" Transactions on Power Delivery, IEEE, Volume 6, Issue 4, pages 1374-1379, October 1991.
- [3] A. Klimek, "Optical Technology: A new Generation of Instrument Transformer", Electricity Today, issue 2, 2003.
- [4] S. K. Lee, "Electrooptic voltage sensor: birefringence effects and compensation methods", App. Optics, vol. 29, no. 30, October 1990.
- [5] Emerging Technologies Working group and Fiber Optic Sensors Working Group, "Optical Current Transducers for power systems: a review", IEEE Trans. Power Delivery, 9(4), pages 1778-1788, 1994.
- [6] M. M. Werneck, A. C. S. Abrantes, "Fiber-optic-based current and voltage measuring system for high-voltage distribution lines", IEEE Transactions on Power Delivery 19 (3): 947-951 Jul 2004.
- [7] IEC60044-5, "Instrument Transformers-Part 5-Capacitor Voltage Transformers" International Electrotechnical Commission, 2004.
- [8] G. Meltz, W. W. Moorey and W. H. Glenn: "Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by Transverse Holographic Method". Optics Letters, Vol. 14, pages: 823-825, 1989.
- [9] A. Othonos, K. Kalli, "Fiber Bragg Gratings – Fundamentals and Applications" in Telecommunications and Sensing, Artech House, 1999.
- [10] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, E. J. Friebele, "Fiber Grating Sensors", Journal of Lightwave Technology, Vol 15, pp. 1442-1463, 1997.
- [11] S. M. Melle, K. Liu, and R. M. Measures, "A passive wavelength demodulation System for guided-wave Bragg Grating Sensors". IEEE Photonics Technology Letters, Vol 4, No 5 May 1992.
- [12] 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 Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 54, no. 4, August 2005.
- [13] PI (Physik Instrumente) Designing with Piezoelectric Transducers: Nanopositioning Fundamentals, available at www.PIceramics.com, 2010.
- [14] Y. S. Hsu, L. Wang, Wen-Fung Liu, and Y. J. Chiang, "Temperature Compensation of Optical Fiber Bragg Grating Pressure Sensor", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18, No. 7, April 1, 2006
- [15] IEC 60793-1-1, "Optical fibres – Part 1-1: Measurement methods and test procedures – General and guidance", International Electrotechnical Commission, 2008.
- [16] Hyuk-Jin Yoon et al, "The mechanical strength of fiber Bragg gratings under controlled UV laser conditions", Smart Mater. Struct., pp:1315-1319, Vol. 16, Issue 4, August 2007.
- [17] M. S. Müller, L. Hoffmann, T. Lautenschlager, A. W. Koch, "Soldering fiber Bragg grating sensors for strain measurement", 19th International Conference on Optical Fibre Sensors, Proceedings of the SPIE, Volume 7004, pp. 70040B-70040B-4, 2008.
- [18] L. Dong, J. L. Archambault, L. Reekie, P. St. J. Russell and D. N. Payne, "Single pulse Bragg gratings written during fibre drawing", Electronics Letters, pp: 1577–1578, Volume 29, Issue 17, 19 Aug. 1993.
- [19] X. Gu, L. Guan, Y. He, H. B. Zhang, R. Herman, "High-strength fiber Bragg gratings for a temperature-sensing array", IEEE Sensors Journal, Volume 6, Issue 3, pp: 668–671, June 2006.

Regina Célia da Silva Barros Allil, was born in Rio de Janeiro, Brazil. She graduated as an Electronic Engineer from the Faculdade Nuno Lisboa, Rio de Janeiro in 1988. She is a researcher of the Brazilian Army Technology Center (CTEx), Rio de Janeiro. Her MSc. degree was obtained from the Biomedical Engineering Program of the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ) in 2004. She is currently a PhD student of the Electronic Engineering Program in the Photonics and Instrumentation Laboratory at the Federal University of Rio de Janeiro. Her research interest lies in fiber optics sensors and infrared night vision systems.



Marcelo Martins Werneck was born in Petrópolis, state of Rio de Janeiro, Brazil. He received a degree in Electronic Engineering from the Pontificia Universidade Católica of Rio de Janeiro, Brazil in 1975 and a 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 coordinator of the Instrumentation and Photonics Laboratory at the Electrical Engineering Program of UFRJ. His research interests include fiber optics, sensors, transducers, and instrumentation.



ANEXO 3. Publicação em Periódicos Internacionais

R.C.S.B.Allil and M.M.Werneck, “Optical high voltage sensor based in fiber Bragg grating and PZT piezoelectric ceramics”, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, (aceito em Junho/2010).

M.M.Werneck and R.C.S.B. Allil, “Fiber Bragg Grating Temperature Sensing System for Large Air Cooled Hydrogenerators”, IEEE PES Transactions on Power Delivery, (submetido em Maio/2010).

ANEXO 4. Tabelas

Tabela 4.8 (Figura 4.8)

Temperatura (°C)	Comprimento de onda de cruzamento da referência de - 37,5 dBm (subida e descida) em nm	Comprimento de onda central (nm)
40,0	1557,3892	1558,2302
	1559,0712	
51,2	1557,5052	1558,3462
	1559,1872	
61,1	1557,6096	1558,4506
	1559,2916	
70,8	1557,714	1558,555
	1559,396	
80,9	1557,83	1558,671
	1559,512	
95,0	1557,9924	1558,8334
	1559,6744	

Tabela 5.3 (Figuras 5.3 e 5.4)

FBG= 1558,07 nm		
Comprimento de Onda (nm)		Deslocamento (nm)
Sem peso:	1558,07	0,96
Com peso:	1557,11	

Tabela 5.12 (Figura 5.12)

FBG= 1558,024 nm		
Tensão (V)	Comprimento de Onda (nm)	Deslocamento (nm)
0	1558.024	0.000
500	1558.016	8.000
1000	1558.004	20.000
1490	1558.000	24.000
2000	1557.988	36.000
2310	1557.984	40.000
2580	1557.980	44.000
2720	1557.976	48.000

Tabela 5.13 (Figura 5.13)

FBG= 1557,19 nm.				
Tensão (V)	Comprimento de Onda (nm)		Deslocamento (pm)	
3530	1557,9312	0,1388	138,8	
3000	1557,9048	0,1652	165,2	
2530	1557,8856	0,1844	184,4	
2030	1557,8676	0,2024	202,4	
1500	1557,8484	0,2216	221,6	
1010	1557,8376	0,2324	232,4	
500	1557,8268	0,2432	243,2	
0	1557,816	0,254	254	
-510	1557,8016	0,2684	268,4	
-1000	1557,794	0,276	276	
-1500	1557,7816	0,2884	288,4	
-2060	1557,7748	0,2952	295,2	
-2500	1557,768	0,302	302	
-3020	1557,7608	0,3092	309,2	

Tabela 5.16 (Figura 5.16)

FBG= 1555,852 nm nm.				
Tensão (V)	Comprimento de Onda (nm)		Deslocamento (pm)	
0	1556.69	0,84	840	
500	1556.69	0,84	840	
1000	1556.7	0,85	850	
1500	1556.73	0,88	880	
2000	1556.75	0,90	900	
2500	1556.78	0,93	930	
3000	1556.79	0,94	940	
0	1556.58	0,73	730	
-500	1556.53	0,68	680	
-1000	1556.51	0,66	660	
-1500	1556.48	0,63	630	
-2000	1556.44	0,59	590	
-2500	1556.41	0,56	560	
-3000	1556.39	0,54	540	

Tabela 5.19 (Figura 5.19)

FBG= 1557,028 nm.			
Tensão (V)	Comprimento de Onda (nm)	(nm)	Deslocamento (pm)
3500	1 558.503	1,475	1475
3000	1 558.528	1,500	1500
2500	1 558.531	1,503	1503
2000	1 558.552	1,524	1524
1500	1 558.570	1,542	1542
1000	1 558.587	1,559	1559
500	1 558.600	1,572	1572
0	1 558.617	1,589	1589
-500	1 558.599	1,571	1571
-1000	1 558.604	1,576	1576
-1500	1 558.620	1,592	1592
-2000	1 558.634	1,606	1606
-2500	1 558.654	1,626	1626
-3000	1 558.676	1,648	1648
-3500	1 558.692	1,664	1664
-4000	1 558.720	1,692	1692
-4400	1 558.746	1,718	1718

Tabela 5.22 (Figura 5.22)

FBG= 1540,59 nm.	
Tensão (V)	Comprimento de Onda (nm)
0	1540,59
500	1540,576
1000	1540,551
1500	1540,532
2000	1540,522
2500	1540,508
3000	1540,481
3500	1540,461
4000	1540,437
4500	1540,415
0	1540,463
-500	1540,47
-1000	1540,471
-1500	1540,475
-2000	1540,48
-2500	1540,485
-3000	1540,491
-3500	1540,5
-4000	1540,499
-4500	1540,506

Tabela 5.25 (Figura 5.25)

FBG= 1560,025 nm.				
Tensão (V)	Comprimento de Onda (nm)	(nm)	Deslocamento (pm)	
0.00	1559.976	0.05	49	
740	1559.968	0.06	57	
830	1559.959	0.07	66	
900	1559.947	0.08	78	
1020	1559.941	0.08	84	
1100	1559.934	0.09	91	
1160	1559.926	0.10	99	
1260	1559.919	0.11	106	
1370	1559.911	0.11	114	
1420	1559.904	0.12	121	
1500	1559.894	0.13	131	
1630	1559.882	0.14	143	
1780	1559.874	0.15	151	
1850	1559.862	0.16	163	
2020	1559.847	0.18	178	
2180	1559.839	0.19	186	
2300	1559.823	0.20	202	
2480	1559.809	0.22	216	
2650	1559.794	0.23	231	
2800	1559.776	0.25	249	
2980	1559.760	0.27	265	
3170	1559.735	0.29	290	
3450	1559.714	0.31	311	
3710	1559.686	0.34	339	
4050	1559.657	0.37	368	
4370	1559.617	0.41	408	
4740	1559.615	0.41	410	
4760	1559.609	0.42	416	
4770	1559.609	0.42	416	

Tabela 5.26 (Figura 5.26)

FBG= 1560,25 nm.	
Tensão (V)	Comprimento de Onda (nm)
0,00	1560,25
650	1559,582
740	1559,976
830	1559,968
900	1559,959
1020	1559,947
1100	1559,941
1160	1559,934
1260	1559,926
1370	1559,919
1420	1559,911
1500	1559,904
1630	1559,894
1780	1559,882
1850	1559,874
2020	1559,862
2180	1559,847
2300	1559,839
2480	1559,823
2650	1559,809
2800	1559,794
2980	1559,776
3170	1559,760
3450	1559,735
3710	1559,714
4050	1559,686
4370	1559,657
4740	1559,617
4760	1559,615
4770	1559,609

Tabela 5.29 (Figura 5.29)

FBGs= 1553,242 nm e 1553,254 nm.	
Tensão (V)	Comprimento de Onda (nm)
	Teste 1
0	1553,242
370	1553,263
1220	1553,317
2100	1553,396
2550	1553,443
2960	1553,473
	Teste 2
0	1553,254
550	1553,281
990	1553,31
1440	1553,346
1900	1553,385
2340	1553,422
2770	1553,447

Tabela 5.31 (Figura 5.31)

FBG= 1545,162 nm.	
Tensão (V)	Comprimento de Onda (nm)
90	1545,162
330	1545,172
560	1545,185
790	1545,199
1010	1545,215
1250	1545,231
1480	1545,252
1690	1545,271
1930	1545,287
2130	1545,301
2390	1545,324
2630	1545,342
2860	1545,361
3060	1545,381
3260	1545,4
3720	1545,435
4200	1545,473
4390	1545,503
4600	1545,525

4810	1545,542
5030	1545,558
5270	1545,585
5510	1545,606
5950	1545,642
6380	1545,682
6830	1545,721
7270	1545,757
7740	1545,788
8120	1545,822
8370	1545,836

Tabela 5.32 (Figura 5.32)

Exp 32 STACK 6X	
Tensão DC (V)	Comprimento de Onda (nm)
90	1545,192
560	1545,216
1010	1545,244
1690	1545,283
2370	1545,325
3020	1545,370
3710	1545,425
4380	1545,475
5040	1545,532
5730	1545,595
6410	1545,653
7040	1545,699
7470	1545,727
7900	1545,776
8090	1545,802
8370	1545,820

Exp 33 STACK 5X	
Tensão DC (V)	Comprimento de Onda (nm)
90	1545,233
790	1545,268
1460	1545,301
2120	1545,334
2790	1545,378
3470	1545,422
4170	1545,464
4830	1545,523
5470	1545,565
6130	1545,614
6840	1545,669
7460	1545,72
7910	1545,76
8130	1545,777
8320	1545,791

Exp 34 STACK 4X	
Tensão DC (V)	Comprimento de Onda (nm)
90	1545,269
800	1545,293
1460	1545,318
2130	1545,343
2840	1545,378
3500	1545,412
4190	1545,446
4840	1545,486
5530	1545,521
6180	1545,556
6810	1545,6
7460	1545,644
8130	1545,686
8320	1545,704

Exp 35 STACK 3X	
Tensão DC (V)	Comprimento de Onda (nm)
90	1545,292
790	1545,308
1470	1545,325
2120	1545,344
2800	1545,365
3490	1545,393
4170	1545,417
4830	1545,439
5490	1545,466
5510	1545,473
6160	1545,512
6830	1545,531
7480	1545,56
7960	1545,586
8360	1545,608

Exp 36 STACK 2X	
Tensão DC (V)	Comprimento de Onda (nm)
90	1545,306
800	1545,314
1480	1545,324
2240	1545,339
2850	1545,349
3500	1545,364
4200	1545,381
4910	1545,399
5810	1545,421
6720	1545,436
7580	1545,462
8220	1545,484
8440	1545,485

Exp 37 STACK 1X	
Tensão DC (V)	Comprimento de Onda (nm)
90	1545,306
1020	1545,309
1720	1545,313
2620	1545,317
3270	1545,322
4200	1545,328
4890	1545,336
5780	1545,347
6050	1545,35
6430	1545,354
6700	1545,358
7130	1545,364
7530	1545,37
7980	1545,375
8280	1545,382

ANEXO 5. Instalação do software do interrogador óptico

Espectral Eye 400

O *software* denominado de "FBG-interrogator software V1.56.exe" é escrito em Labview 7.1.

O processo para instalação do software se resume nas seguintes etapas:

1. Inserir o CD-rom de instalação do Spectral Eye 400.
2. Operação "*setup*" e siga as instruções.

Estas informações podem ser encontradas em: *cdrom\software\PC software\installer*.

O diretório de instalação é: "c:\ Program Files\FBG-interrogator V1.56\".

"Setup" instalará ambos o software *SpectralEye* 400 e o Labview 7.1.

3. Depois da instalação deve-se checar se o arquivo *c:\config.txt* está instalado e configurado.
4. O *software* é iniciado através do "*start/programs/FBG-interrogator software V1.56/*".

O procedimento para utilização do *software* é descrito:

- 1- Ligar o interrogador óptico.
- 2- Selecionar o V1.56 na tela de trabalho.
- 3- Quando o V1.56 for aberto, selecionar Porta #2.
- 4- Inicialmente, a Tabela de Calibração dos sensores deverá ser selecionada através da tela "*Temperature*" pelo seguinte procedimento:

Obs.1: O botão "*Load Setting*" deverá ser acionado visando carregar o sistema através da Tabela de Calibração:

Endereço Tabela de Calibração: C:\Tabelas de calibração\Tabela calibração 6 FBGs PUC-ver01.

Obs. 2: Sendo possível também a inserção dos dados da tabela de calibração via digitação na tela "*Temperature*", com os dados apresentados na Tabela 2 referente a Tabela de Calibração dos 6 sensores para a temperatura de 25°C, através do seguinte procedimento:

Coluna "*nominal wavelength*" (valor em nm para 25 °C) e na coluna "*Sensitivity*" (valor em pm/°C).

Obs. 3: Em caso de desligamento ou falta de energia do interrogador óptico a Tabela de Calibração deverá ser novamente inserida.