



**COPPE/UFRJ**

SENSOR MONOPONTO DE TEMPERATURA BASEADO EM REDES DE BRAGG  
GÊMEAS.

Rodrigo Pereira de Oliveira

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Rio de Janeiro  
Setembro de 2009

SENSOR MONOPONTO DE TEMPERATURA BASEADO EM REDES DE BRAGG  
GÊMEAS

Rodrigo Pereira de Oliveira

DISSERTAÇÃO 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 MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

---

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph.D.

---

Prof<sup>a</sup>. Mariane Rembold Petraglia, Ph.D.

---

Prof. Ricardo Marques Ribeiro, D. Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Isabel Cristina dos Santos Carvalho, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
SETEMBRO DE 2009

Oliveira, Rodrigo Pereira de

Sensor Monoponto de Temperatura Baseado em Redes de Bragg Gêmeas/Rodrigo Pereira de Oliveira – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

VIII, 94 p.: il.; 29,7.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2009.

Referência Bibliográficas: p 90-94.

1. Sensores a Fibra Óptica. 2. Fibra Óptica. 3. Convolução. I. Werneck, Marcelo Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título

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

## SENSOR MONOPONTO DE TEMPERATURA BASEADO EM REDES DE BRAGG GÊMEAS.

Rodrigo Pereira de Oliveira

Setembro/2009

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Programa: Engenharia Elétrica

A temperatura é uma grandeza física que interfere diretamente em vários aspectos sociais e naturais. No entanto, medidas desse parâmetro podem ser realizadas em ambientes com altos campos eletromagnéticos ou com presença de gases inflamáveis, onde os sensores elétricos tradicionais não realizam medidas confiáveis e seguras.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sensor de temperatura baseado em Redes de Bragg em Fibra (FBG) e demodulado por uma FBG filtro fixo. Foi realizada uma simulação da convolução entre duas FBGs, filtro e sensor, para verificação de viabilidade da técnica. Etapas seguintes do projeto incluem a montagem de um sistema óptico baseado na técnica de demodulação por um filtro fixo, e a posterior variação térmica no sensor interrogado pelo sistema óptico.

Para as medidas de temperatura no sistema óptico foram utilizados os seguintes equipamentos: um Analisador de Espectro Óptico um medidor de potência óptica e um fotodetector de germânio juntamente com um amplificador de transimpedância, desenvolvido e testado neste trabalho.

Os resultados mostram a viabilidade do sistema óptico utilizando a técnica de filtros fixos, apresentando linearidade na faixa de temperatura testada e ausência de histerese.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

## MONOPOINT TEMPERATURE SENSOR BASED ON TWIN FIBER BRAGG GRATINGS

Rodrigo Pereira de Oliveira

September/2009

Advisor: Marcelo Martins Werneck

Program: Electrical Engineering

Temperature is a physical quantity that interferes directly in various social and natural aspects. However, measurements of this parameter can be performed in environments immersed in high electromagnetic fields or in the presence of flammable gases, where traditional electrical sensors do not perform safe and reliable measurements.

This dissertation presents the development of a temperature sensor based on Fiber Bragg Grating (FBG) and demodulated by a FBG fixed filter. A convolution simulation was performed between two FBGs, filter and sensor, to verify the feasibility of the technique. Next stages of the project include the assembly of an optical system based on demodulation technique for a fixed filter.

To perform the temperature measurements in the optical system the following equipments were employed: an Optical Spectrum Analyzer (OSA), an optical power meter (PM), and a germanium photodetector with a transimpedance amplifier, developed and tested in this study.

The results show the feasibility of the optical system using the fixed filters technique, demonstrating linearity in the tested temperature range and the absence of hysteresis.

# ÍNDICE

<b>CAPITULO I .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivo .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Principais etapas do trabalho .....</b>	<b>2</b>
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Fundamentação Teórica .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Sensores .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Sensores a Fibra Óptica – Configuração Básica.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2.1. Sensores Modulados por Intensidade. ....</b>	<b>5</b>
<b>2.2.2. Sensores Modulados por Fase .....</b>	<b>7</b>
<b>a. Interferômetro de Mach-Zehnder.....</b>	<b>8</b>
<b>b. Interferômetro de Michelson.....</b>	<b>10</b>
<b>c. Interferômetro de Fabry-Perot.....</b>	<b>11</b>
<b>d. Interferômetro de Sagnac .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.3. Sensores Modulados por Comprimento de Onda.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3. Classificações dos Sensores a Fibra Óptica.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3.1. Extrínsecos .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3.2. Intrínsecos .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4. Configurações de Sensores a Fibra Óptica.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5. Redes de Bragg em Fibra.....</b>	<b>17</b>
<b>2.5.1. História .....</b>	<b>17</b>
<b>2.5.2. Teoria das FBGs .....</b>	<b>20</b>
<b>2.5.3. Sensibilidade de uma FBG.....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.4. Técnicas de Gravação de uma FBG.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.4a. Gravação Interna de uma FBG.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.4b. Gravação Externa de uma FBG pela Técnica Interferométrica.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.4c. Gravação Externa de uma FBG Pela Técnica de Máscara de Fase.....</b>	<b>28</b>

2.5.4d. Gravação Externa de uma FBG Pela Técnica de Máscara de Fase e Interferometria .....	29
2.5.5. Redes de Período Longo em Fibra Óptica.....	30
2.5.6. Sensibilidade de uma LPG.....	32
2.6. Convolução .....	33
CAPITULO III .....	39
3. Estado da Arte .....	39
3.1. Demodulação por Comprimento de Onda .....	40
3.2. Demodulação por Filtros Fixos .....	42
CAPITULO IV.....	47
4. Materiais e Métodos .....	47
4.1. Redes de Bragg em Fibra Óptica .....	47
4.2. Analisador de Espectro Óptico.....	48
4.3. Fonte Óptica ASE-FL7002.....	49
4.4. Medidor de Potência Óptica FPM-8200 .....	50
4.6. Termômetro Salvterm.....	52
4.7. Agitador Térmico .....	53
4.8. Acoplador em Y .....	54
4.9. Circulador .....	54
4.10. Montagem para caracterização das FBGs .....	55
4.11. Montagem para medição com o OSA .....	56
4.12. Montagem para medição com o PM .....	57
4.13. Montagem do amplificador de transimpedância.....	59
4.14. Montagem para medição com o amplificador de transimpedância.....	60
4.15. Simulação de experimento no computador .....	61
4.16. Calibração do termopar .....	62
CAPITULO V .....	63
5. Resultados e Discussões.....	63
5.1. Caracterização das redes .....	63
5.2. Simulação de experimento .....	64
5.3. Caracterização da sensibilidade térmica da FBG sensora 1538,2 nm.....	69
5.4. FBG Filtro 1540,4 nm.....	71

<b>5.5. Ensaio Térmico Experimental.....</b>	<b>73</b>
<b>5.5.1. Medida com o Analisador de Espectro Óptico .....</b>	<b>74</b>
<b>5.5.2. Medida com o Power Meter.....</b>	<b>76</b>
<b>5.5.3. Medida com o Amplificador de transimpedância .....</b>	<b>79</b>
<b>5.6. Análise dos dados por Distribuição t de “Student” .....</b>	<b>81</b>
<b>5.7. Calibração do Termopar Salvterm 1200K.....</b>	<b>83</b>
<b>CAPITULO VI.....</b>	<b>85</b>
<b>6. Conclusões .....</b>	<b>85</b>
<b>CAPITULO VII.....</b>	<b>89</b>
<b>7. Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>89</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>90</b>

# CAPITULO I

## 1.1. Introdução

A fibra óptica (FO) é um guia de onda eletromagnética, ou seja, é capaz de transmitir luz por longas distâncias e com baixa atenuação. A FO é usada principalmente em telecomunicações, uma tecnologia bem amadurecida e desenvolvida, e sensoriamento, no qual apresenta um contínuo avanço tecnológico.

Em processos industriais a utilização de sensores é de grande importância para o acompanhamento das diversas etapas da produção. Em muitas aplicações, é desejável que estes sensores não produzam faíscas elétricas, o que poderia levar a acidentes com substâncias inflamáveis. Além disso, os sensores a FO possuem baixa reatividade química (OTHONOS & KALLI, 1999).

Se comparado com os sensores elétricos tradicionais, o sensoriamento a FO apresenta vantagens tais como: baixo peso, imunidade à interferência eletromagnética (EMI – *Electromagnetic Immunity*), sensoriamento remoto, pequenas dimensões, alta precisão, resistente à radiação ionizante, não usa eletricidade ao longo da fibra, permite monitoramento em tempo real, permite integração com telecomunicações ou transmissão de dados, baixa atenuação e não explosivo permitindo o monitoramento de grandezas em ambientes hostis e ambientes inflamáveis (WERNECK, 1996; OTHONOS & KALLI, 1999; KROHN, 2000; LI & PENG, 2008).

O uso de sensores elétricos para medidas de temperaturas já é bem desenvolvido e extremamente confiável (NUNES *et al*, 2004). Contudo, os sensores elétricos são dependentes de eletricidade e apresentam algumas restrições a ambientes hostis. Por exemplo, quando sensores a FO estão localizados em ambientes inflamáveis os mesmos ficam sujeitos a explosões, já em ambientes com a presença de altos campos eletromagnéticos podem ser ocasionados erros de leitura (WERNECK, 1996).

O sensoriamento a FO pode ser usado para mensurar vários parâmetros como: tensão mecânica, temperatura, pressão, aceleração, força, distância, deslocamento, microcurvaturas, reações químicas, bactérias entre outros (NUNES *et al*, 2004; HUANG *et al*, 2007; XIAO *et al*, 2008). Em especial, a temperatura é uma grandeza física importante no convívio humano que influi diretamente em fenômenos químicos, físicos, biológicos, sociais, culturais e climáticos (atualmente muito debatidos).

Quando se deseja medir temperaturas em vários pontos é necessária, pela técnica tradicional, a instalação de vários sensores elétricos. Esta necessidade pode ser substituída por um sensoriamento multiponto, onde a FO pode conter vários elementos sensores baseados em Redes de Bragg em Fibra (FBG – *Fiber Bragg Grating*) (NUNES *et al*, 2004; ALLIL *et al*, 2007). Logo, sensores baseados em FBGs podem ser multiplexados utilizando uma única FO para medir vários pontos. Por ser um sensor intrínseco na fibra o seu tamanho é o próprio diâmetro da fibra, o que o torna um sensor de dimensões muito reduzidas. No entanto, a fibra é um dispositivo frágil, o que faz necessário um encapsulamento robusto para protegê-lo, o que pode aumentar muito o tamanho final do sensor.

## **1.2. Objetivo**

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sensor de temperatura utilizando Redes de Bragg em fibra óptica demodulados por filtro fixo.

## **1.3. Principais etapas do trabalho**

No desenvolvimento do presente trabalho as seguintes etapas foram realizadas:

- Simulação de variação térmica da FBG sensora convoluindo com uma FBG filtro fixo;

- Desenvolvimento de um sistema óptico para demodulação da resposta de uma FBG sensora por uma FBG filtro fixo;

- Variação térmica experimental da FBG sensora demodulado pelo sistema óptico desenvolvido, utilizando:

- o Um Analisador de Espectro Óptico (OSA – *Optical Spectrum Analyser*) para a aquisição das respostas espectrais;
- o Um medidor de potência óptica (PM – *Power Meter*) para a medição da potência total;
- o Um fotodetector de germânio amplificador por transimpedância de alto ganho.

## **CAPITULO II**

### **2. Fundamentação Teórica**

Neste capítulo é realizada a fundamentação teórica dos sensores e técnicas utilizadas no desenvolvimento do presente trabalho, onde são abordados fundamentos sobre sensores, sensores a Fibra óptica e a técnica de convolução.

#### **2.1. Sensores**

O Sensor é um elemento, dispositivo ou sistema que converte um mensurando físico, químico ou biológico de interesse em sinal óptico ou elétrico, de forma que possa ser transmitido ou processado (WERNECK, 1996).

Transdutor é um dispositivo que transforma uma grandeza física em outra, aproveitando a lei da conservação de energia. Por exemplo: microfone que transforma vibração mecânica em eletricidade e o alto-falante que transforma a eletricidade em vibração mecânica. Esses dois dispositivos podem ser usados como elemento sensor (KERSEY, 1996).

Um diagrama de blocos de um sistema de sensoriamento é apresentado na Figura 2.1.1. Um parâmetro é mensurado e avaliado por um sensor onde há alteração no sinal ou por um transdutor onde há conversão de uma grandeza física em outra. O sinal é, então, enviado a um condicionador de sinal, podendo ser indicado por um display, gravado, processado ou controlado.

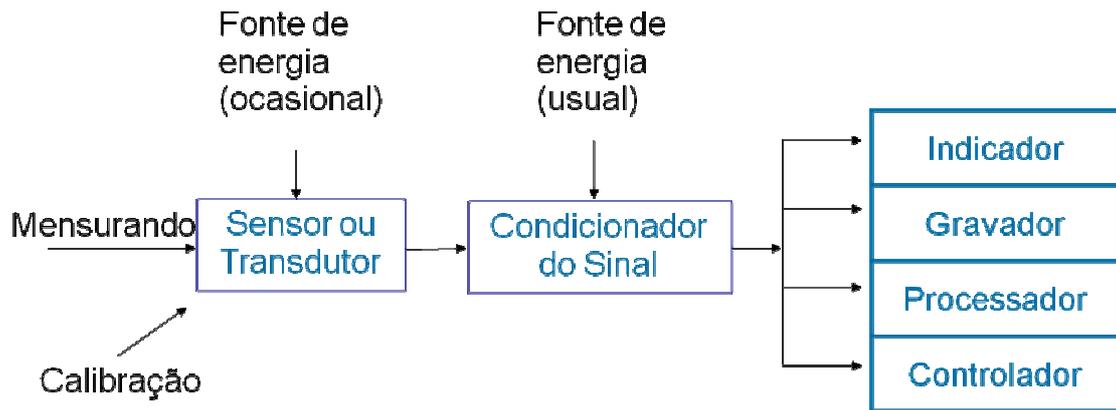


Figura 2.1.1. Diagrama de blocos de um sistema de sensoriamento.

## 2.2. Sensores a Fibra Óptica – Configuração Básica.

Os sensores são baseados na detecção de uma ou mais propriedades da onda-partícula luminosa e podem ter como elemento sensor algumas das suas propriedades alteradas.

Sensores a FO podem ser divididos em 3 categorias básicas: modulado por intensidade, modulado por fase e modulado por comprimento de onda.

### 2.2.1. Sensores Modulados por Intensidade.

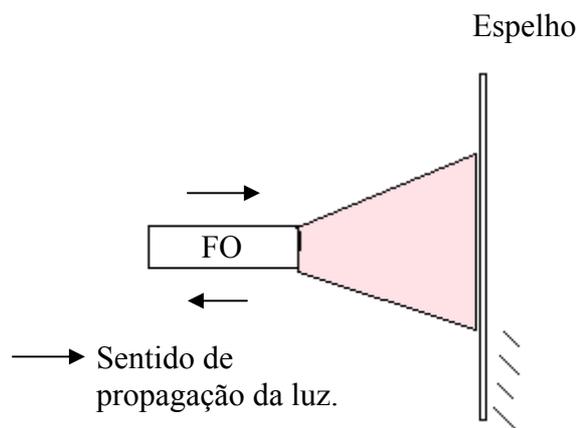
Sensores modulados por intensidade são definidos como aqueles que detectam a variação de intensidade da luz devido a uma perturbação do ambiente. A perturbação causa uma mudança na intensidade da luz recebida em função do fenômeno mensurado.

Alguns conceitos são associados com modulação por intensidade como reflexão, transmissão, microcurvatura, absorção, espalhamento, fluorescência e polarização. Esses conceitos podem ocorrer intrinsecamente ou extrinsecamente a FO. Algumas dessas concepções usadas, como reflexão e transmissão, são especialmente atrativas pela sua ampla capacidade de sensoriamento, precisão, simplicidade e baixo custo. O

sensoriamento na transmissão é normalmente associado com a interrupção da luz em uma configuração de chaveamento (KERSEY & DANDRIDGE, 1990).

Uma desvantagem desse tipo de sensor são as possíveis variações na intensidade devido às variações da fonte óptica, perdas nas conexões das fibras ou perdas por microcurvaturas. Porém, este problema é contornável com um canal de referência o qual é comparado com o canal do sensor.

Um sensor de distância a FO é mostrado como um exemplo de aplicação para sensores modulados por intensidade óptica na Figura 2.2.1. Este sensor tem um princípio bem simples: a luz sai da fibra que reflete no espelho e volta para a mesma. A intensidade do sinal detectado é proporcional à distancia do final da FO ao espelho. Quanto mais distante a fibra estiver do espelho menor será a intensidade óptica reacoplada (KERSEY & DANDRIDGE, 1990).



**Figura 2.2.1. Princípio de um sensor de distância por intensidade óptica a FO.**

Um sensor de gás a FO é apresentado como um outro exemplo de aplicação para sensores modulados por intensidade óptica na Figura 2.2.2. Este sensor detecta a absorção da luz pelos gases na célula de absorção, sendo tipicamente detectado gás metano ( $\text{CH}_4$ ), gás etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) ou gás propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ). Neste sistema a luz propagante na FO é desacoplada desta, colimada na célula de absorção, absorvida pelo gás,

novamente acoplada na FO e, então, processado o sinal de resposta do sensor (KERSEY & DANDRIDGE, 1990).

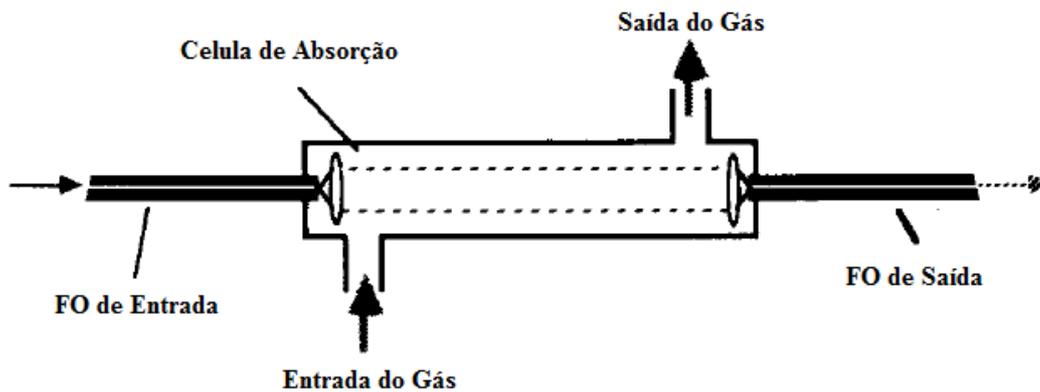


Figura 2.2.2. Princípio de um sensor de detecção de gases por intensidade a FO (Adaptado de KERSEY & DANDRIDGE, 1990).

### 2.2.2. Sensores Modulados por Fase

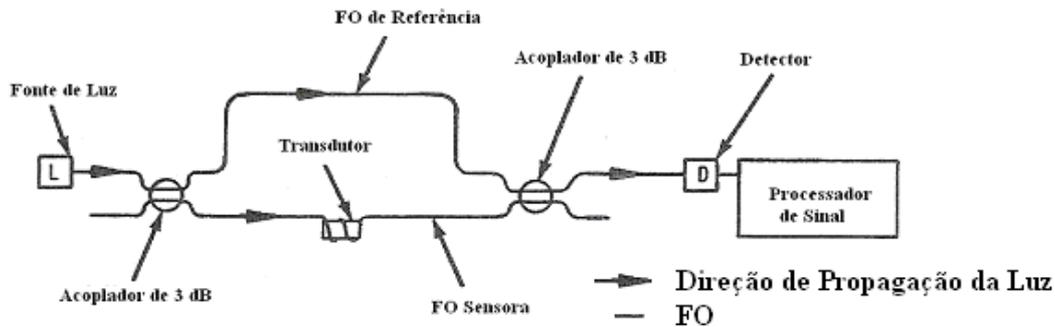
Sensores modulados por fase são os mais publicados entre os sensores a FO devido à sua alta sensibilidade. Geralmente, esses sensores utilizam como fonte de luz um laser de alta coerência e duas fibras monomodo, uma de referência e uma sensora. A luz é dividida e injetada em cada fibra (CULSHAW & KERSEY, 2008).

A luz propagante no braço sensor é comparada com a do braço de referência. Se houver alguma perturbação neste caminho, proveniente ao mensurado, haverá uma mudança de fase que pode ser detectada com grande precisão. Esta diferença é causada por uma variação do caminho que a luz percorre no sensor, e é detectada por um interferômetro (KRONH, 2000). A sensibilidade deste tipo de sensor é da ordem do comprimento de onda propagante na FO (CULSHAW & KERSEY, 2008).

Existem 4 configurações interferométricas: o interferômetro de Mach-Zehnder, de Michelson, de Fabry-Perot e de Sagnac.

### a. Interferômetro de Mach-Zehnder

Na Figura 2.2.3 é mostrado um diagrama de blocos da configuração de um interferômetro de Mach-Zehnder (MZI – *Mach-Zehnder Interferometer*). Um feixe laser é dividido usando um acoplador a fibra de 3 dB, isto é, metade da luz é injetada na FO sensora e metade na FO de referência. Os feixes de luz são recombinados utilizando um segundo acoplador a FO de 3 dB. O feixe combinado é detectado e, então, o deslocamento da fase é medido.



**Figura 2.2.3. Diagrama de blocos de um Interferômetro de Mach-Zehnder (Adaptado de KROHN, 2000).**

O deslocamento de fase é resultado na alteração do comprimento ou mudança do índice de refração do FO sensora. Se o caminho da FO sensora tiver o mesmo comprimento do braço de referência, ou se a diferença no comprimento for, exatamente, igual a um número inteiro de comprimento de onda ( $\lambda$ ), a recominação dos feixes estará exatamente em fase e a intensidade do feixe será máxima (esse fenômeno interferométrico é chamado de interferência construtiva). No entanto, se a diferença entre os dois feixes for igual a meio  $\lambda$ , eles estarão fora de fase e a recominação dos feixes terá o valor mínimo (esse fenômeno interferométrico é chamado de interferência destrutiva).

A modulação nesse tipo de sensor, na totalidade, ocorre abaixo de meio  $\lambda$  da luz utilizada no sistema. Tal característica tem uma sensibilidade que permite medidas da ordem de  $10^{-13}$  metros (DAKIN & CULSHAW, 1988; KHONH, 2000).

Uma aplicação muito pesquisada para os interferômetros Mach-Zehnder a FO são os hidrofones conforme descrito por Culshaw e Kersey em 2008 (CULSHAW & KERSEY, 2008). O braço de referência é protegido de campos acústicos e o braço sensor fica sujeito às variações de pressão acústica (CULSHAW & KERSEY, 2008). Uma configuração básica desse sensor a FO oferece muitos benefícios comparados aos dispositivos tradicionais que, em sua maioria, são baseados em cerâmicas piezoelétricas (PZT – *Piezoelectric Transducer*). Os sensores tradicionais baseados em cerâmicas PZTs têm características problemáticas quando analisados pelos aspectos de fluatibilidade, resposta de frequência, e interferência eletromagnética (CULSHAW & KERSEY, 2008).

Na Figura 2.2.4. é mostrado um esquemático do hidrofone baseado em um sensor interferométrico Mach-Zehnder.

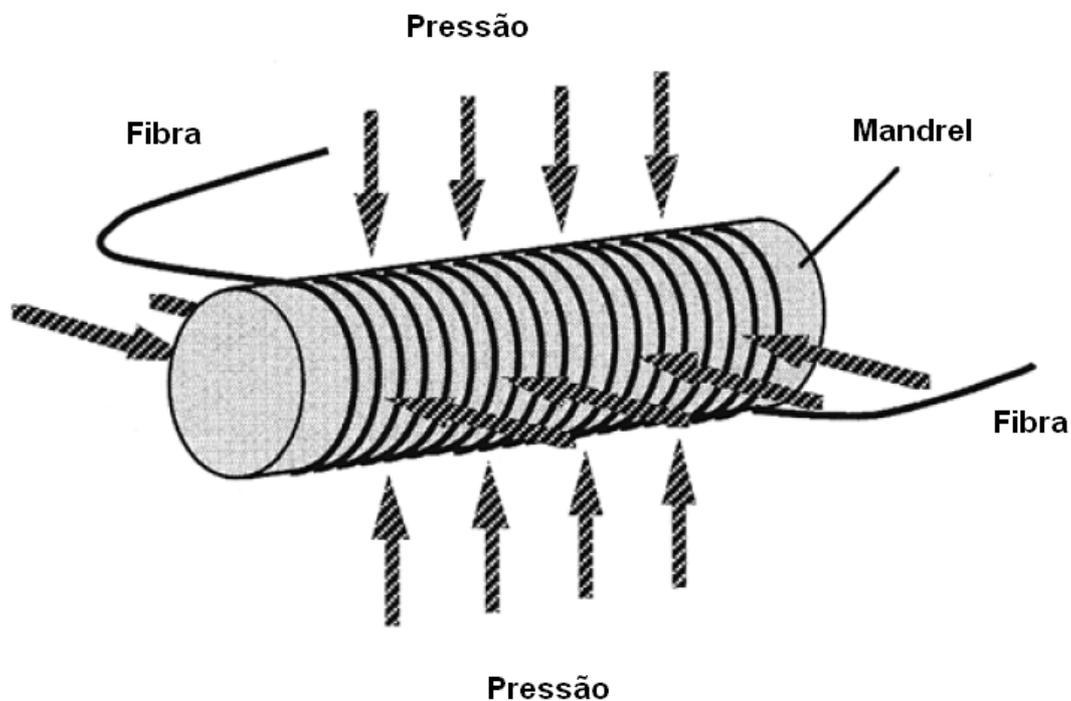


Figura 2.2.4. Diagrama de blocos de um Interferômetro de Mach-Zehnder (Adaptado de CULSHAW & KERSEY, 2008).

## b. Interferômetro de Michelson

Na Figura 2.2.5 é mostrado um diagrama de blocos com a configuração de um interferômetro de Michelson. Sua configuração é similar ao do interferômetro de Mach-Zehnder, a diferença é que no interferômetro de Michelson é usada uma reflexão proveniente do final da FO espelhada (YUAN & DONG, 2008), também chamado de modo refletivo (CULSHAW & KERSEY, 2008). Um feixe laser coerente é dividido e injetado na FO sensora por acoplador de 3 dB. A FO de referência e a sensora têm as suas extremidades espelhadas, refletindo de volta o feixe através das duas FOs. O feixe de luz volta novamente ao acoplador onde são recombinadas e direcionadas ao detector e a diferença de fase pode ser detectada.

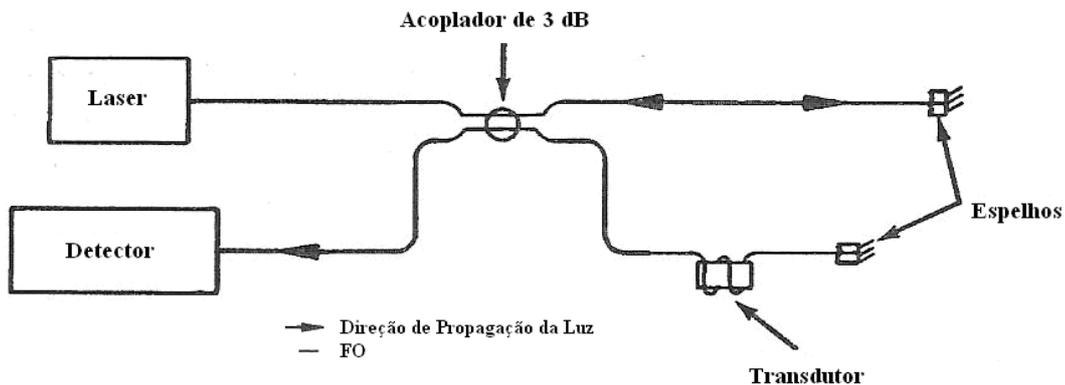


Figura 2.2.5. Diagrama de blocos de um Interferômetro de Michelson. (Adaptado de KROHN, 2000).

Para o interferômetro de Michelson, a diferença do caminho de um quarto de  $\lambda$  resulta em um deslocamento de meio  $\lambda$ , devido a uma segunda passagem na FO do feixe refletido. O dispositivo aqui apresentado, se comparado ao anterior, tem a vantagem de eliminar o uso de um acoplador de 3 dB. No entanto, a sua principal desvantagem é o acoplamento da luz refletida tanto no detector como no laser (DAKIN & CULSHAW, 1988; KHONH, 2000).

Interferômetros de Michelson são amplamente utilizados na engenharia civil como extensômetro, usados para monitorar movimento relativo entre dois pontos de uma estrutura, e em medicina usados em tomografias, dando uma grande contribuição em imagens médicas (CULSHAW & KERSEY, 2008).

Um exemplo é o equipamento comercial *Multi-line Wavemeter Optical Channel Analyser* que é um analisador de espectro óptico, análogo a um Analisador de Espectro Óptico (OSA – *Optical Spectrum Analyzer*). Este equipamento utiliza filtros baseados em interferômetros de Michelson. A variação do comprimento de onda analisado produz uma mudança de fase óptica que pode ser detectada através de uma técnica de varredura interferométrica pelo *Wavemeter*. A partir da técnica de varredura interferométrica é possível realizar medidas na faixa de 1270 nm a 1680 nm com resolução de 1,5 pm (BARREDA DE LA CRUZ, 2007).

### **c. Interferômetro de Fabry-Perot**

O interferômetro de Fabry-Perot envolve os conceitos apresentados anteriormente, contudo, não necessita do uso de uma FO de referência. A interferência é resultado de sucessivas reflexões do feixe acoplado inicialmente.

Na Figura 2.2.6. é mostrado um diagrama de blocos com a configuração de um interferômetro de Fabry-Perot. Um feixe laser de alta coerência é acoplado na FO, sendo parcialmente refletido de volta para o laser (tipicamente 95% é refletido e 5% transmitido). O feixe transmitido que entra na cavidade interferométrica é, novamente, parcialmente refletido (95%) e transmitido (5%). Desses, 5% da luz transmitida pelo primeiro espelho, sendo 95% refletida pelo segundo espelho (DAKIN & CULSHAW, 1988; KHONH, 2000).

Geralmente, sensores baseados em interferômetros Fabry-Perot tem uma sensibilidade duas vezes superior a outras técnicas de interferometria (DAKIN & CULSHAW, 1988; KHONH, 2000).

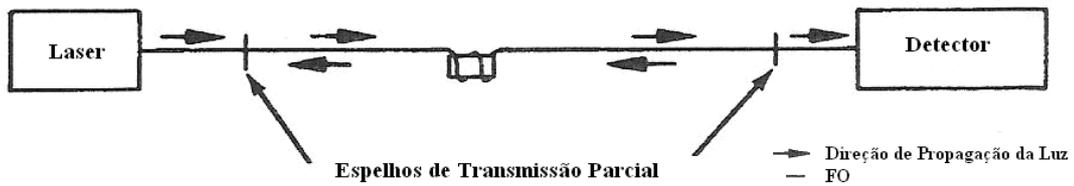


Figura 2.2.6. Diagrama de blocos de um Interferômetro de Fabry-Perot (Adaptado de KROHN, 2000).

#### d. Interferômetro de Sagnac

Na Figura 2.2.7. é mostrado um diagrama de blocos da configuração utilizada em um interferômetro de Sagnac. Este interferômetro requer um acoplador de 3 dB usado para inserir a luz em duas pontas de FO monomodo enrolado. A injeção da luz na FO é tal que se propaga no sentido horário e no sentido anti-horário. Neste caso ambas as FOs servem como sensores.

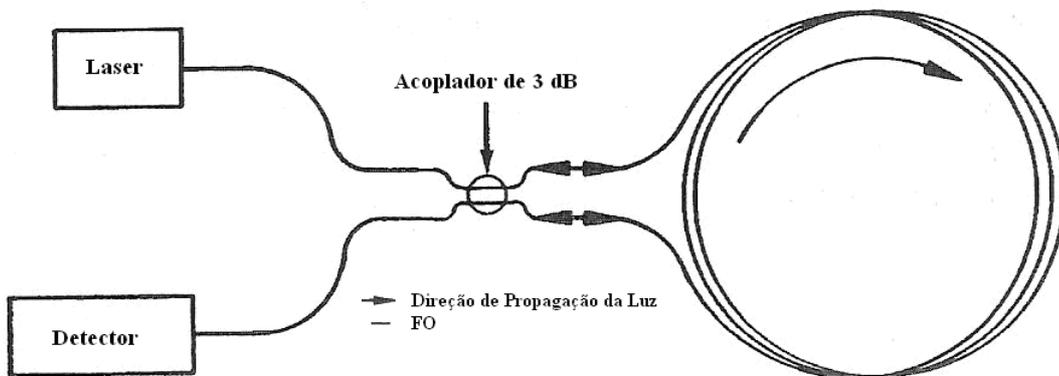


Figura 2.2.7 Diagrama de blocos de um Interferômetro de Sagnac (Adaptado de KROHN, 2000).

Não ocorrerá mudança de fase desde que a distância percorrida pela luz no sentido horário e no sentido anti-horário sejam iguais. No entanto, se o rolo de FO sofre alguma rotação para algum dos dois sentidos, o tempo de propagação da luz que viaja no sentido contrário da rotação é diminuído, assim a luz dessa FO chega primeiro ocasionando uma mudança de fase na recombinação desses feixes, possibilitando

medidas de rotação com alta sensibilidade (KHONH, 2000; CULSWAL & KERSEY, 2008). Neste caso, a FO não necessita de um determinado comprimento e nem uma mudança do índice de refração para poder mensurar a rotação (DAKIN & CULSHAW, 1988; KHONH, 2000; JANG *et al*, 2004).

Uma aplicação importante para os interferômetros de Sagnac é o seu uso como giroscópios a FO (FOG – *Fiber Optic Gyroscope*), usados na em sistemas de estabilidade ou navegação. Esses sistemas são utilizados, por exemplo, em antenas de satélites, mísseis guiados, navegação subaquática e sistemas de estabilidade e navegação aéreos e aeroespaciais. Sensores baseados em interferômetro de Sagnac para giroscópios são extremamente competitivos dentre os giroscópios de alto desempenho e resolução (CULSHAW & KERSEY, 2008).

### **2.2.3. Sensores Modulados por Comprimento de Onda**

Sensores modulados por comprimento de onda utilizam o deslocamento espectral para detectar a variação de alguma grandeza de interesse no ambiente, onde ambas estão diretamente relacionadas (ALLIL *et al*, 2004). Atualmente, Redes de Bragg em Fibra (FBG – *Fiber Bragg Grating*) são os sensores baseados neste tipo de modulação mais utilizados (KRONH, 2000).

No item 2.6 é explicitado o funcionamento desse tipo de sensores, como teoria, história e no capítulo 3 é descrito alguns exemplos e resultados.

### **2.3. Classificações dos Sensores a Fibra Óptica.**

Sensores a Fibra Óptica também são classificados quanto ao local onde é realizado o sensoriamento, podendo ser intrínsecos ou extrínsecos.

### **2.3.1. Extrínsecos**

Neste tipo de sensor o sinal óptico é alterado fora da FO ou em algum elemento acoplado externamente à fibra. Neste caso a fibra somente transporta a luz para o local de sensoriamento, onde o sinal óptico é desacoplado para o sensor no qual a luz é modulada. Em seguida, esta é reacoplada na FO e transportada para o processamento. O elemento sensor também pode transmitir potência óptica, que quando transformada em eletricidade alimentaria um sensor elétrico, deste modo, eliminando a necessidade de cabos elétricos (CULSHAW & KERSEY, 2008).

O desacoplamento da luz para o sensor pode ser um fator desvantajoso nos sensores extrínsecos. Isto ocasiona em um aumento das probabilidades de perda de luz da fibra, devido à necessidade de um alto grau de alinhamento entre as FOs para reacoplamento da luz (KERSEY, 1996).

Podem ser citados como exemplos de sensores extrínsecos os sensores de distância e de gás.

### **2.3.2. Intrínsecos**

Nos sensores intrínsecos a luz é transportada sem interrupção pela FO. Durante a transmissão da luz há uma modulação proveniente de um agente externo, alterando o sinal propagante (CULSHAW & KERSEY, 2008).

Em sensores com este tipo de configuração há benefícios óbvios, como a eliminação de uma interface adicional, utilizada para medir a grandeza variante, entre a FO e um transdutor. Pois a FO funciona como sensor, diminuindo as perdas devido ao desacoplamento e acoplamento da luz na FO, fator que diminui as dependências de alinhamento. Essas interações da luz com o mensurando podem incluir: atraso óptico, perda óptica e propriedades espectrais (CULSHAW & KERSEY, 2008).

Podem ser citados como exemplos, o interferômetro de Mach-Zehnder, utilizado como hidrofone, e o interferômetro de Sagnac, utilizado como FOG. Esses exemplos utilizam a alteração da luz na FO para realizar o sensoriamento, assim como a característica descrita para este tipo de sensor. Sensores baseados em FBGs e baseados em microcurvatura também podem ser citados como exemplos deste tipo de sensores.

## 2.4. Configurações de Sensores a Fibra Óptica.

Além das classificações existentes dos sensores também é possível separá-los levando em consideração a sua configuração de sensoriamento que podem ser: pontual, multiponto ou distribuído, cada um deles é mostrado a seguir.

Na Figura 2.4.1 é mostrado um esquemático de sensoriamento Pontual o sensor onde a fibra tem apenas um elemento sensor e a medida é realizada em apenas um ponto conhecido.

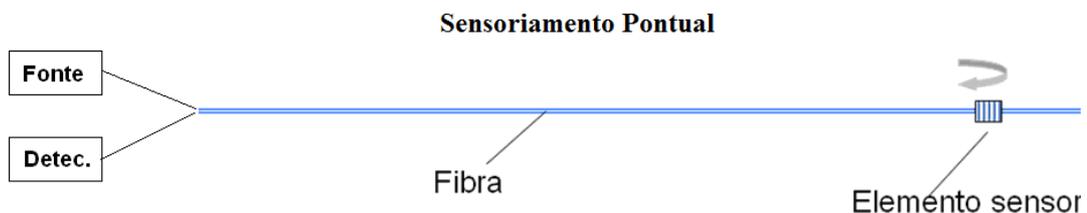


Figura 2.4.1. Configuração dos Sensores a FO.

Como sensor pontual pode ser citado o hidrofone que utiliza um mandrel localizado em um ponto conhecido da FO.

Na Figura 2.4.2 é mostrado um esquemático de sensoriamento multiponto onde os sensores são multiplexados, coloca-se mais de um sensor na mesma fibra e a medição é realizada em vários pontos ao longo da fibra.

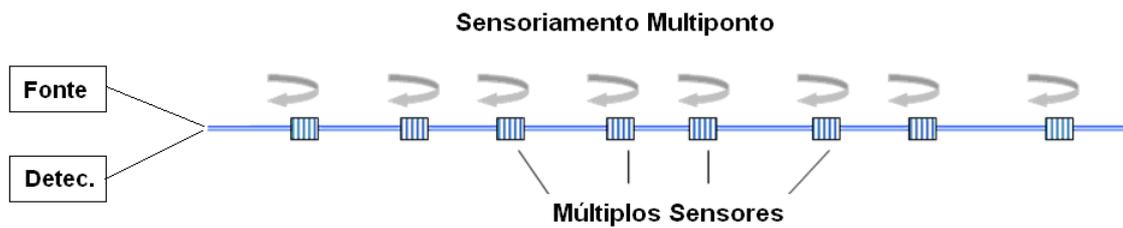


Figura 2.4.2. Configuração dos Sensores a FO.

O sensoriamento multiponto difere do sensoriamento pontual basicamente em relação ao número de sensores. A maioria dos sensores pontuais podem funcionar como sensores multiponto em uma mesma FO. Uma técnica muito utilizada neste tipo de sensoriamento é a multiplexação temporal (TDM – *Time-Division Multiplexing*) que permite que os sensores contidos na mesma FO sejam demodulados no domínio do tempo.

Na Figura 2.4.3 é mostrado um esquemático de sensoriamento distribuído onde há infinitos elementos sensores, ou seja, um sensoriamento contínuo que mensura um parâmetro em toda a sua extensão e realizando as medidas necessárias ao longo da FO (KERSEY, 1996).

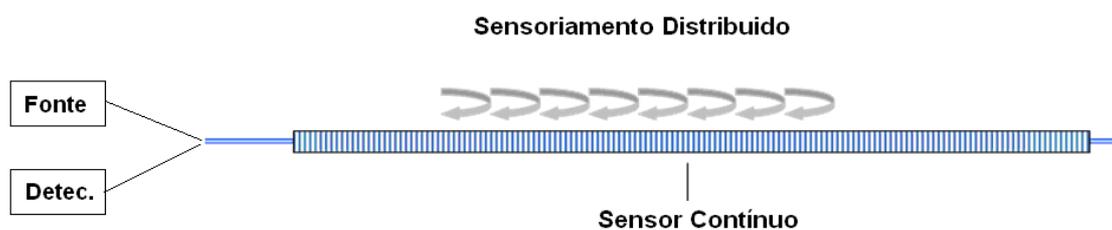


Figura 2.4.3. Configuração dos Sensores a FO.

Como exemplo pode ser citado o OTDR (OTDR – *Optical Time Domain Reflectometer*). É um equipamento ópto-eletrônico, disponível comercialmente, que realiza medidas em enlace de FO que pode variar de menos de 50 metros e chegar a 350 Km (LEE *et al*, 2005). Pode detectar rupturas, medir curvaturas acentuadas e perdas na FO, informando o posicionamento dessa falha com precisão de 1 metro. É um

equipamento muito utilizado para manutenção e instalação de linhas de Telecomunicações a FO (HARTOG, 1983; LEE *et al*, 2005). Este equipamento utiliza a própria FO como elemento sensor, e como a fibra é um elemento contínuo, o sensor é também contínuo. A resolução de leitura é imposta pelo próprio aparelho.

## **2.5. Redes de Bragg em Fibra**

Redes de Bragg em Fibra (FBG) são elementos intrínsecos na FO e podem ser usados para refletir, filtrar ou dispersar a luz da FO. A simplicidade da sua produção e utilização o fazem ideal para um grande número de aplicações em telecomunicações, lasers e sensores (OTHONOS, 1999; NUNES *et al*, 2004).

### **2.5.1. História**

Desde o desenvolvimento de guias de onda com baixas perdas ópticas na década de 60, as FOs têm sido desenvolvidas de um modo, no qual atualmente, são sinônimos de modernidade em telecomunicações e sensoriamento.

Uma das desvantagens da FO ocorre no acoplamento ou desacoplamento da luz, o que aumenta significativamente o número de componentes ópticos necessários. Normalmente, tais componentes ópticos requisitados têm rigorosos padrões de tolerância em alinhamento óptico. Por conseguinte, sistemas simples conceitualmente, tornam-se sistemas complicados e caros na prática. A mudança de sistema de óptica aberta por óptica fechada, baseada em FOs, aumenta a estabilidade e simplicidade do sistema. Além disso, é possível obter sistemas ópticos de tamanhos reduzidos permitindo a portabilidade.

A primeira rede de Bragg em fibra capaz de operar, em qualquer comprimento de onda desejado, foi produzida com técnicas emprestadas da óptica integrada. A casca foi polida em direção ao núcleo da FO e próximo o suficiente para alcançar o campo evanescente desta. O polimento foi realizado em forma de dentes periódicos, a fim de obter um padrão de interferência da rede gravada com a luz propagante na FO, conforme é mostrado na Figura 2.5.1 (CULSHAW & DAKIN, 1996).



**Figura 2.5.1. FBG fabricada por modulações periódicas na superfície (Adaptado de CULSHAW & DAKIN, 1996).**

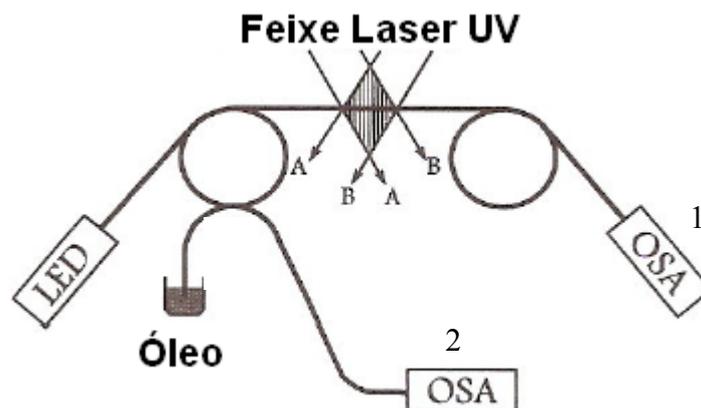
A fotosensibilidade em fibras foi descoberta em 1978 por Hill (HILL & MELTZ, 1997) e colaboradores no Centro de Pesquisa em Telecomunicações em Ottawa, no desenvolvimento de experimentos com espalhamento Brillouin. Neste trabalho, a luz de um laser de argônio de frequência simples 514,5 nm foi inserida no núcleo da fibra de sílica dopada com germânio. Após alguns minutos, uma substancial fração da potência óptica injetada foi refletida. A luz refletida foi resultado de um inesperado surgimento de persistentes variações no índice de refração com períodos bem definidos no núcleo da fibra (CULSHAW & DAKIN, 1996). Hill e colaboradores também foram os primeiros a demonstrarem grades permanentes em FO (HILL & MELTZ, 1997).

A fotosensibilidade é um fenômeno que causa mudanças permanentes no índice de refração do núcleo da FO. Essas alterações são provocadas quando a FO é exposta a luz com características e intensidades específicas para o material do qual é feito o núcleo. No princípio, a fotosensibilidade era associada a fibras dopadas com alta

concentração de Ge (Germânio). Nestas fibras são usados lasers ultravioleta com comprimento de onda entre 240 e 250 nm, a fim de provocar modificações permanentes no núcleo da FO (OTHONOS. 1999).

Contudo, em 1989 Meltz observou que FBGs permanentes poderiam ser gravadas, em FOs fotossensíveis, por interferência entre os feixes de dois lasers ultravioleta, utilizando uma máscara de fase. Usando esta técnica, podem ser produzidas redes capazes de operar em qualquer comprimento de onda (MELTZ *et al*, 1989; HILL & MELTZ, 1997).

A montagem utilizada para gravar as FBGs em FOs fotossensíveis utilizando interferência entre lasers ultravioleta é mostrada na Figura 2.5.2. Nesta figura, foi utilizado como fonte óptica um Diodo Emissor de Luz (LED – *Light Emitted Diode*) de banda larga; dois lasers interferindo entre si, onde o feixe “A” refere-se ao laser “A” e o feixe “B” ao laser “B”; para analisar o espectro da rede gravada, foi usado um Analisador de Espectro Óptico (OSA-1 – *Optical Spectrum Analyzer*). O óleo serve para diminuir a reflexão de Fresnel que ocorre no fim da fibra. Um segundo OSA (OSA-2) é utilizado para monitorar o espectro fornecido pelo LED.



**Figura 2.5.2. Montagem para monitoramento da interferência das FBGs produzidas (Adaptado de CULSHAW, 1996).**

As FBGs para serem gravadas em FOs fotossensíveis necessitavam de lasers de altas potências e um longo tempo de exposição. Contudo Lemaire *et al* (1993) descreveram uma técnica na qual era possível aumentar a fotossensibilidade através de

uma técnica de hidrogenação. A FO foi mantida em uma atmosfera de hidrogênio por doze dias, com pressões e temperatura que variaram de 20 a 750 atm e 20 e 75 °C, respectivamente. Tal situação forçou a difusão de moléculas de hidrogênio para o núcleo da fibra. O hidrogênio difundido na FO evita uma relaxação estrutural subsequente dos defeitos induzidos pela exposição ao UV, o que aumenta a irreversibilidade espontânea das mudanças estruturais e conseqüentemente a troca induzida no índice de refração. No entanto, as fibras óticas sensibilizadas através de tratamento com hidrogênio à frio e a alta pressão permanecem fotossensíveis somente enquanto o hidrogênio estiver vinculado à fibra e, assim, devem ser guardadas a baixas temperaturas ou a altas pressões numa atmosfera hidrogenada, para impedir a difusão do hidrogênio para fora da fibra (CANNING *et al*, 2001; KLEMBA, 2005).

O desenvolvimento do aumento da fotosensibilidade, através da hidrogenação, proporcionou a utilização de laser com menor potência, menor tempo de exposição e uma melhor eficiência na produção (KLEMBA, 2005).

### **2.5.2. Teoria das FBGs**

As Redes de Bragg em Fibra são dispositivos simples e passivos quando comparados com outros componentes ópticos. Em sua forma mais básica consiste em variações periódicas do índice de refração do núcleo da fibra perpendiculares ao eixo de propagação da luz. Tais modulações também são chamadas de grades de Bragg que, no caso da FBG, tem períodos menores do que  $1\mu\text{m}$  entre elas (REGO *et al*, 2001).

A luz sofre uma reflexão conhecida quando muda de um meio de um índice de refração para outro, essa reflexão é conhecida como lei de Fresnel (HALLYDAY *et al*, 2004). Esse fenômeno ocorre normalmente no final da fibra onde a luz muda de um meio (a FO) para o ar e a luz incidente refletida corresponde a 4 %, ou seja, ocorre quando a luz sofre refração. Contudo, essa reflexão está sujeita a alguns outros parâmetros. Quando a luz introduzida em uma fibra passar através de um FBG, alguns dos comprimentos de onda dessa luz serão refletidos pela variação periódica do índice de refração, devido a interação com diferentes índices de refração em seu núcleo.

Geralmente, a luz refletida estará fora de fase e tenderá a se cancelar, exceto quando o comprimento de onda satisfaça a condição de reflexão de Bragg. Neste caso, a luz refletida sofrerá uma interferência construtiva e formará um pico de reflexão definido pelos parâmetros das redes periódicas. A luz refletida se propagará na mesma direção e sentido oposto do feixe propagante original, podendo ser considerada como um acoplamento em modo contrapropagante (DA SILVA, 2003 e OTHONOS, 1999).

A condição de Bragg é um requisito que satisfaz a conservação de energia e momento. A energia da luz propagante na FO é dada por (OTHONOS, 1999; HALLIDAY *et al*, 2004):

$$E = \hbar f \quad [2.1]$$

onde  $E$  é a energia da onda eletromagnética,  $\hbar$  é uma constante chamada de número de Planck,  $\hbar = \left(\frac{h}{2\pi}\right)$ , e  $f$  é a frequência da onda eletromagnética.

A conservação de energia é dada pela conservação da frequência. Quando não houver mudança na frequência da onda eletromagnética incidente, a energia é conservada, de modo que (OTHONOS, 1999):

$$\hbar f_i = \hbar f_f \quad [2.2]$$

$f_i$  é a frequência inicial e  $f_f$  é a frequência final. Para a conservação de energia é necessário apenas que a frequência final seja igual a inicial, correspondendo às frequências das radiações incidente e refletida, respectivamente.

A conservação do momento requer que o vetor de onda incidente,  $k_i$ , somado com o vetor de onda da grade,  $K$ , seja igual ao vetor de onda da radiação espalhada  $k_f$ . Isto é representado como (OTHONOS, 1999):

$$k_i + K = k_f \quad [2.3]$$

onde o vetor de onda da grade,  $K$ , tem a direção normal das grades planas com uma magnitude de  $\frac{2\pi}{\Lambda}$  ( $\Lambda$  é o espaçamento entre as grades). O vetor de onda difratado é igual em magnitude, mas tem a direção oposta, do vetor de onda incidente. Assim, a condição de conservação do momento se torna igual a (OTHONOS, 1999):

$$2\left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B}\right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad [2.4]$$

Simplificando a equação 2.4 pode se chegar à equação 2.5, que é a condição de Bragg.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad [2.5]$$

onde,  $\lambda_B$  é o comprimento de onda de Bragg ou característico da rede,  $n_{eff}$  o índice de refração efetivo do núcleo da Fibra e  $\Lambda$  o período entre as modulações causadas no núcleo da Fibra (OTHONOS, 1999; ZHAO & LIAO, 2004).

Um esquema da interação de uma rede de Bragg em fibra (FBG) com a luz propagante é mostrado na Figura 2.5.3. No núcleo da fibra há variações periódicas do índice de refração, formando grades planas perpendiculares ao eixo longitudinal da mesma (OTHONOS, 2004). Essas modulações interagem com a luz de maneira que um espectro óptico de banda larga é inserido na FO, uma parte característica é refletida e

uma parte é transmitida, os dois últimos pela FBG inscrita, como pode ser observado na figura. Além de a FBG atuar como um refletor de luz, simultaneamente também filtra o espectro em um determinado comprimento de onda (ZHAO & LIAO, 2004; KLEMBA, 2005).

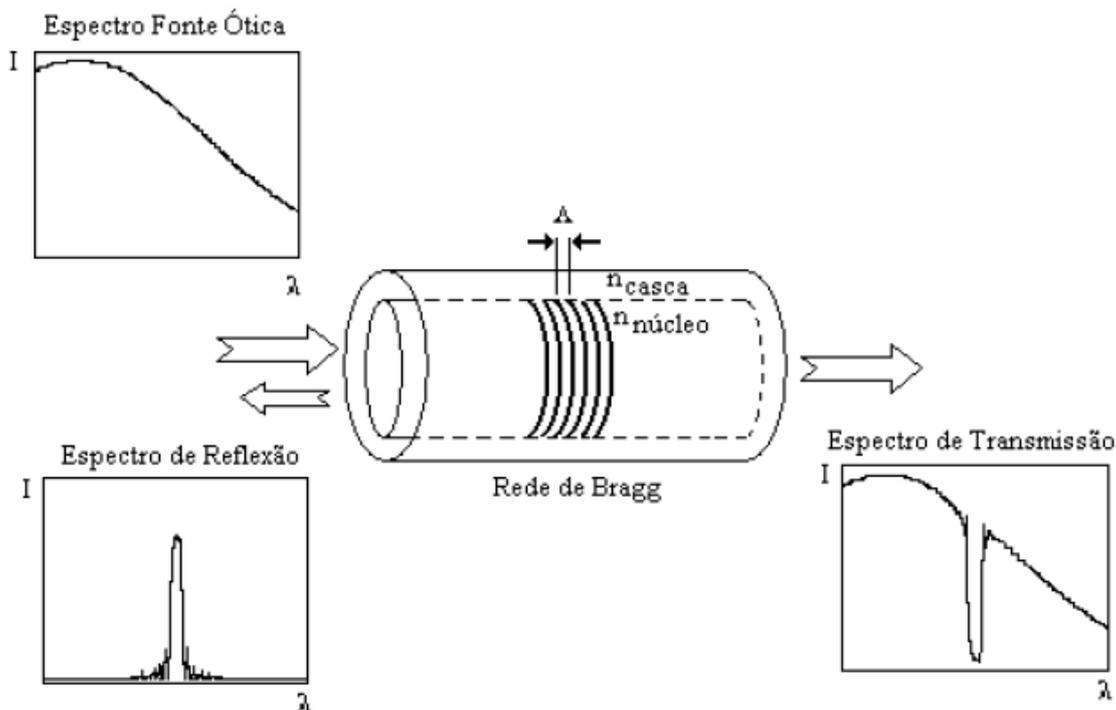


Figura 2.5.3. Esquemático do Funcionamento de uma FBG (Adaptado de KLEMBA, 2005).

### 2.5.3. Sensibilidade de uma FBG

O comprimento de onda central refletido pela FBG depende diretamente do índice de refração efetivo do núcleo e da periodicidade das modulações. Este índice e o espaçamento entre as modulações podem ser afetadas por mudanças externas. O comprimento de onda de Bragg sofre um deslocamento devido à mudança de tensão mecânica ou temperatura a qual a rede é submetida.

O deslocamento do comprimento de onda de Bragg para uma mudança de tensão  $\Delta l$  pode ser escrito como (OTHONOS, 1999; LI & PENG, 2008):

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon_z \quad [2.6]$$

onde  $p_e$  é a constante efetiva do tensor-óptico dado pela equação 2.7:

$$p_e = n_{eff}^2 [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad [2.7]$$

onde  $p_{11}$  e  $p_{12}$  são componentes do tensor-óptico, e  $\nu$  é a razão de Poisson. Para uma fibra típica de sílica dopada com Ge temos:  $p_{11} = 0,113$ ,  $p_{12} = 0,252$ ,  $\nu = 0,16$  e  $n_{neff} = 1,482$ .

Já o deslocamento do comprimento de onda de Bragg para uma mudança de temperatura  $\Delta T$  pode ser escrito pela equação abaixo (OTHONOS, 1999; LI & PENG, 2008):

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T \quad [2.8]$$

onde  $\alpha_\Lambda$  é o coeficiente de expansão térmica para a fibra, sendo aproximadamente  $0,55 \times 10^{-6}$  para a sílica, e é apresentado pela equação abaixo:

$$\alpha_\Lambda = \left( \frac{1}{\Lambda} \right) \left( \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \quad [2.9]$$

onde  $\alpha_n$  é o coeficiente termo-óptico, sendo aproximadamente igual a  $8,6 \times 10^{-6}$  para a fibra de sílica dopada com Ge, e dado por:

$$\alpha_n = \left( \frac{1}{n_{eff}} \right) \left( \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \quad [2.10]$$

Especificamente, a resposta térmica é resultado da expansão térmica do material e da dependência térmica do índice de refração (OTHONOS, 1999).

No entanto, variações de temperatura e tensão mecânica podem ser aplicadas simultaneamente nas FBGs. As equações 2.6 e 2.8 são casos particulares, onde a rede sofre influência da variação de uma das duas grandezas, enquanto a outra permanece constante. A partir da junção destas duas equações é possível chegar à seguinte relação:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad [2.11]$$

O primeiro termo da equação 2.11 é referente a uma variação da tensão mecânica, enquanto que o segundo termo é referente a uma variação térmica na FBG. Tanto uma variação da tensão aplicada na FO como uma variação térmica podem provocar um deslocamento do comprimento de onda de Bragg, ocasionado pela variação no espaçamento das grades ou no índice de refração. Como o foco do trabalho é a medida de temperatura, pode-se considerar a tensão como constante, logo  $\Delta l$  é igual a zero, restando somente o termo dependente da variação de temperatura, dado pela equação 2.8.

#### **2.5.4. Técnicas de Gravação de uma FBG**

As gravações de FBGs podem ser classificadas como internas ou externas. Esta classificação é dependente da técnica de gravação empregada. Fabricação de redes pelo método de gravação interna não é muito utilizada, enquanto que a técnica de inscrição externa é a mais utilizada e é realizada por interferometria, ponto a ponto ou máscara de fase. No começo, esses processos eram considerados críticos devido à necessidade de resolução micrométrica e estabilidade. Atualmente, essas técnicas são bem controladas (OTHONOS, 1999; CAZO, 2001; KLEMBA, 2005).

##### **2.5.4a. Gravação Interna de uma FBG**

Como dito anteriormente, a primeira técnica utilizada para realizar gravação de FBGs foi desenvolvida por Hill e colaboradores em 1978 (HILL, 1997). As redes gravadas através desta técnica têm a limitação de só operarem no comprimento de onda de excitação do laser de gravação. O laser inserido na FO sofre uma interferência com a reflexão no final da fibra formando um padrão de interferência. A alta intensidade nos pontos de interferência construtiva altera o índice de refração do núcleo da fibra fotossensível permanente. Assim, a modulação do índice de refração tem o mesmo período espacial que o padrão de interferência. Devido à baixa variação do índice de refração provocada pela interferência, para o funcionamento dessas redes é necessário grades de longos comprimentos com dezenas de centímetros (HILL, 1997; OTHONOS, 1999; KLEMBA, 2005).

##### **2.5.4b. Gravação Externa de uma FBG pela Técnica Interferométrica**

A técnica interferométrica (MELTZ *et al*, 1989) foi a primeira técnica de gravação externa de redes de Bragg em fibras fotossensíveis. Nesta técnica, um feixe de

radiação UV passa por um divisor de feixes 50:50 e é dividido igualmente, e posteriormente são recombinados para formar um padrão de interferência. A rede é produzida posicionando a parte descascada de uma FO na região do padrão de interferência. O período,  $\Lambda$ , do padrão formado determina o comprimento de onda de reflexão,  $\lambda_B$ , da rede escrita (OTHONOS, 1999). Uma representação gráfica do sistema de gravação é mostrada na Figura 2.5.4.

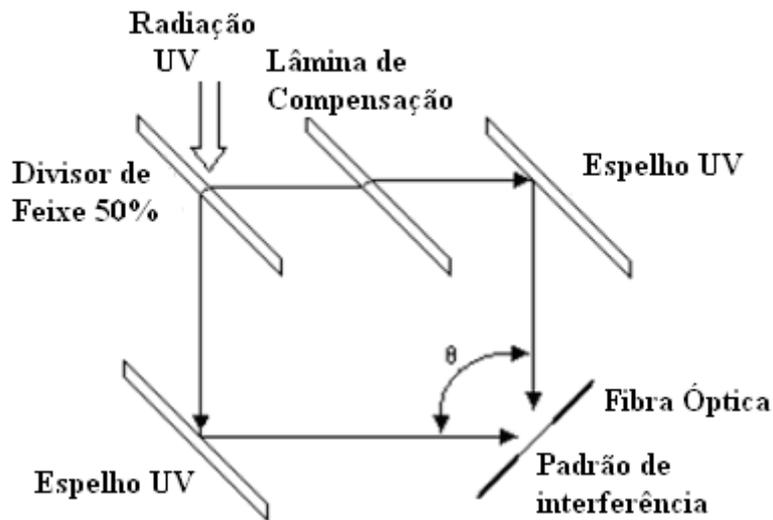


Figura 2.5.4. Esquemático da Gravação de uma FBG por Interferometria.

Nesta montagem, a luz lançada na fibra óptica terá um comprimento de onda refletido pela rede ( $\lambda_B$ ) determinado pelo ângulo de cruzamento ( $\theta$ ) entre os feixes e pelo comprimento de onda do feixe de escrita.

Esta técnica, que posteriormente ficou conhecida como técnica holográfica se mostrou mais eficiente do que o processo de gravação interna devido a diferentes aspectos. O primeiro foi o de possibilitar gravar redes de Bragg em praticamente qualquer comprimento de onda do visível ao infravermelho próximo. O segundo aspecto foi de reduzir a potência óptica necessária para modular o índice de refração da fibra.

Uma desvantagem na utilização desta técnica é a suscetibilidade da montagem às vibrações mecânicas e às correntes de ar, podendo causar uma não periodicidade da rede de Bragg e um conseqüente alargamento da banda refletida (OTHONOS, 1999).

#### 2.5.4c. Gravação Externa de uma FBG Pela Técnica de Máscara de Fase

Uma das técnicas mais eficientes para inscrição de FBGs em fibras fotossensíveis é a técnica de máscara de fase. Este método emprega um elemento de difração óptica (a máscara de fase) para modular espacialmente o feixe ultravioleta de escrita.

A máscara de fase é produzida em uma superfície unidimensional com fendas de espaçamento periódico, definido como  $\Lambda_{pm}$ . A rede gravada na fibra, devido a interferência do feixe UV com a máscara de fase, tem um espaçamento  $\Lambda$  que é expresso matematicamente pela relação:

$$\Lambda = \Lambda_{pm}/2 \quad [2.12]$$

Ésta é uma técnica de gravação externa de FBG no núcleo de uma fibra ótica fotossensível. Nesta técnica, como indicado na Figura 2.5.5, o feixe de luz UV, sob incidência normal a máscara de fase é difratado e separado nas ordens  $m = 0$  e  $m = \pm 1$ . A superposição espacial dos feixes de ordem  $m = \pm 1$  resulta num padrão de interferência. A fibra é posicionada na região deste padrão. Uma lente cilíndrica é posicionada antes da máscara de fase, para colimar o feixe ultravioleta na mesma, produzindo uma modulação do índice de refração da fibra com metade do período da máscara (OTHONOS, 1999; KLEMBA, 2005).

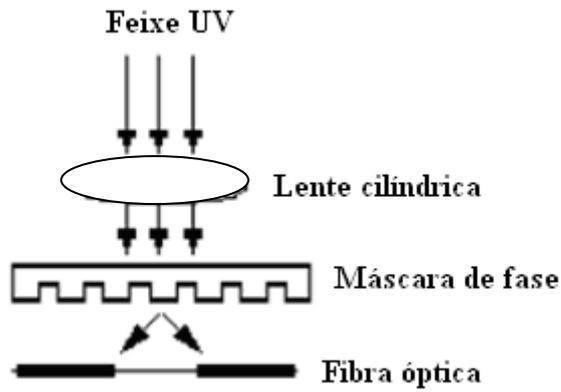


Figura 2.5.5. Esquemático da Gravação de uma FBG por máscara de fase.

Uma desvantagem desta técnica está no fato de ser um comprimento de onda de reflexão fixo para cada máscara de fase.

#### 2.5.4d. Gravação Externa de uma FBG Pela Técnica de Máscara de Fase e Interferometria

Esta técnica consiste na combinação entre as técnicas de interferometria e de máscara de fase. Possui a vantagem de permitir a alteração das características das redes a serem gravadas. Um esquemático dessa técnica é mostrado na Figura 2.5.6.

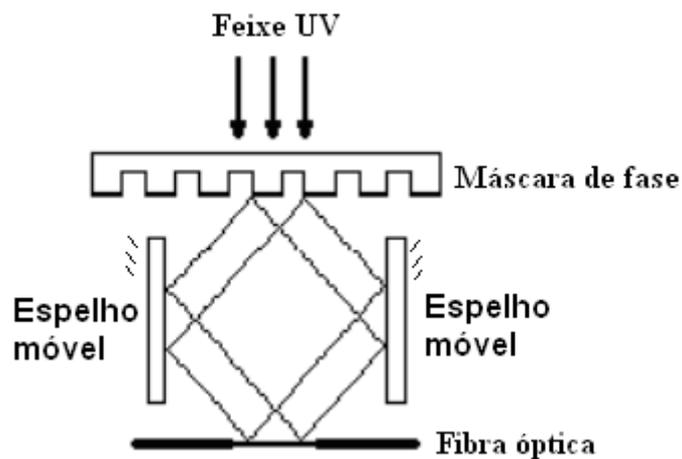


Figura 2.5.6. Esquemático da Gravação de uma FBG por máscara de fase. (Adaptado de OTHONOS,1999).

Nesta montagem o feixe UV é difratado pela máscara de fase e as ordens  $m = \pm 1$  são recombinadas por reflexão em dois espelhos móveis, formando um padrão de interferência luminosa no núcleo da fibra. O período espacial do padrão formado determina o comprimento de onda de reflexão,  $\lambda_B$ , da rede gravada. Quando os espelhos são girados ocorre uma variação dos máximos e mínimos da interferência e conseqüentemente uma alteração no comprimento de onda de Bragg da rede escrita. Nesta montagem, uma lente cilíndrica pode ser utilizada para colimar os feixes UV e, portanto, o padrão de interferência sobre a fibra.

### 2.5.5. Redes de Período Longo em Fibra Óptica

As redes de período longo (LPG – *long period grating*) são dispositivos intrínsecos à fibra óptica que têm sua operação fundamentada no acoplamento entre o modo propagante de núcleo e modos co-propagantes de casca. Entretanto, grades com períodos entre 200 e 700  $\mu\text{m}$  são chamados de redes de período longo, em oposição às redes de Bragg, que têm grades com períodos menores do que 1  $\mu\text{m}$  (REGO *et al*, 2001)

Os comprimentos de onda de ressonância das LPG são dados pela condição de casamento de fase (VENGSARKAR *et al*, 1997; OTHONOS, 1999):

$$\beta_1 - \beta_2 = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad [2.12]$$

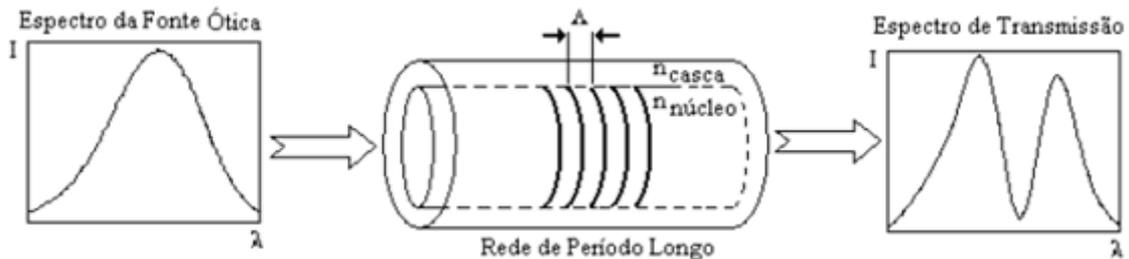
onde  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são as constantes de propagação dos modos que estão sendo acoplados,  $\Delta\beta$  é a diferença entre as constantes de propagação e  $\Lambda$  é o período da rede.

Outra forma de escrever a condição de casamento de fase de uma rede em fibra, de modo a relacionar índices efetivos do núcleo e da casca ao invés das constantes de

propagação, é obtida substituindo na Equação 2.12 os valores de  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , chegando-se à seguinte equação (REGO *et al*, 2001):

$$\lambda_n = (n_{\text{núcleo}} - n_{\text{casca}}^n) \Lambda \quad [2.13]$$

onde  $\lambda_n$  é o comprimento de onda central do  $n$ -ésimo modo de casca, para o qual a luz foi acoplada,  $n_{\text{núcleo}}$  é o índice de refração efetivo do núcleo,  $n_{\text{casca}}^n$  é o índice de refração efetivo do  $n$ -ésimo modo da casca e  $\Lambda$  é o período da rede. A potência óptica que se propaga nos modos de casca decai rapidamente devido às imperfeições causadas na fibra, ou curvaturas, deixando no espectro de transmissão vales de atenuação centrados nos comprimentos de onda dados pela Equação 2.13 (REGO *et al*, 2001), conforme ilustrado na Figura 2.5.7.



**Figura 2.5.7. Esquema do Funcionamento de uma LPG**

A relação entre o período da rede e os modos de acoplamento da luz pode ser analisada a partir da Equação 2.12. Nas redes de período longo o acoplamento ocorre entre o modo fundamental e modos de casca co-propagantes de forma que o valor de  $\Delta\beta$  é pequeno e os valores do período  $\Lambda$  são grandes, tipicamente da ordem de centenas de micrometros (REGO *et al*, 2001; KLEMBA, 2005).

### 2.5.6. Sensibilidade de uma LPG

A sensibilidade de um LPG é resultado de perturbações do meio externo, ou variações de temperatura e tensão mecânica longitudinal. Entretanto, pode ser compreendido considerando tais variações dependente dos índices de refração da casca, do núcleo e do meio externo. Desta maneira, uma variação do índice do meio externo influi diretamente na luz propagante na casca, alterando o termo  $n_{casca}^n$ , presente na equação 2.13. Tal alteração muda o  $\lambda_n$  (REGO *et al*, 2001; KLEMBA, 2005)

As LPGs quando comparadas às FBGs mostram uma maior sensibilidade às variações dos mensurados externos, a primeira apresenta variação térmica com valores entre 0,04 nm/°C e 0,05 nm/°C e para tensão entre 0,7 e 1,5 nm/mε, e as últimas apresentam uma sensibilidade térmica de, aproximadamente, 0,01 nm/°C (VENGSARKAR *et al*, 1997; KLEMBA, 2005).

Os comprimentos de onda de ressonância das LPG são criticamente dependentes da mudança nos índices de refração efetivos do núcleo e da casca. Desse modo, como pode ser observado na equação 2.13, qualquer variação nestas grandezas causada por parâmetros como temperatura, tensão longitudinal ou alterações no índice de refração externo, podem causar grandes deslocamentos do comprimento de onda. A origem da sensibilidade à temperatura é obtido a partir da diferenciação da equação 2.13 em relação à temperatura (KLEMBA, 2005):

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \Lambda \left[ \frac{d(n_{nucleo} - n_{casca})}{dT} \right] + (n_{nucleo} - n_{casca}) \left( \frac{d\Lambda}{dT} \right) \quad [2.14]$$

onde o termo  $\frac{d(n_{nucleo} - n_{casca})}{dT}$  representa a mudança nos índices de refração, do núcleo e da casca, devido ao efeito termo-ótico. Esta contribuição depende da composição da fibra e da ordem dos modos de casca. O termo  $\frac{d\Lambda}{dT}$  representa a alteração na periodicidade da rede devido ao coeficiente de expansão térmica da fibra, sendo que a magnitude e o sinal do

termo dependem da ordem dos modos de casca. O coeficiente de expansão térmica da sílica é muito pequeno com relação ao termo-ótico, e como resultado a sensibilidade da rede à temperatura é determinada principalmente pelas mudanças nos índices de refração do núcleo e da casca.

Da mesma forma que a temperatura, a sensibilidade à tensão mecânica longitudinal nas LPG pode ser avaliada pela diferenciação da Equação 2.13 em relação a deformação,  $\varepsilon$  (KLEMBA, 2005):

$$\frac{d\lambda_m}{d\varepsilon} = \Lambda \left[ \frac{d(n_{\text{núcleo}} - n_{\text{casca}})}{d\varepsilon} \right] + (n_{\text{núcleo}} - n_{\text{casca}}) \left( \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} \right) \quad [2.15]$$

onde o termo  $\frac{d(n_{\text{núcleo}} - n_{\text{casca}})}{d\varepsilon}$  representa a mudança nos índices de refração devido à extensão da FO, do núcleo e da casca, e devido ao efeito foto-elástico. O termo  $\frac{d\Lambda}{d\varepsilon}$  representa a alteração na periodicidade da rede devido à deformação na FO.

## 2.6. Convolução

Convolução é um operador matemático que a partir da interação entre duas funções produz uma terceira. Dadas duas funções  $f_1(t)$  e  $f_2(t)$ , a convolução entre elas é representada por:

$$f_1(t) * f_2(t) = f_3(t) \quad [2.16]$$

onde  $f_3(t)$  é o resultado da convolução entre  $f_1(t)$  e  $f_2(t)$  e dado por:

$$f_3(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau) f_2(t - \tau) d\tau \quad [2.17]$$

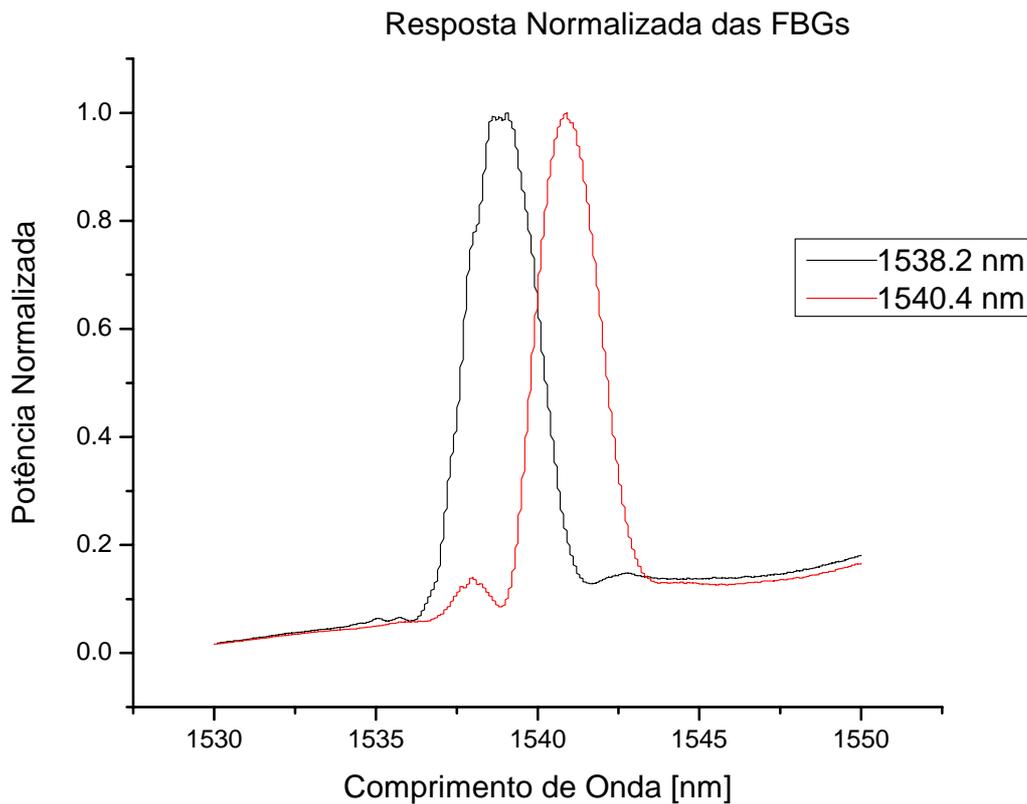
onde  $\tau$  é a variável independente na integral de convolução.

A interpretação gráfica da convolução permite visualizar os resultados de muitas relações abstratas. Se a função  $f_1(t)$  e  $f_2(t)$  são conhecidas apenas graficamente, é possível encontrar a convolução  $f_1(t) * f_2(t)$  graficamente pela definição dada na equação 2.17 (LYNN, 1980):

Como exemplo de convolução, é mostrada a simulação da convolução realizada entre as funções obtidas devido a resposta espectral das FBGs. Contudo, a equação 2.18 foi alterada para:

$$f_1(t) * f_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau) f_2(t + \tau) d\tau \quad [2.19]$$

As funções  $f_1(t)$  e  $f_2(t)$  são mostradas na Figura 2.6.1, onde as funções são respostas espectrais da reflexão de uma FBG. A curva em vermelho é a FBG 1540,4 nm correspondente a  $f_1(t)$ , e a curva em preto é a FBG 1538,2 nm correspondente de  $f_2(t)$ . A segunda curva sofrerá um deslocamento simulado. A resposta é dada em comprimento de onda (nm) pela potência óptica que neste gráfico foi normalizada.

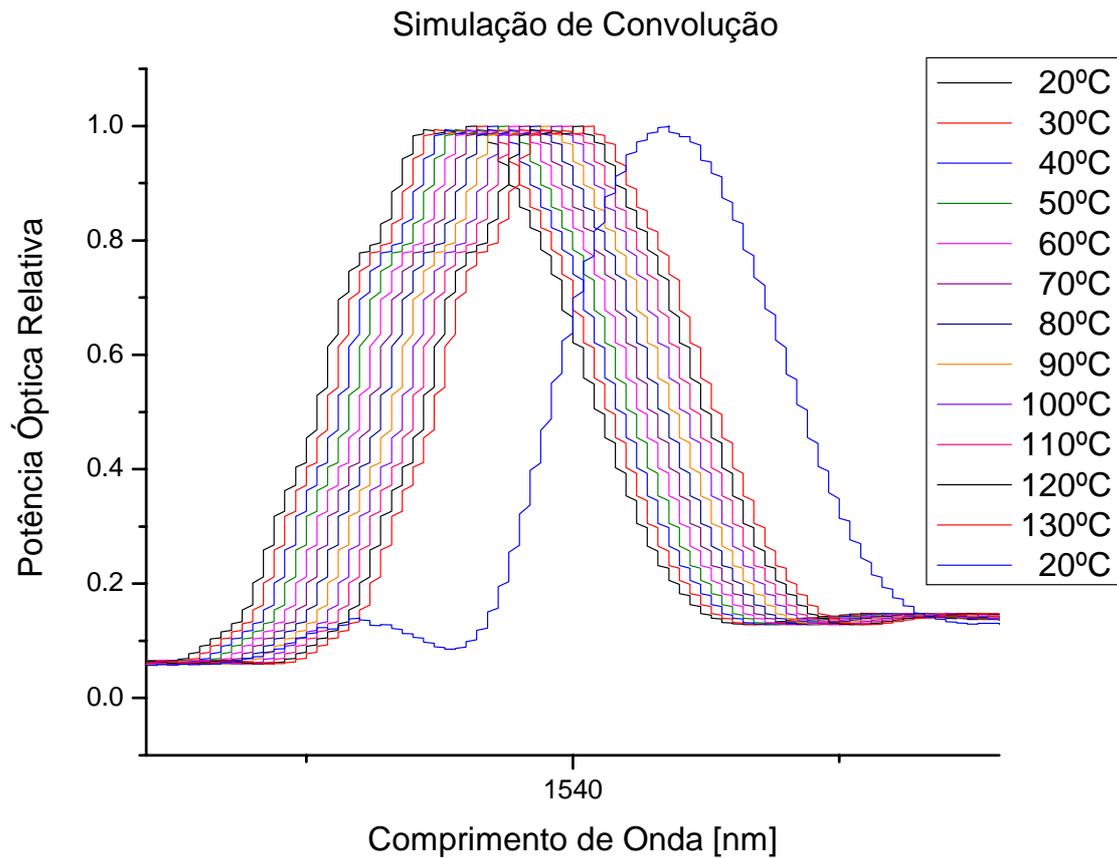


**Figura 2.6.1: Simulação do deslocamento da FBG sensora.**

O parâmetro variante é  $t$ , o qual varia uniformemente com intervalos de 0,1 nm, o que equivale a uma variação térmica de 10 °C, devido à sensibilidade da FBG, pois, segundo a caracterização térmica realizada com a FBG sensora, esta FBG desloca o seu espectro em 10pm/°C.

O termo  $f_2(t+\tau)$  representa a função  $f_2(\tau)$  deslocada em  $t$  nm na direção positiva no eixo das abscissas com a unidade de medida em nanômetros.

Na Figura 2.6.2 é mostrado o deslocamento de  $f_2(\tau)$ . Esse deslocamento resulta na convolução da curva  $f_2(\tau+t)$  com  $f_1(t)$ .  $t$  tem um incremento de 0,1 nm e começando com valor inicial igual a zero.



**Figura 2.6.2: Simulação do deslocamento da FBG sensora.**

As curvas mostradas na Figura 2.6.1 são experimentais, provenientes da caracterização das FBGs. Contudo não é conhecida a função da curva, devido a este fato, a análise da convolução dos dados é realizada graficamente.

Na Figura 2.6.3 é mostrado o resultado da multiplicação entre as curvas das FBGs. É possível observar que conforme a temperatura simulada aumenta a intensidade óptica relativa também aumenta.

### Convolução de Redes Gêmeas

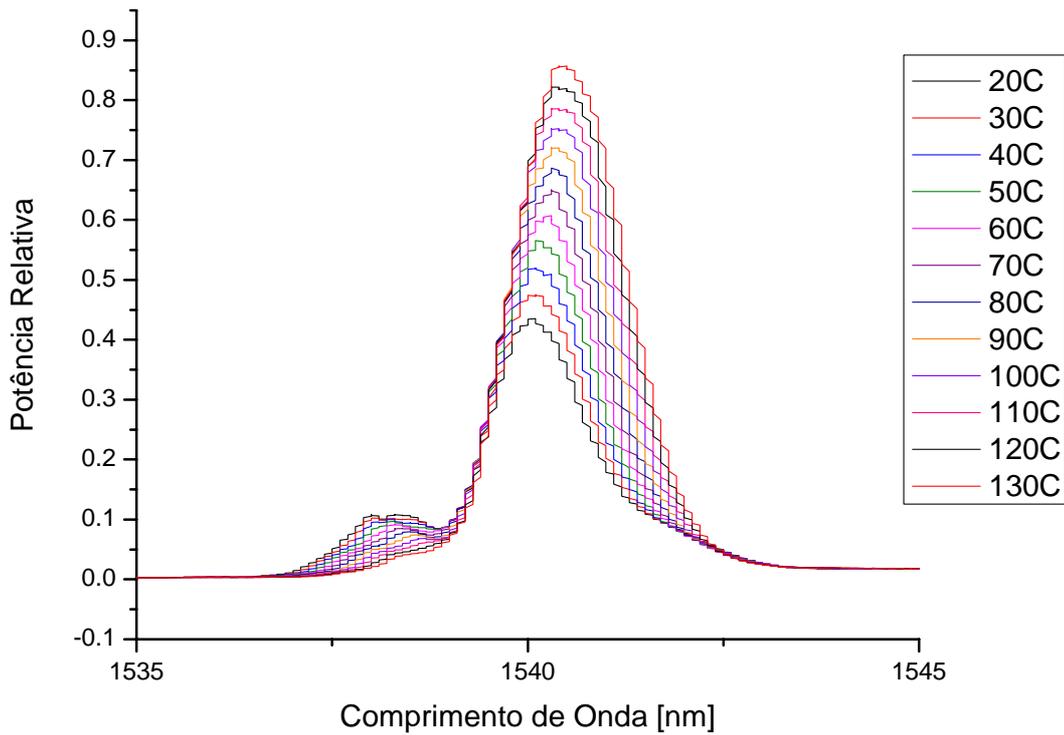
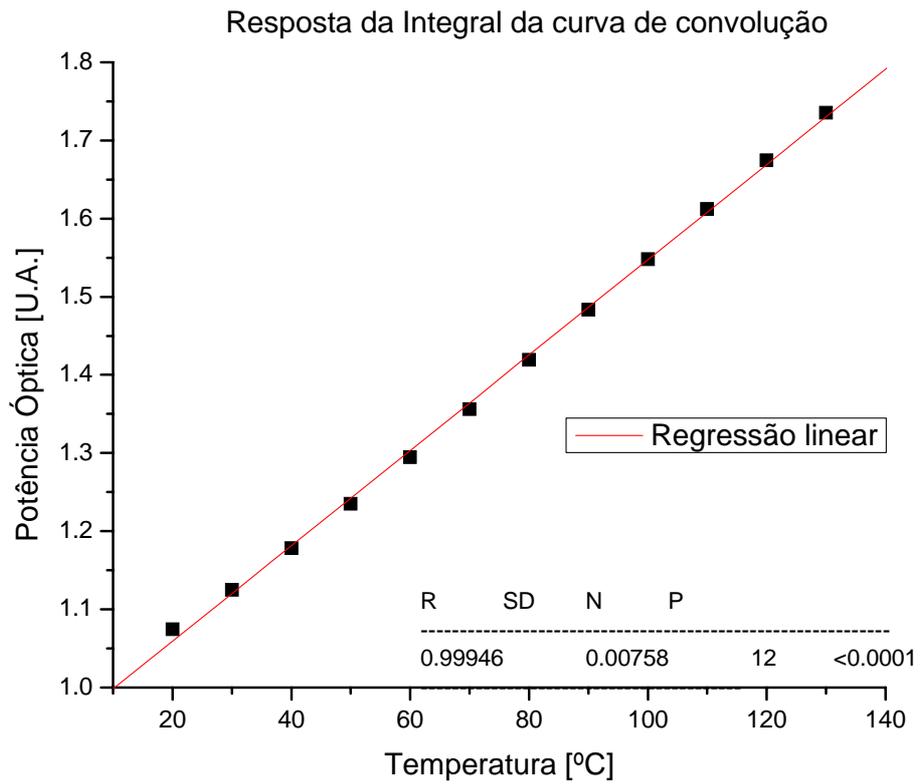


Figura 2.6.3: Resposta da Convolução simulada entre as duas FBGs.

A função  $f_2(\tau)$  foi deslocada de  $t$ , já discriminado, e foi encontrado o valor sob a curva deste produto. As áreas da Figura 2.6.3 representam o valor de  $f_1(\tau) * f_2(\tau)$  (LYNN, 1980 e OPPENHEIM *et al*, 1997).

O gráfico da convolução entre as duas redes de Bragg é mostrado na Figura 2.6.4 que é a área sob as curvas do gráfico mostrado na Figura 2.6.3 em função da temperatura.



**Figura 2.6.4: Resultado da convolução em função da Temperatura.**

## CAPITULO III

### 3. Estado da Arte

Levando em consideração o foco do presente trabalho, desenvolvimento de um sensor de temperatura baseado em demodulação de FBGs, é importante abordar algumas técnicas relacionadas a este assunto.

As FBGs permitem medidas confiáveis para medições de grandezas físicas como temperatura e tensão. O princípio de operação desses sensores é baseado no deslocamento espectral da rede. Com a finalidade de demodular as informações geradas pela resposta desse sensor várias técnicas foram propostas, demonstradas e algumas já disponíveis comercialmente. Diferentes técnicas de demodulação são, usualmente, comparadas utilizando os seguintes parâmetros: capacidade de multiplexação, tempo de resposta, estabilidade, acurácia e custo por canal. Em muitos casos, estas técnicas se baseiam em um ou mais parâmetros (ZHAO & LIAO, 2004; NUNES *et al*, 2004).

Entre algumas técnicas de demodulação da luz refletida por uma rede de Bragg, atualmente, existem duas principais. Uma das técnicas de demodulação se baseia na medição de todo o espectro de reflexão da rede e da posição do pico, sendo esta a mais utilizada (XIAO *et al*, 2008), enquanto a outra técnica utiliza a convolução entre duas FBGs para obtenção da resposta da potência óptica total (ZHAO & LIAO, 2004). Cada técnica tem suas vantagens e desvantagens e os seguintes aspectos são levados em consideração: número e distribuição espacial de sensores interrogados, dinâmica das grandezas e tamanho e peso do sistema (KATO, 2004).

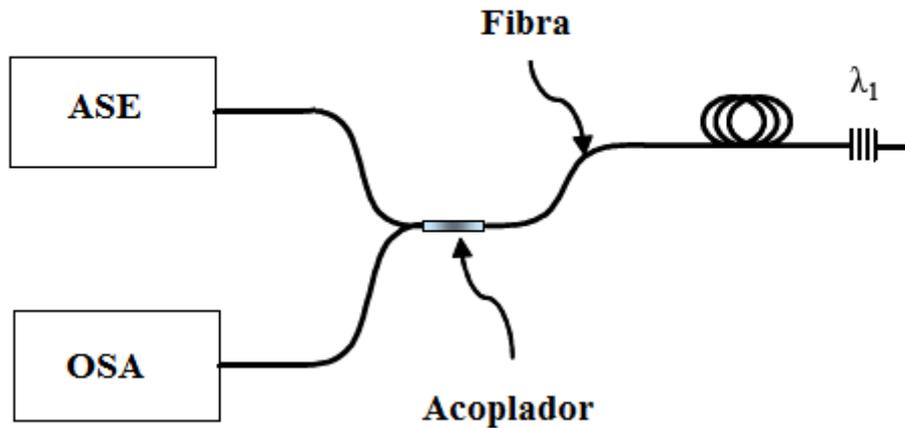
### 3.1. Demodulação por Comprimento de Onda

Esta técnica é a mais simples e estudada, pois mede diretamente o deslocamento do comprimento de onda da FBG em relação a um parâmetro externo atuante. Todo o espectro de reflexão da FBG sofre um deslocamento proporcional à perturbação na mesma (LI & PENG, 2008; XIAO *et al*, 2008).

A configuração do sistema óptico de demodulação por comprimento de onda consiste no uso de uma fonte óptica emitindo luz na faixa característica da FBG, um acoplador, a própria FBG e um Analisador de Espectro Óptico (OSA). A simplicidade e objetividade da montagem a tornam um método direto de demodulação (XIAO *et al*, 2008).

Apesar da simplicidade desta técnica, o alto custo dos equipamentos utilizados neste sistema é um fator limitante para sua utilização. Esta limitação se deve à alta resolução espectral necessária para a aplicação. Um outro fator relevante é o tempo de aquisição espectral. Isto porque o OSA tem um tempo de varredura do espectro considerável, o que praticamente inviabiliza a obtenção de medidas dinâmicas, e ainda, limita a aquisição de grandezas estáticas (KATO, 2004).

A montagem do sistema óptico de demodulação por comprimento de onda é mostrada na Figura 3.1.1. Neste sistema é utilizado: um Amplificador com Emissão Espontânea (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) como fonte óptica, um Analisador de Espectro Óptico (OSA – *Optical Spectrum Analyzer*) para caracterizar o sinal refletido pela FBG e um acoplador em Y para dividir o sinal luminoso.



**Figura 3.1.1.: Montagem de um sistema de demodulação por comprimento de onda (Adaptado de KATO, 2004).**

Esta técnica de demodulação é bem conhecida no Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) da COPPE/UFRJ, onde já foi utilizada para medição de temperatura em ambientes hostis de altos campos eletromagnéticos. Allil e colaboradores (ALLIL *et al*, 2007) desenvolveram um sistema de sensoriamento multiponto, onde foram multiplexados 6 FBGs na mesma FO para a medição de temperatura em seis pontos distintos. Um gráfico com a resposta espectral de um dos sensores utilizados é mostrado na Figura 3.1.2. O sensor sofreu uma variação térmica de 40°C a 95°C e na figura é possível observar o deslocamento linear do comprimento de onda em função da temperatura (ALLIL *et al*, 2007).

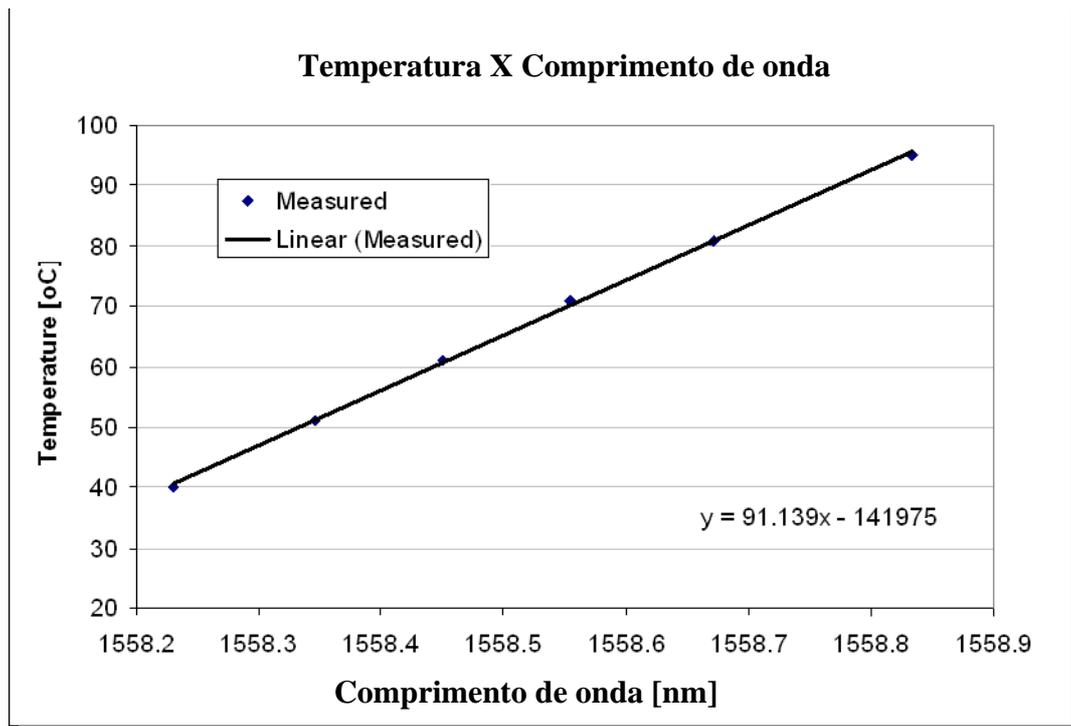


Figura 3.1.2.: Resposta da FBG utilizada em Temperatura pelo Comprimento de onda (Adaptado de ALLIL *et al*, 2007).

Esta técnica tem como vantagem a alta resolução espectral, da ordem de  $\mu\text{m}$ . Mas, em contra partida, tem um custo relativamente alto, independentemente do número de sensores interrogados (NUNES *et al*, 2004)

### 3.2. Demodulação por Filtros Fixos

Nesta técnica de demodulação é utilizada uma FBG filtro, como filtro espectral fixo. Este tem a função de interrogar a resposta espectral de uma FBG sensora que está submetida a uma variação do ambiente externo mensurável pela mesma (NUNES *et al*, 2004). A técnica também é conhecida como filtro casado com a grade sensora (CAZO, 2001).

Duas formas de aplicação desta técnica são apresentadas e discutidas nesta seção. Uma técnica de demodulação por um filtro fixo e a outra com dois filtros fixos. Em ambas é necessária uma fonte óptica banda larga, um fotodetector para cada FBG

filtro, uma rede utilizada como filtro, e outra como sensor. A diferença fundamental está no fato do segundo método possuir uma FBG filtro a mais; esta segunda rede proporciona uma maior faixa de leitura, comparativamente ao primeiro (NUNES *et al*, 2004; KATO, 2007; BARREDA DE LA CRUZ, 2007).

A disposição espectral, utilizada pela técnica de demodulação por um filtro fixo, entre a FBG filtro e a sensora é mostrada na Figura 3.2.1.

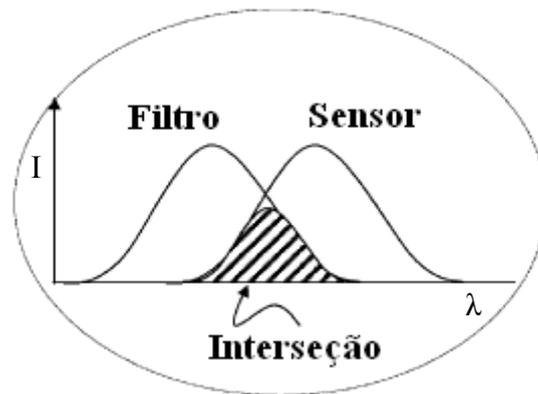


Figura 3.2.1.: Arranjo Experimental de demodulação com um filtro fixo (Adaptado de NUNES *et al*, 2004).

O arranjo espectral da técnica de dois filtros fixos é mostrado na Figura 3.2.2. Os filtros têm uma localização espectral tal qual, sem nenhuma perturbação externa, a FBG coincide igualmente com os dois filtros.

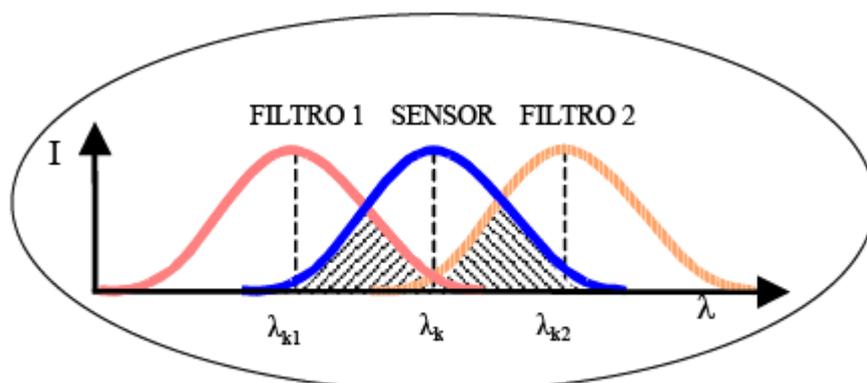
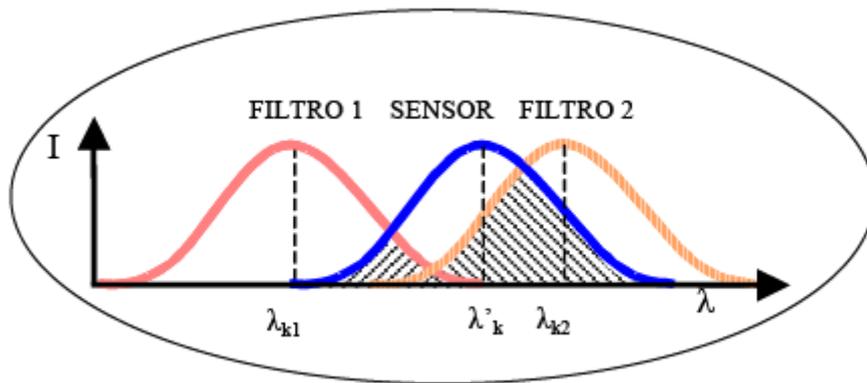


Figura 3.2.2.: Arranjo espectral dos dois filtros com o sensor (Adaptado de KATO, 2004).

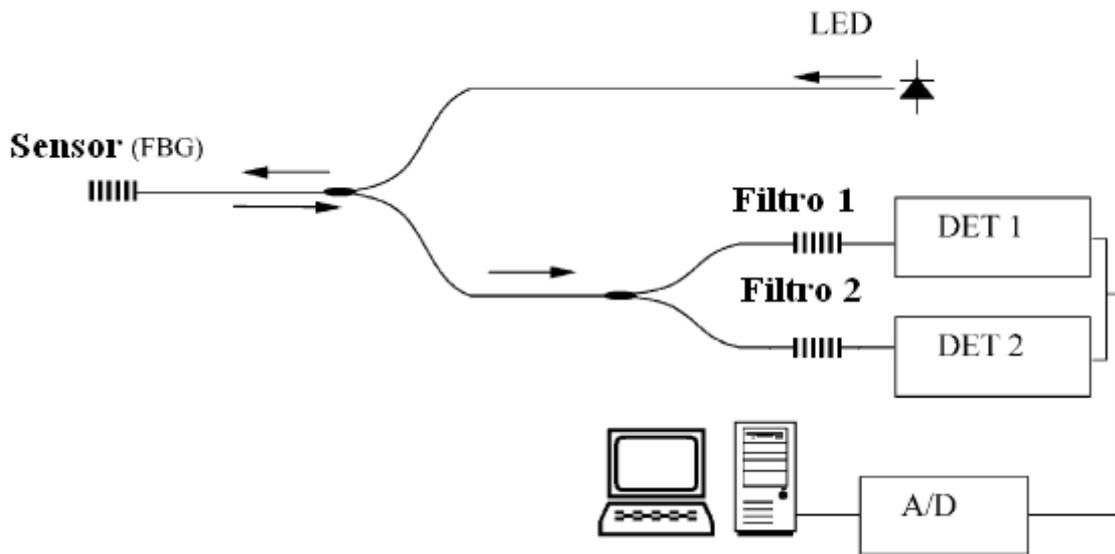
O arranjo espectral da técnica de dois filtros fixos é mostrado na Figura 3.2.3. Nesta figura pode ser observado a FBG sensora deslocada devido a alguma perturbação externa.



**Figura 3.2.3.: Arranjo espectral dos filtros com o sensor deslocado devido a alguma perturbação externa (Adaptado de KATO, 2004).**

A disposição das FBGs filtro é mostrada nas Figuras 3.2.2 e 3.2.3, que tem relação com a FBG sensora. Esse sistema utiliza a razão entre o sinal proveniente do detector 1 e do detector 2 relativo a cada filtro, conforme é mostrado na Figura 3.2.2 (NUNES *et al*, 2004 e KATO, 2004; BARREDA DE LA CRUZ, 2007).

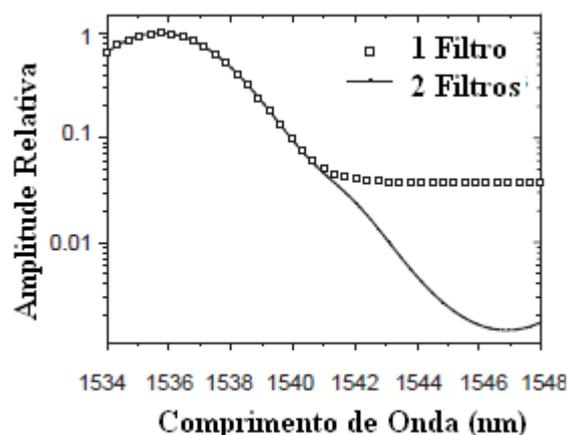
O arranjo experimental utilizado na técnica de dois filtros fixos é mostrado na Figura 3.2.4.



**Figura 3.2.4.: Arranjo experimental de demodulação com dois filtros fixos**  
(Adaptado de NUNES *et al*, 2004).

A técnica de dois filtros fixos permite um grande range espectral de utilização, se comparada com a técnica com apenas um filtro. Conforme pode ser observado na Figura 3.2.5, a técnica de dois filtros fixos cobre uma faixa espectral de aproximadamente 15 nm e de um filtro fixo de aproximadamente 4 nm. Esse range espectral, para uma FBG, seria equivalente a variações térmicas de aproximadamente 1500°C e 400°C, respectivamente, se considera a sensibilidade térmica da FBG de 10pm/°C (NUNES *et al*, 2004).

Uma comparação entre as respostas das técnicas de um e dois filtros fixos é mostrada na Figura 3.2.5. Nesta figura também é mostrada a resposta normalizada do deslocamento de uma FBG sensora com relação à FBG filtro fixo.



**Figura 3.2.5.: Resposta da técnica com dois filtros fixos comparada com a técnica de um filtro (Adaptado de NUNES *et al*, 2004).**

A técnica de demodulação com dois filtros fixos é muito semelhante à técnica com um filtro fixo. Entre as principais diferenças está o maior intervalo de leitura térmica e a utilização de mais um fotodetector. A grande faixa espectral pode ser ou não vantajoso dependendo da aplicação. Contudo, para a técnica de dois filtros fixos, a necessidade de mais equipamentos aumenta o custo do sistema, tornando-o desvantajoso neste aspecto, e a faixa térmica em questão está acima da temperatura que uma rede de Bragg pode suportar, pois acima dos 800° C a rede é apagada.

Em uma comparação entre a técnica de demodulação com filtro fixo e por comprimento de onda. A primeira requer um circuito opto-eletrônico para cada sensor. No entanto, o custo individual de leitura para cada sensor e o tempo de resposta são relativamente baixos, este último limitado apenas pela capacidade de resposta do fotodetector. Já a segunda técnica utiliza o mesmo circuito para interrogar vários sensores, porém com alto custo e com tempo de resposta limitado (NUNES *et al*, 2004).

## CAPITULO IV

### 4. Materiais e Métodos

Neste capítulo é apresentado o material utilizado, suas principais características e a montagem utilizada.

#### 4.1. Redes de Bragg em Fibra Óptica

Duas FBGs foram utilizadas, uma como elemento sensor que é submetido a uma variação de temperatura e outra que serve como um de filtro fixo refletor. Essas redes foram produzidas pelo Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), em fibra óptica de sílica monomodo dopadas com Germânio e pela técnica interferométrica com máscara de fase. A caracterização espectral das mesmas é mostrada na parte de resultados.

A escolha das duas redes de Bragg foi determinada de tal maneira que houvesse uma interseção no espectro das duas redes, porém que não fossem iguais. Contudo, foi considerado o deslocamento da rede sensora em função da grandeza física mensurada, essa consideração foi realizada para possibilitar medidas em um range de variação térmica de 100°C. As condições citadas impunham alguns limites, pois o deslocamento espectral da rede não deveria se sobrepor totalmente e também não deslocar até deixar de haver alguma interseção, com variações de temperaturas abaixo da condição inicial.

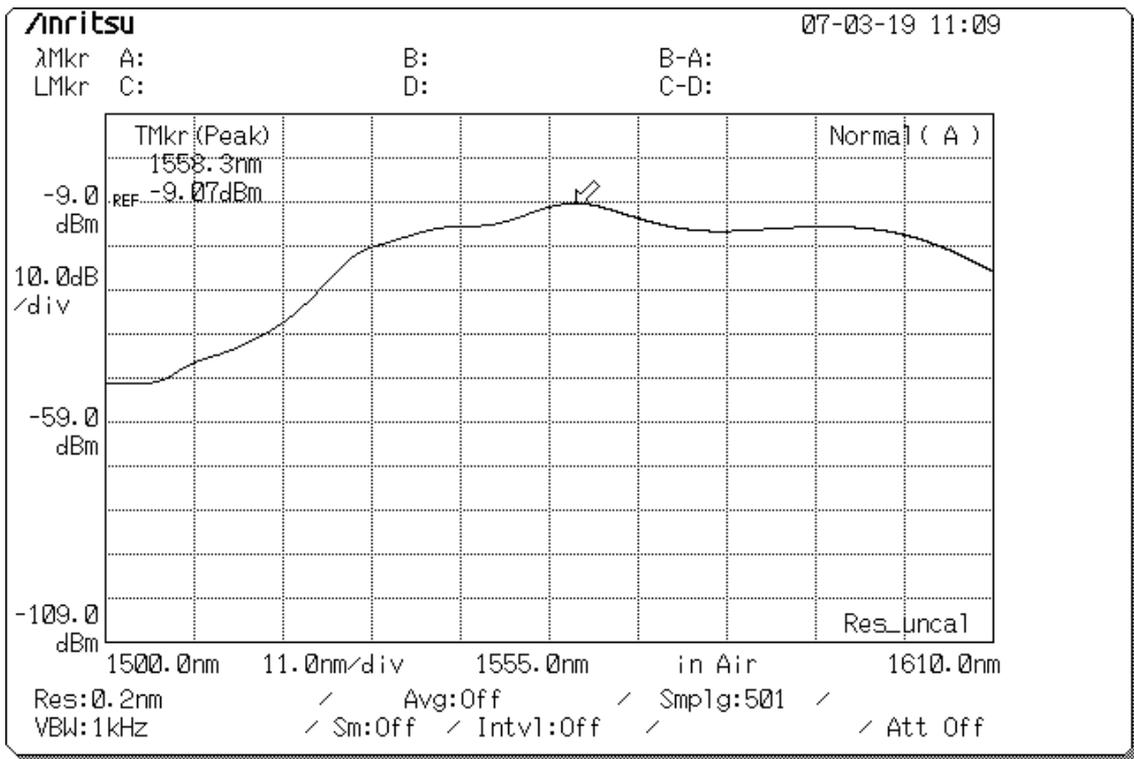
## 4.2. Analisador de Espectro Óptico

O Analisador de Espectro Óptico (OSA – *Optical Spectrum Analyser*) é um equipamento dotado de redes de difração para a caracterização de um sinal óptico a ser medido ou caracterizado. Tal caracterização se dá por comprimento de onda do sinal em nm por intensidade óptica, que pode ser em uma escala linear dada em Watts (W) ou uma escala logarítmica dada em dBm, ou densidade de potência (W/nm).

O aparelho utilizado foi o OSA da *Anritsu* modelo MS9710C, este utiliza uma FO monomodo do seu canal de entrada até as redes de difração. É capaz de caracterizar sinais em uma faixa de comprimento de onda de 600 nm a 1750 nm, com resolução típica de 0,07 nm, pode atingir resolução máxima de 0,05 nm em 1550 nm e sensibilidade mínima de -90 dBm e máxima de +10dBm que pode ser aumentada até +23dBm com o acionamento do atenuador interno.

Neste equipamento é possível ajustar vários parâmetros de suas medidas, como: resolução, médias e número de pontos de uma caracterização. Por meio de um drive de disquete *floppy* 1.44 é possível salvar os pontos obtidos e figuras, o que permite uma análise *off-line* dos dados obtidos em computador. O ajuste dos parâmetros possíveis determina diretamente o tempo de leitura do equipamento. Quanto menor a resolução e o número de médias menor será o tempo de aquisição, tipicamente 10 segundo, e quanto maior a resolução e médias maior o tempo, tipicamente 1 minuto.

Um exemplo de espectro caracterizado por este equipamento é mostrado na Figura 4.2.1. e uma foto do OSA é mostrada na Figura 4.12.2.



**Figura 4.2.1: Caracterização espectral da fonte óptica ASE.**

### 4.3. Fonte Óptica ASE-FL7002

O Amplificador com Emissão Espontânea (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) é uma fonte óptica de banda larga que utiliza como princípio ativo uma fibra dopada com fluoreto de érbio. Esta é estimulada (ou pulsada) por um laser diodo de infravermelho de  $\lambda$  igual a 1480 nm.

O modelo do equipamento utilizado foi o ASE-FL7002 *Broadband ASE Light Source*, fabricado pela *Thorlabs* que tem como características os seguintes parâmetros:

Espectro de emissão contínua de 1530 nm a 1610 nm.

Potência óptica total de + 13dBm, com densidade espectral típica de -18dBm/nm para o comprimento de onda ( $\lambda$ ) igual a 1550 nm, -11dBm/nm para  $\lambda$  igual a 1540 até

1560 nm e -18dBm/nm para  $\lambda$  igual a 1610 nm. Tais parâmetros são mostrados na Figura 4.2.1.

Capacidade de produzir uma potência óptica total de 20mW ou 13dBm.

Alto grau de estabilidade da potência óptica de  $\pm 0,005$  dB.

A FO utilizada internamente para saída da luz gerada pelo aparelho é uma fibra monomodo padrão modelo SMF-28 de sílica.

A caracterização espectral da fonte óptica ASE realizada com a utilização do OSA é mostrada na Figura 4.2.1. e uma foto do equipamento, sendo utilizado no experimento, é mostrada na Figura 4.12.2.

#### **4.4. Medidor de Potência Óptica FPM-8200**

O medidor de potência óptica (PM – *Power Meter*) é um equipamento baseado em um fotodetector de InGaAs.

O medidor de potência óptica utilizado foi o modelo FPM-8200 *Fiber Optic Power Meter* da *ILX Lightwave* que tem como características os seguintes parâmetros:

- Largura de banda óptica sensível de 800 nm a 1600nm. Esta largura é devido a responsividade espectral do detector.

- Sensibilidade de -75 dBm até + 1,5 dBm, com + 10 dBm como limiar de danos. Esta sensibilidade é especificada para FO monomodo (SMF-28 *fiber*), com abertura numérica (N) igual a 0,11.

- Uma taxa de amostragem de 50 milisegundos (ms).

- Uma acuraria de 2,5% em condições de referência, com 23 °C  $\pm$  2°C e potência óptica inferior a 10 dBm (10 $\mu$ W), também é capaz de realizar 20 medidas por segundo para dados mais realísticos com precisão de 0,1 pW.

Este equipamento tem como propósito uma boa precisão e rápida resposta em medidas de potência óptica em guias de onda (FOs) e seus componentes.

A curva da responsividade espectral ( $R$ ) do InGaAs é mostrada na Figura 4.4.1. O  $R$  é definido como a razão entre foto-corrente ( $i_p$ ), gerada devido a incidência da luz, e a potência óptica incidente  $P_0$  (THORLABS, 2009).

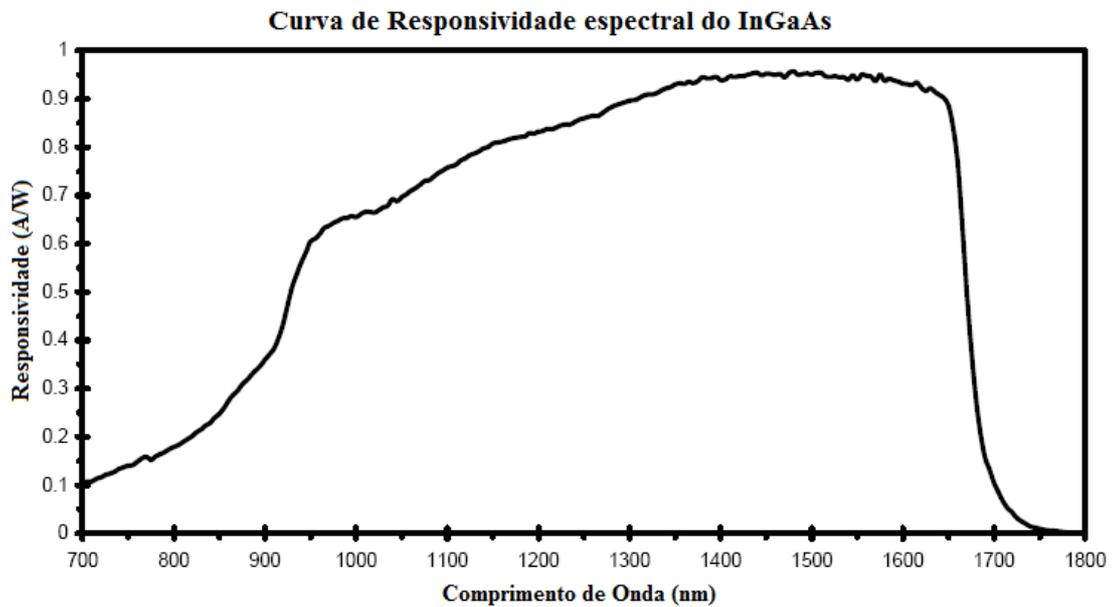


Figura 4.4.1: Responsividade espectral do detector InGaAs (Adaptado de THORLABS, 2009).

Uma foto do PM é mostrada na Figura 4.12.2, juntamente com os outros equipamentos utilizados no sistema óptico.

#### 4.5. Fotodetector 818-IR Newport

O Fotodetector modelo 828-IR com número de série 7952 foi utilizado. Este foi testado e calibrado na fábrica seguindo padrões do NIST (*National Institute of Standards and Technology - USA*) com procedimentos de acordo com a ISO-9001.

Segundo o fabricante a sensibilidade dos fotodetectores é da ordem de pW até 2 W, responsividade de 0,8 A/W de pico, baseado em um fotodetector de Germânio. Neste há um atenuador móvel modelo OD3, entre o fotodetector e a lente colimadora própria para Fibra Óptica (FO). O atenuador deve ser retirado para medidas menores que 1 mW, pois este atenua a luz na faixa do infravermelho em 30 dB (1000 vezes).

Uma foto do fotodetector 818-IR da Newport com conector BNC é mostrado na Figura 4.5.1.



**Figura 4.5.1: Foto do fotodetector 818-IR da Newport.**

#### 4.6. Termômetro Salvterm

O termômetro foi o aparelho utilizado para as medições diretas de temperatura. Neste caso, foi utilizado o Termômetro Salvterm modelo 1200K com precisão de 0,1°C.

Uma foto do termômetro é mostrado na Figura 4.12.2 e a montagem na qual foi utilizado é mostrado na Figura 4.7.1.

#### 4.7. Agitador Térmico

Foi utilizado um agitador térmico, modelo Q-261A11 da *Quimis*. Este equipamento possui uma chapa em sua parte superior, a qual serve para aumentar a temperatura e apoio para o Béquero. A água foi utilizada como fluido no béquer, e a temperatura foi variada da temperatura ambiente no laboratório, aproximadamente igual a 23°C, à temperatura máxima, igual a 90°C.

O agitador térmico tem um sistema magnético que interage com pequena barra metálica (chamada de “peixinho”). Esta interação age como elemento misturador do fluido e, deste modo, contribui para homogeneizar a temperatura da água.

A fibra óptica com a FBG gravada foi imersa no banho térmico com água dentro de um béquer, um fator que limitou o range de temperatura do ensaio térmico, pois era possível a variação da temperatura ambiente até próximo da temperatura de ebulição da água de 100° C.

A configuração utilizada no agitador térmico é mostrada na Figura 4.7.1, juntamente ao béquer, Salvterm 1200K e a FBG sensora que foram submetidos a uma variação de temperatura.

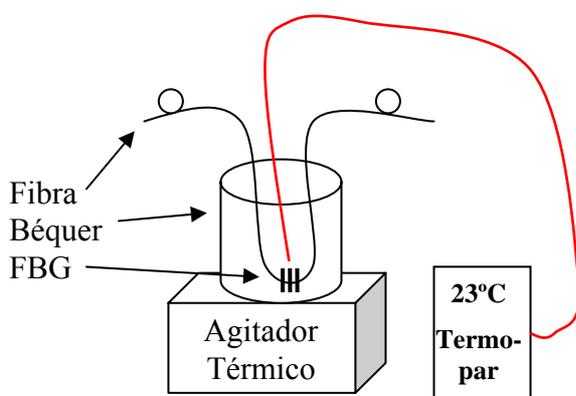


Figura 4.7.1: Montagem do experimento no Agitador Térmico.

#### 4.8. Acoplador em Y

O acoplador em Y é um dispositivo óptico, passivo, em fibra monomodo e bidirecional. Neste, a luz pode seguir as duas direções possíveis. O equipamento utilizado é um acoplador 50:50, ou seja, a luz que entra pelo braço da esquerda sai pelos braços da direita em uma proporção de 50% para cada fibra.

Uma foto do acoplador Y 50:50 da *OPTOLINK*, com conector FC, é mostrada na Figura 4.8.1.



**Figura 4.8.1:** Foto de um acoplador em Y.

#### 4.9. Circulador

Uma foto do circulador em fibra utilizado é mostrada na Figura 4.9.1. Nesta foto é possível observar as FO acopladas no mesmo.

O circulador é um elemento óptico, passivo, construído em fibra monomodo e bidirecional. Conforme ilustrado na Figura 4.8.1 este tem um aspecto físico similar ao acoplador em Y, mas com um funcionamento diferente.

O circulador tem um funcionamento característico, em que a luz de um braço de entrada deste elemento é direcionada para outro braço. Um esquemático utilizando o Circulador é mostrado na Figura 4.11.1. Nesta figura uma seta curvada dentro de um círculo indica a presença do componente óptico e a seta representa o sentido de acoplamento da luz. O espectro que entra pelo braço 1 do acoplador é direcionada

(“circulada”) para o braço 2, a do braço 2 é direcionada para o braço 3. Por último, luz que entra pelo braço 3 não passa para o braço 1 e nem o 2. logo Desta parte do circulator para os demais funciona como um isolador. Esta característica é ideal para uso com fontes sensíveis como lasers, pois o retorno de luz para o Laser prejudica o funcionamento.

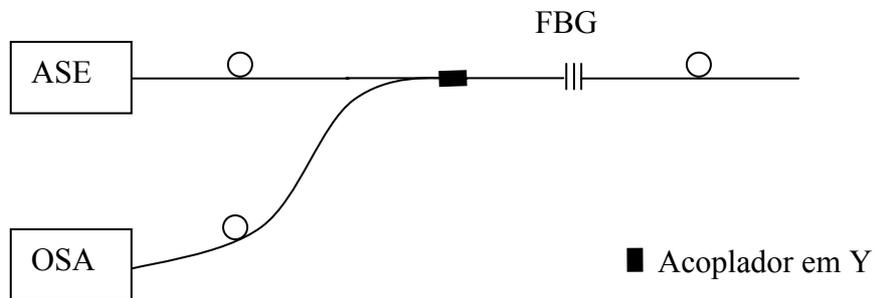


**Figura 4.9.1: Foto do Circulador.**

#### **4.10. Montagem para caracterização das FBGs**

Para a caracterização das Redes de Bragg em Fibra foram utilizados os materiais já descritos com a configuração mostrada na Figura 4.10.1.

Foi utilizado como fonte de luz o ASE, para aquisição das respostas espectrais o OSA, um acoplador em Y e as duas redes, a 1538,5 nm e a 1540,5 nm, que foram caracterizadas individualmente. Nesta configuração também poderia ser utilizado o circulator que tem um melhor aproveitamento da luz, mas o mesmo já estava sendo empregado.

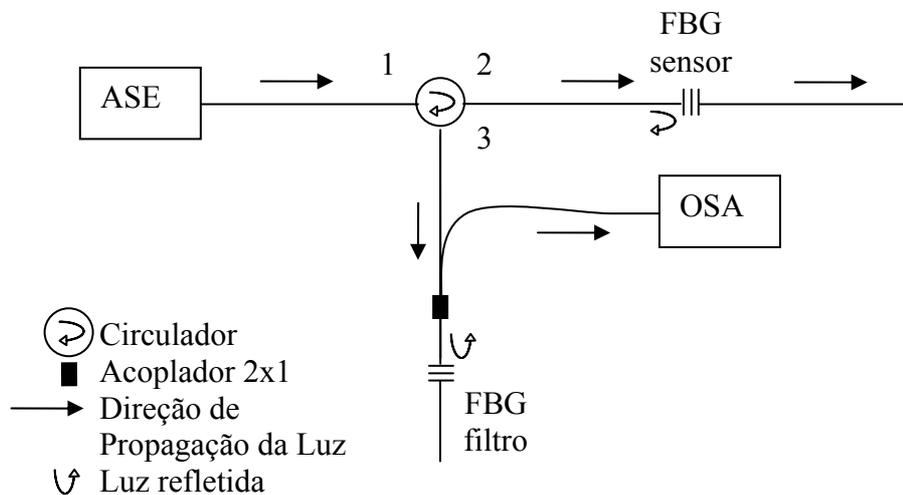


**Figura 4.10.1: Configuração utilizada para caracterização das FBGs.**

Utilizando a montagem da Figura 4.10.1, foi variado termicamente o fluido do banho térmico, onde estava a FBG, e as medidas realizadas a cada 5°C, conforme Figura 4.7.1. Os pontos obtidos foram processados em um computador, através de um algoritmo desenvolvido no software *Matlab 7.0*, para calcular o deslocamento de pico da rede, e o *OriginPro 7.5*, para o cálculo da regressão linear.

#### 4.11. Montagem para medição com o OSA

A montagem para medições com o OSA, foi realizada com os materiais já descritos. Esta é mostrada em um diagrama de blocos da Figura 4.11.1, que formam o sistema óptico para demodulação por filtro fixo. Neste caso, foi utilizado o OSA para fazer uma leitura espectral dos resultados obtidos. A FBG sensora foi variada termicamente da mesma maneira descrita na seção item 4.10.



**Figura 4.11.1: Configuração utilizada no experimento com o OSA.**

Um aspecto importante de ser lembrado é a característica da FBG em refletir o seu comprimento de onda característico, onde neste caso há duas reflexões provenientes das redes de Bragg.

Foi utilizado o ASE, o OSA, um circulador, um acoplador em Y e duas redes de Bragg juntas nessa montagem. Sendo a rede 1538,2 a rede sensora e a rede 1540,4 nm a rede filtro refletora.

A luz na faixa do infravermelho é gerada na fonte óptica (ASE), viaja pela fibra e passa no circulador. Deste a luz vai para a FBG sensora, onde é refletida conforme a característica espectral desta rede e em função do ambiente externo, volta para o circulador, e viaja até a FBG filtro. Neste último, é novamente refletida, passa pelo acoplador e segue para o OSA onde é realizada a medida.

Nas curvas obtidas pelo OSA foram considerados o deslocamento do pico medido diretamente no próprio equipamento para detectar a relação deste com a temperatura.

#### 4.12. Montagem para medição com o PM

Os materiais já descritos foram montados conforme o diagrama de blocos da Figura 4.12.1, onde, neste caso, a montagem é muito similar à utilizada na seção 4.11, sendo a maior diferença a troca do equipamento de medição OSA pelo PM.

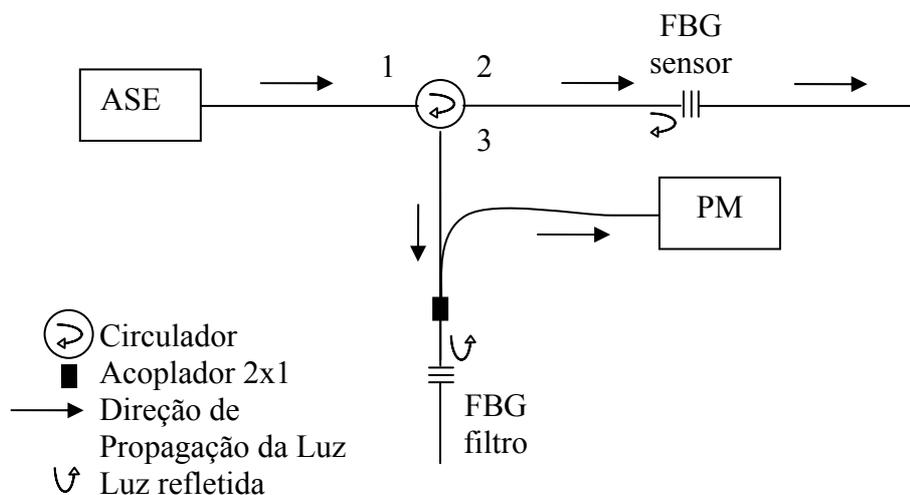
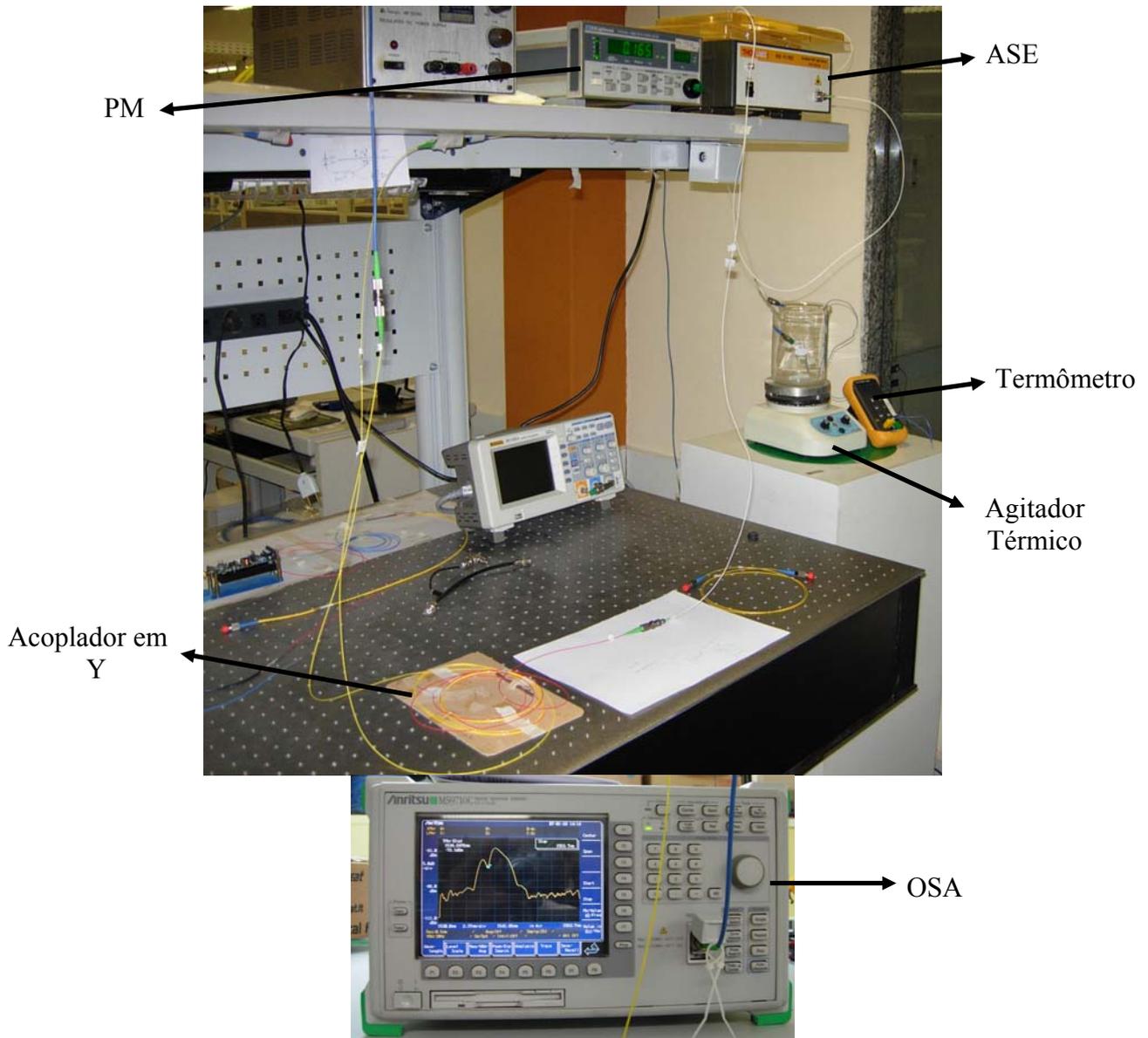


Figura 4.12.1: Configuração utilizada no experimento com o PM.

Uma foto dos equipamentos utilizados e descritos anteriormente é mostrada na Figura 4.12.2. Nesta Figura os equipamentos são indicados por setas.



**Figura 4.12.2: Equipamentos utilizados.**

### 4.13. Montagem do amplificador de transimpedância

O esquemático do circuito amplificador de transimpedância é mostrado na Figura 4.13.1. O circuito foi montado com dois estágios de amplificação, utilizando o amplificador operacional OPA111AM da *Burr-Brown*, este com sensibilidade na faixa de pA e alta impedância de entrada, com baixo *Drift* térmico de  $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  e relação sinal-ruído de  $-33 \text{ dB}$ .

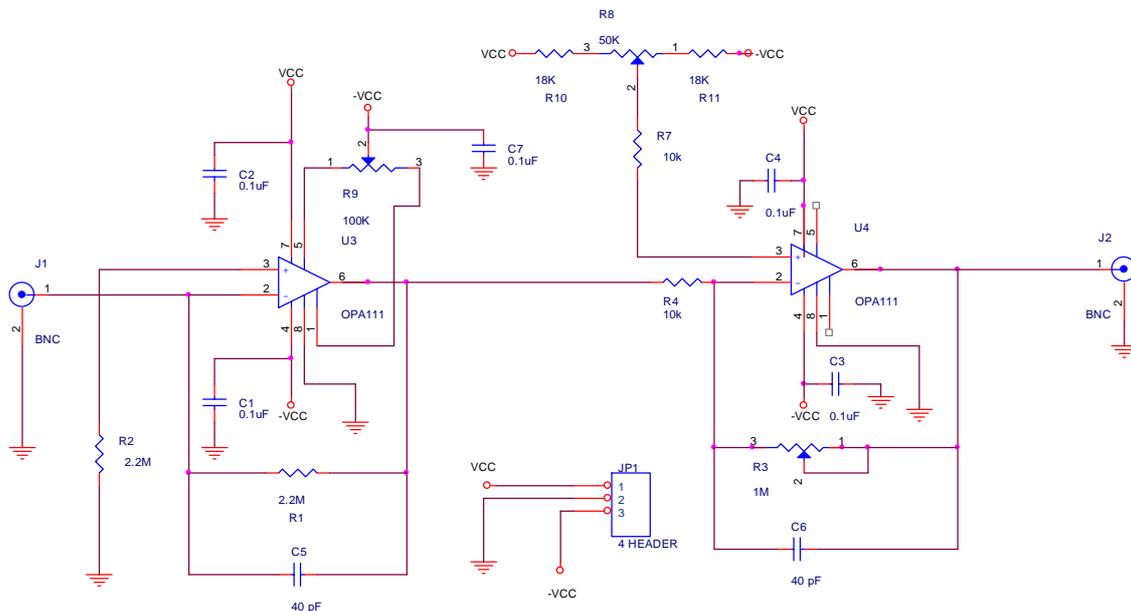
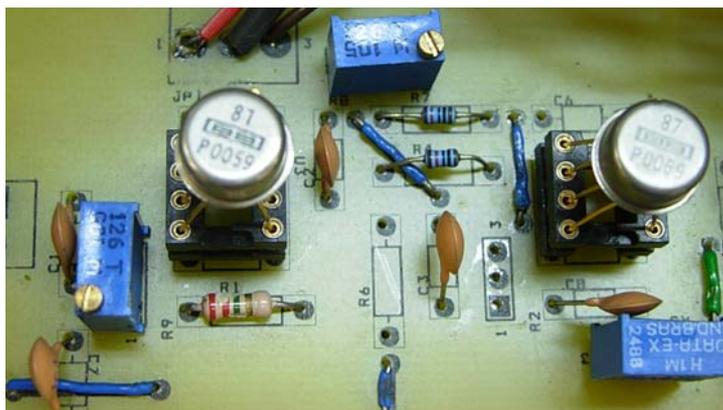


Figura 4.13.1: Esquemático do Circuito amplificador de Transimpedância.

Uma foto do circuito amplificador montado é mostrada na Figura 4.13.2. Inicialmente, o circuito foi projetado conforme ilustrado, mas a utilização dos capacitores C5 e C6 em paralelo, pois, com os respectivos resistores, impossibilitava a leitura.

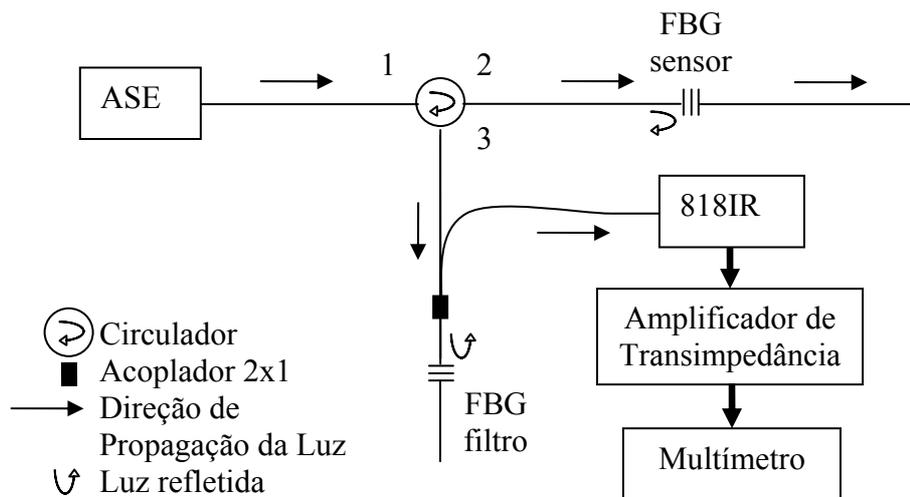


**Figura 4.13.2: Foto do circuito montado.**

Inicialmente o circuito foi projetado com resistores de carga entre os dois estágios de amplificação. No entanto, nos testes realizados foi possível constatar que o amplificador funcionou bem sem os resistores, por isso existem alguns espaços vazios na placa devido a componentes não utilizados.

#### **4.14. Montagem para medição com o amplificador de transimpedância**

A montagem para medição com o amplificador de transimpedância consiste em uma configuração mais robusta e de menor custo, comparativamente às anteriores, possibilitando a utilização em campo. Um diagrama de blocos com a montagem utilizada para tal medição é mostrado na Figura 4.14.1. Neste *setup* a principal mudança com relação aos outros é a substituição do OSA ou PM pelo 818IR e o amplificador de transimpedância.



**Figura 4.14.1: Configuração utilizada no experimento com o 818IR e o amplificador de transimpedância.**

#### 4.15. Simulação de experimento no computador

Utilizando um computador com o programa *Matlab 7.0* instalado, foi desenvolvido um algoritmo para simular a convolução devido a uma variação térmica. Esse algoritmo deslocou o espectro da FBG simulando a convolução entre as duas FBGs. Nesta simulação de experimento é usado os dados medidos e da caracterização das FBGs, onde a primeira FBG (à esquerda) é utilizada como elemento sensor, submetida a uma variação de temperatura, e a segunda (à esquerda) mantida a temperatura constante.

O algoritmo desenvolvido simulou a variação térmica da FBG sensora, calculou a resposta da FBG filtro em função do deslocamento espectral do sensor e calculou a integral da curva de resposta.

Na simulação não havia nenhum fator restringindo o range de temperatura, assim foi possível a simulação de temperaturas acima da atingida experimentalmente, porém para uma melhor visualização do fenômeno foi simulada a variação de temperatura em range de 20 °C até 130 °C.

Como a dependência espectral de uma FBG com a temperatura é bem conhecida, nesta simulação foi estabelecida uma variação linear de 10 pm/°C, assim para cada °C há uma variação de 10 pm (ou  $1 \times 10^{-3}$  nm) no espectro de reflexão da FBG.

#### 4.16. Calibração do termopar

Para a calibração do termopar foi utilizado um termômetro Salvterm 120 de platina da Salcas, este com calibração rastreada no INMETRO. Os dois equipamentos foram submetidos a um banho térmico como mostrado na Figura 4.7.1 e a uma variação de mais de 50° C em uma variação de aumento e decréscimo de temperatura, este último para verificação da histerese.

Uma foto do Salvterm 120 calibrado é mostrada na Figura 4.16.1.



Figura 4.16.1: Foto do Termômetro de platina Salvterm 120.

# CAPITULO V

## 5. Resultados e Discussões

### 5.1. Caracterização das redes

Os resultados obtidos da caracterização das duas FBGs (Redes de Bragg em Fibra), uma centrada em 1538,2 nm (Figura 5.1.1) e outra em 1540,4 nm (Figura 5.1.2), são mostrados nesta primeira seção. Os dados dessa caracterização foram obtidos com temperatura ambiente de 23°C.

Nessa Caracterização foi utilizado o método descrito no Capítulo IV. As Figuras 5.1.1 e 5.1.2 foram obtidas diretamente do OSA, que forneceu os dados em formato de texto (.txt) e as figuras no formato *bitmap*.

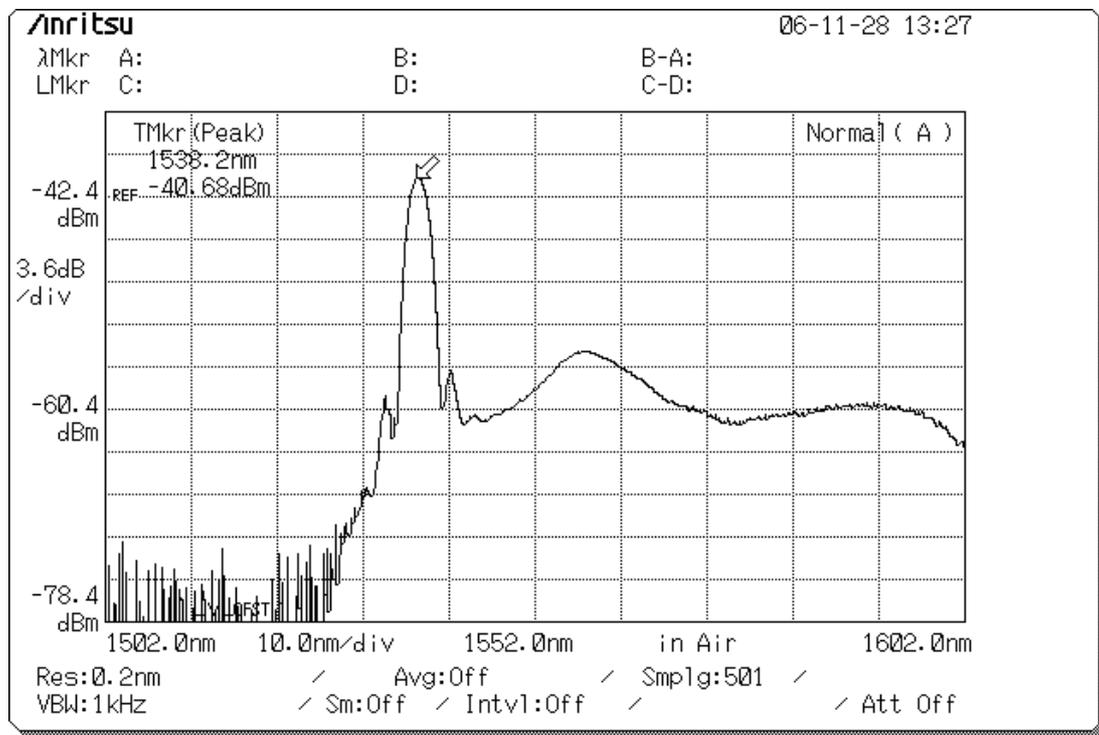
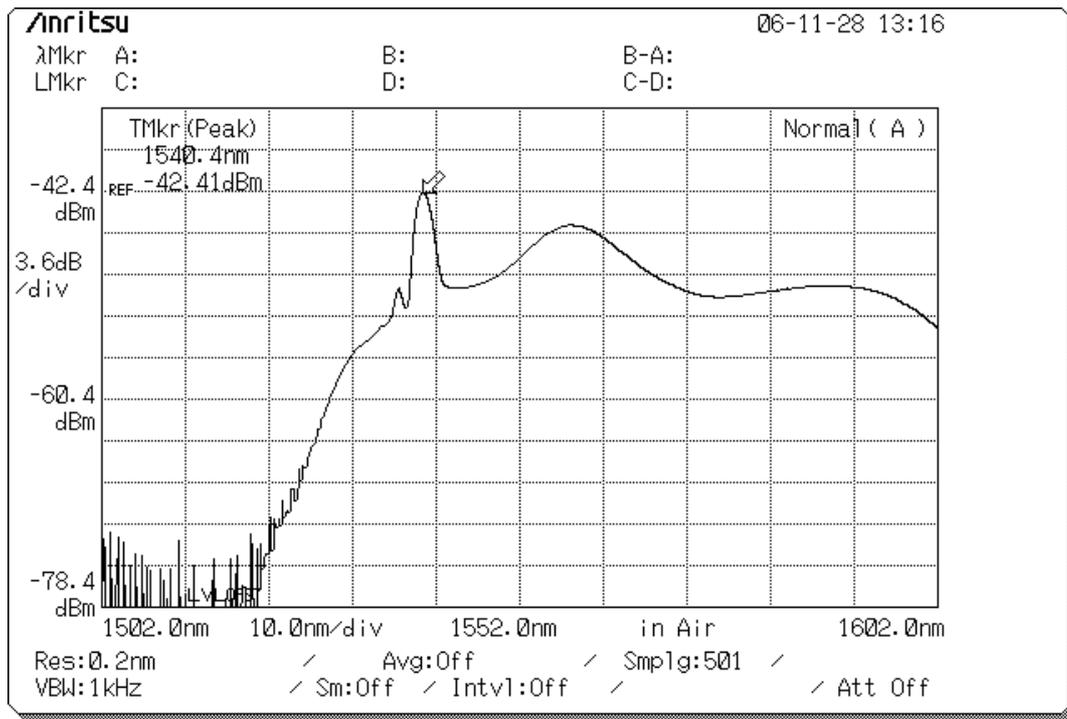


Figura 5.1.1: Caracterização espectral da FBG 1538,2.



**Figura 5.1.2: Caracterização espectral da FBG 1540,4.**

Nas Figuras 5.1.1 e 5.1.2 são mostrados os gráficos das caracterizações das redes de Bragg 1538,2 e 1540,4 em potência óptica por comprimento de onda, sendo dBm e nm as unidades utilizadas, respectivamente. Entretanto, se comparada a potência de pico na Figura 5.1.1 da FBG 1538 (-40,68dBm) com a Figura 5.1.2 da FBG 1540 (-42,41 dBm), percebe-se que as duas redes não têm a mesma refletância, tendo a rede sensora uma maior refletância. Nas figuras há uma seta indicando o pico da rede e à direita há um outro pico, proveniente à reflexão do espectro da fonte óptica pelo acoplador em Y.

## 5.2. Simulação de experimento

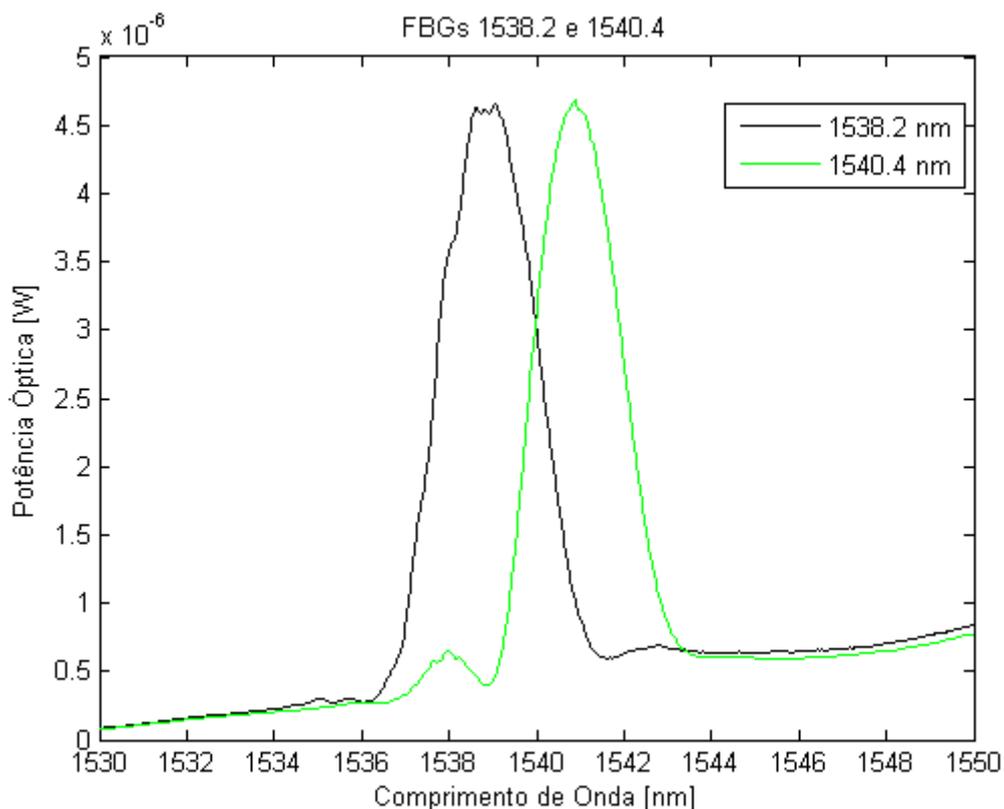
Nesta simulação são utilizados os espectros reais, da rede sensora e filtro, obtidos a partir da caracterização das FBGs. A FBG à esquerda é usada como elemento sensor, submetida a uma variação de temperatura e a rede filtro, à direita, mantida a temperatura constante.

Para simplificação dos cálculos da simulação, foi estipulada uma sensibilidade térmica da rede de  $10\text{pm}/^\circ\text{C}$ , valor bem próximo do valor experimental da FBG sensora.

Como descrito no Capítulo Materiais e Métodos, esta simulação foi realizada em computador com o programa *MATLAB 7.0* instalado. A intensidade óptica do espectro das duas redes foi processada em escala linear (mW), conforme pode ser observado na Figura 5.2.1. Com a finalidade de facilitar o entendimento e a visualização da convolução entre as duas redes, os espectros foram modificados para ficarem com a mesma amplitude.

O motivo de a rede sensora ser a FBG 1538,2 nm é o desejo de se obter um incremento da potência óptica resultante em função do aumento de temperatura para este arranjo, e assim os parâmetros apresentarem uma proporcionalidade direta.

Um gráfico das respostas espectrais de cada rede de Bragg é mostrado na Figura 5.2.1. Nesta figura, a curva preta é a FBG sensora (1538,2 nm) e a curva verde é a FBG filtro fixo em modo refletivo (1540,4 nm).



**Figura 5.2.1: Simulação do deslocamento da FBG sensora.**

A FBG sensora foi deslocada conforme a sensibilidade estipulada para a simulação e os resultados são mostrados na Figura 5.2.2. Nesta, a curva verde mais a direita é a rede filtro refletora, as outras curvas são a resposta espectral simulada para cada temperatura descrita na legenda da mesma. Nesta simulação a variação térmica foi de 20°C a 130°C.

A simulação do experimento também ajuda a compreender melhor o fenômeno de convolução que ocorre entre as duas FBGs.

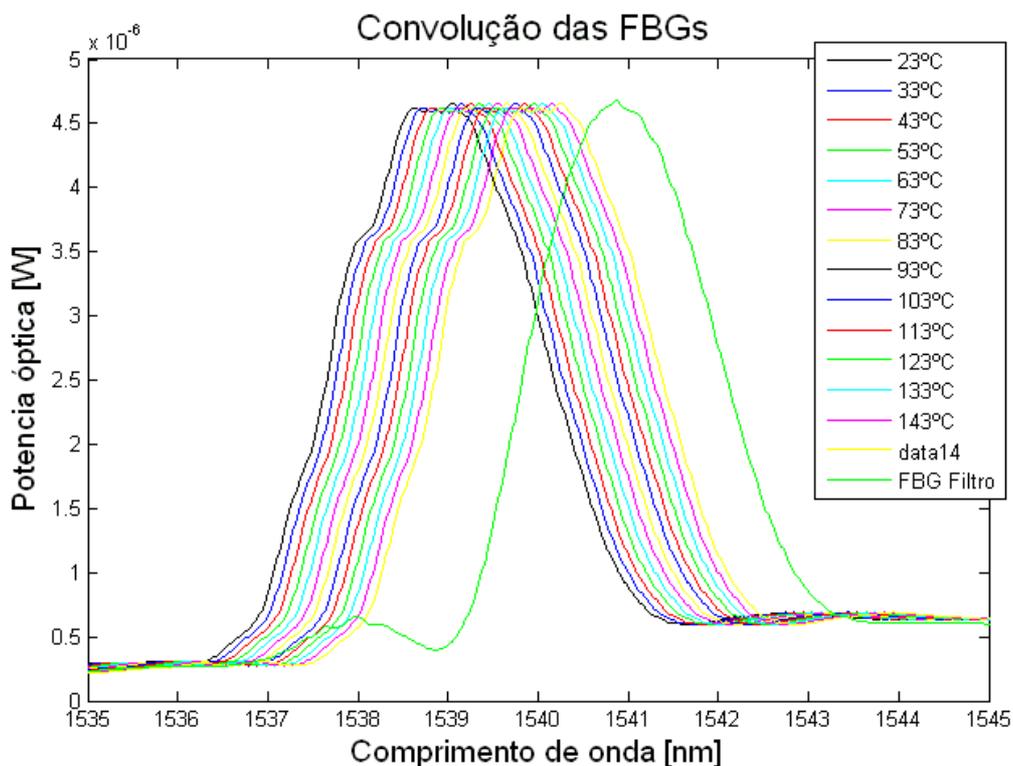
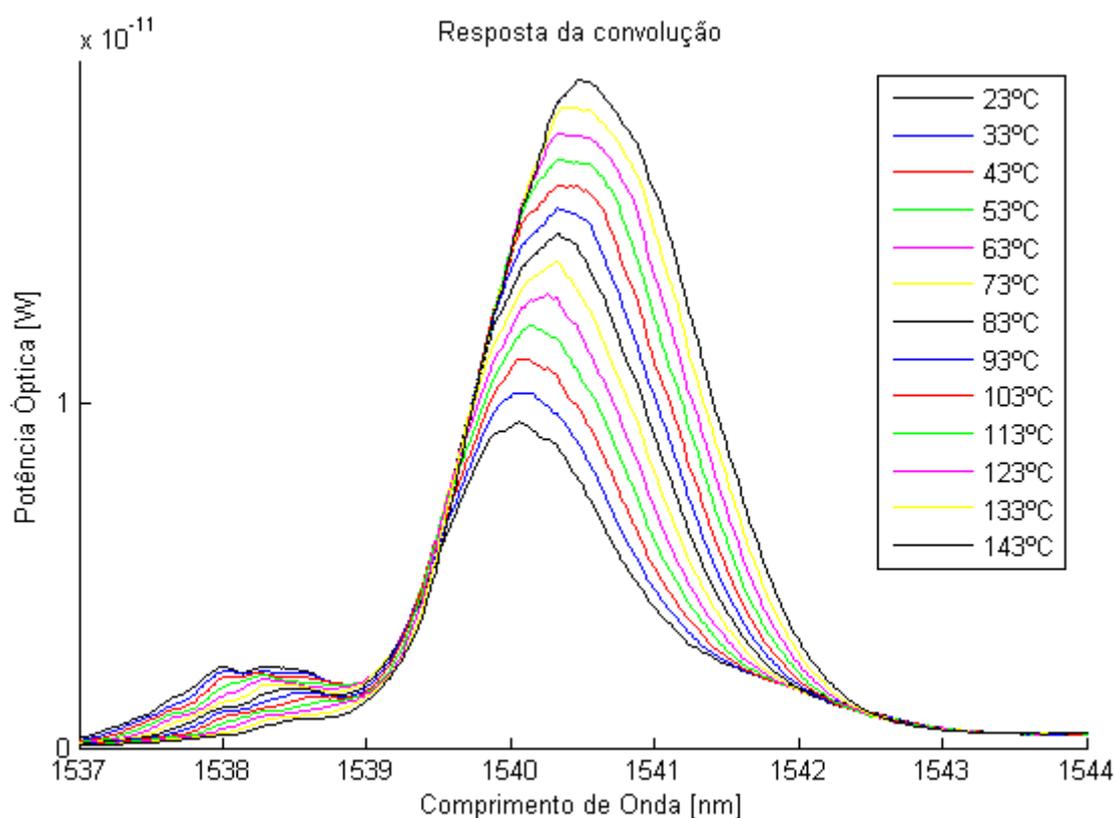


Figura 5.2.2: Simulação do deslocamento da FBG sensora.

Como é de se esperar a resposta entre essas duas curvas deve apresentar um incremento com o aumento da temperatura, pois conforme a primeira curva (correspondente a FBG sensora variada termicamente) se desloca para a direita, fenômeno característico de uma FBG submetida a um aumento de temperatura, as duas

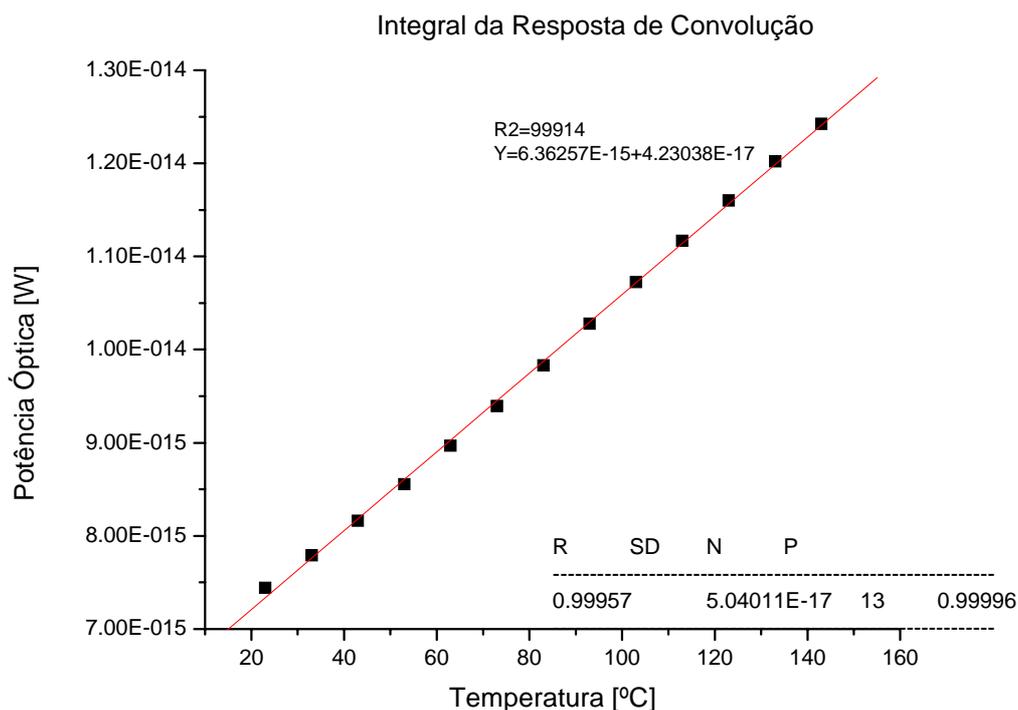
curvas tem uma área maior em intercessão. Este fato provoca e justifica o incremento da potência óptica na resposta mostrado na Figura 5.2.3.

A resposta da convolução simulada entre os espectros das duas redes de Bragg é mostrada na Figura 5.2.3. A curva de menor intensidade corresponde à menor temperatura. Nesta figura é possível observar o aumento da potência óptica refletida com o aumento da temperatura. Para mensurar esse incremento foi calculada a integral de cada curva.



**Figura 5.2.3: Resposta da Convolução simulada entre as duas FBGs.**

O valor das área das curvas da Figura 5.2.3 tem relação direta com a temperatura da legenda. O gráfico desse cálculo é mostrado na Figura 5.2.4, com os valores calculados pela respectiva temperatura. No gráfico é ainda mostrada uma regressão linear dos pontos obtidos.



**Figura 5.2.4: Resultado da Integração das curvas pelas suas respectivas temperaturas.**

O resultado da regressão linear realizada com os pontos do gráfico apresentado na Figura 5.2.4 é mostrado na Tabela 5.2.1, onde A é o coeficiente linear da reta, B o coeficiente angular, R é o coeficiente de correlação entre os pontos da reta (quanto mais perto de 1, maior o grau de correlação), SD é o desvio padrão, N o número de pontos. Essa tabela, assim como as próximas, tiveram os parâmetros calculados pelo programa *OriginPro 7.5* pelo método de regressão linear.

**Tabela 5.2.1: Regressão linear para os dados da Figura 4.6 ( $Y=A+B \cdot X$ ).**

Parâmetro	Valor	Erro
A	6.36257E-15	3.40138E-17
B	4.23038E-17	3.73598E-19
<hr/>		
R	SD	N
0.99957	5.04011E-17	13
<hr/>		
	P	
	<0.0001	

A intensidade óptica em função da temperatura mostrado na Figura 5.2.4, por serem simulados, não sofre a atenuação devido as perdas da luz com componentes do sistema óptico. Logo, se comparado a um sistema experimental não haverá equivalência entre a sensibilidade dessa resposta simulada e uma resposta experimental. Assim, inviabilizado a comparação dos resultados simulados e experimentais.

### 5.3. Caracterização da sensibilidade térmica da FBG sensora 1538,2 nm

O espectro da FBG 1538,2 nm submetida a uma variação térmica é mostrado na Figura 5.3.1. Neste, existe uma reta de localização do ponto de maior potência óptica (pico) da curva. Como é possível observar no gráfico, cada curva está associada a uma temperatura que foi variada de 24°C a 70°C. Neste gráfico são mostrados dados reais obtidos a partir do diagrama de blocos especificado na seção 4.10. Como era esperado a FBG sofreu um deslocamento no seu espectro de reflexão com o aumento da temperatura.

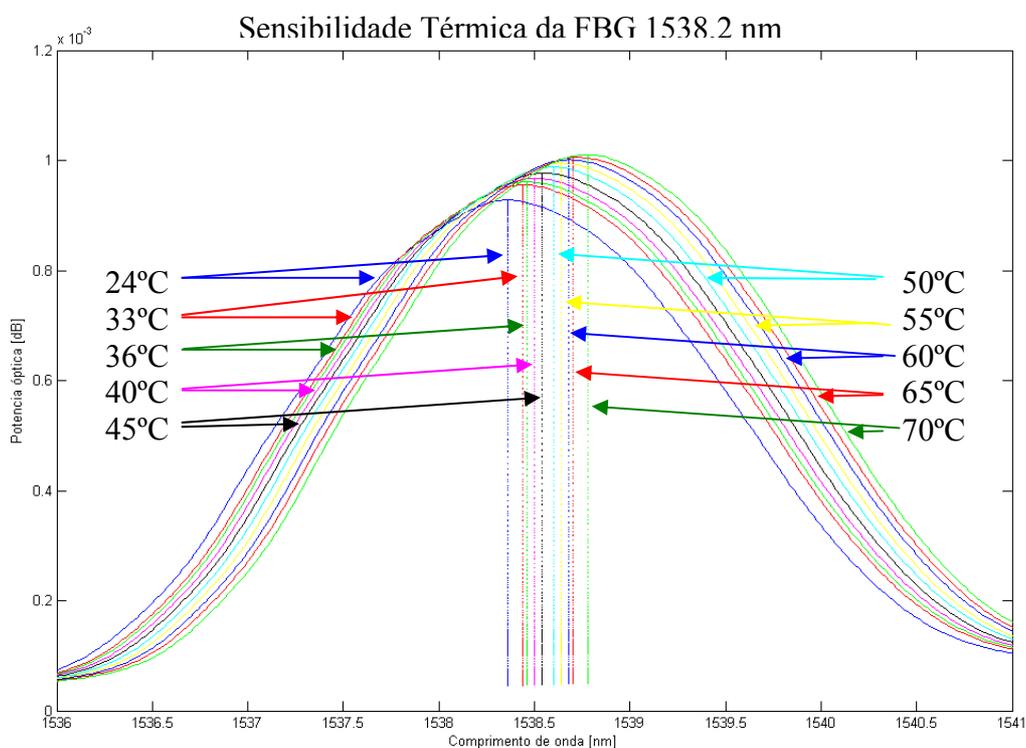


Figura 5.3.1: Deslocamento espectral da FBG 1538,2 nm, devido à variação térmica.

O deslocamento do pico pela temperatura é mostrado na Figura 5.3.2. Esse deslocamento é utilizado para determinar a sensibilidade da FBG 1538,2 que será utilizada como elemento sensor.

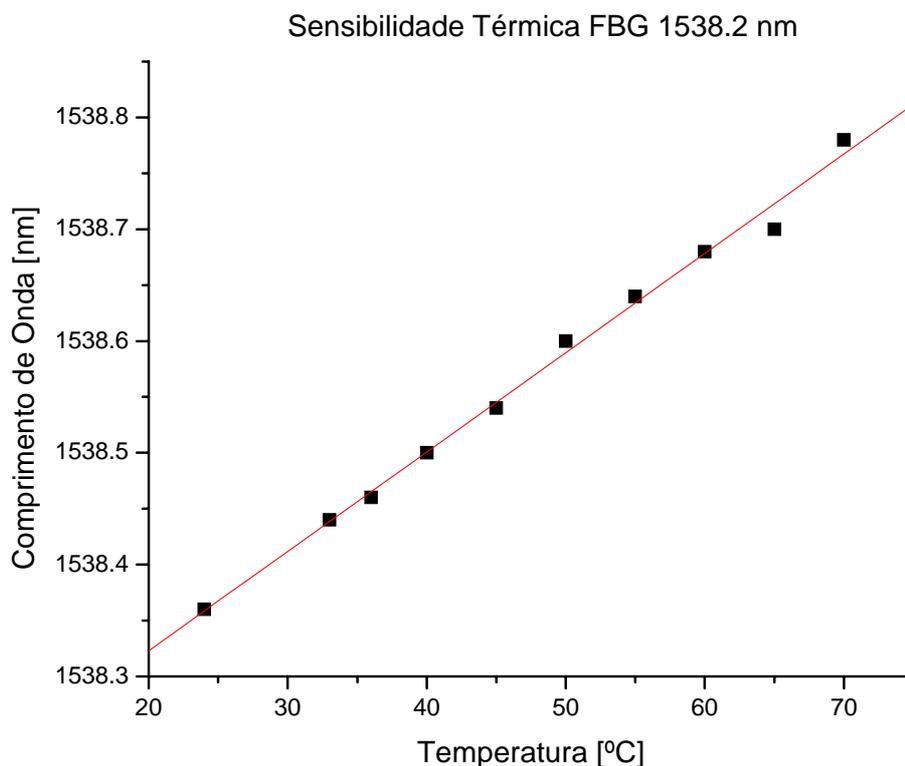


Figura 5.3.2: Deslocamento Térmico da FBG 1538,2.

Neste ensaio foi medida uma sensibilidade térmica de 9,767 pm/°C. Essa sensibilidade foi obtida através do deslocamento do pico do espectro refletido da FBG pela temperatura. A sensibilidade, como já visto anteriormente, depende de alguns fatores, como o tipo de fibra utilizada, o dopante e sua quantidade presente na fibra.

O resultado da regressão linear realizada com os pontos do gráfico apresentado na Figura 5.3.2 é mostrado na Tabela 5.3.1

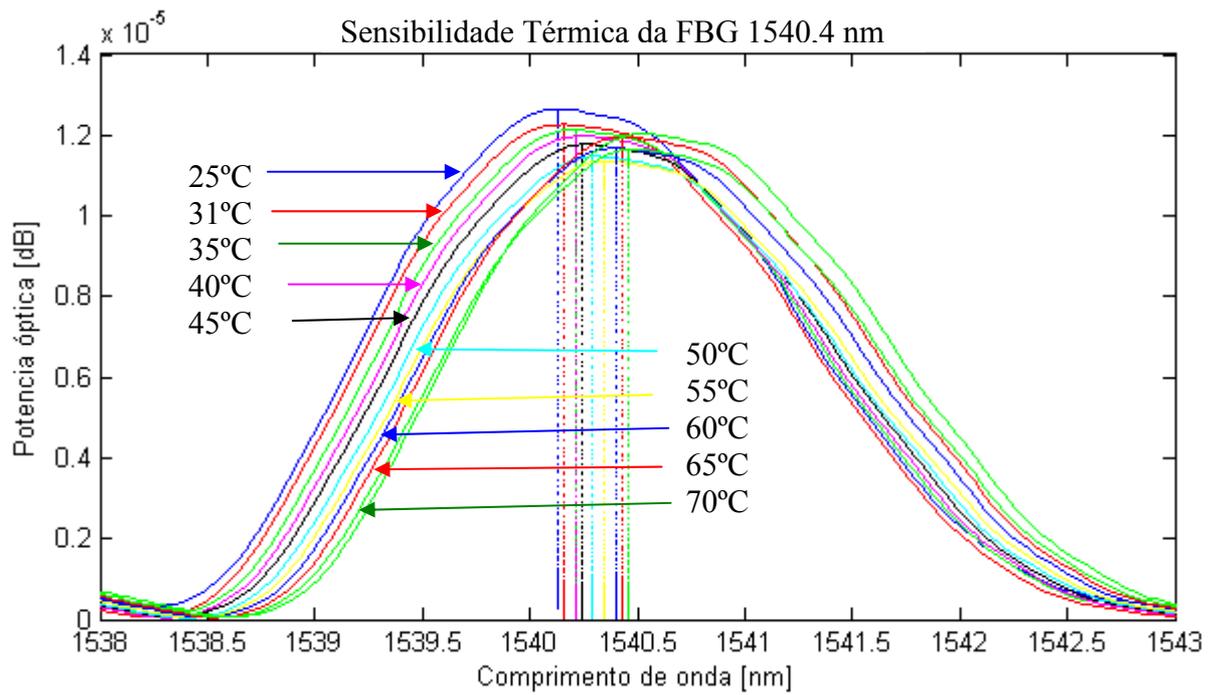
**Tabela 5.5.1: Regressão linear para os dados da Figura 4.3.1. ( $Y=A+B*X$ ).**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Erro</b>	
A	1538.14529	0.01179	
B	0.00889	2.36498E-4	
R	SD	N	P
0.99718	0.01054	10	<0.0001

#### **5.4. FBG Filtro 1540,4 nm**

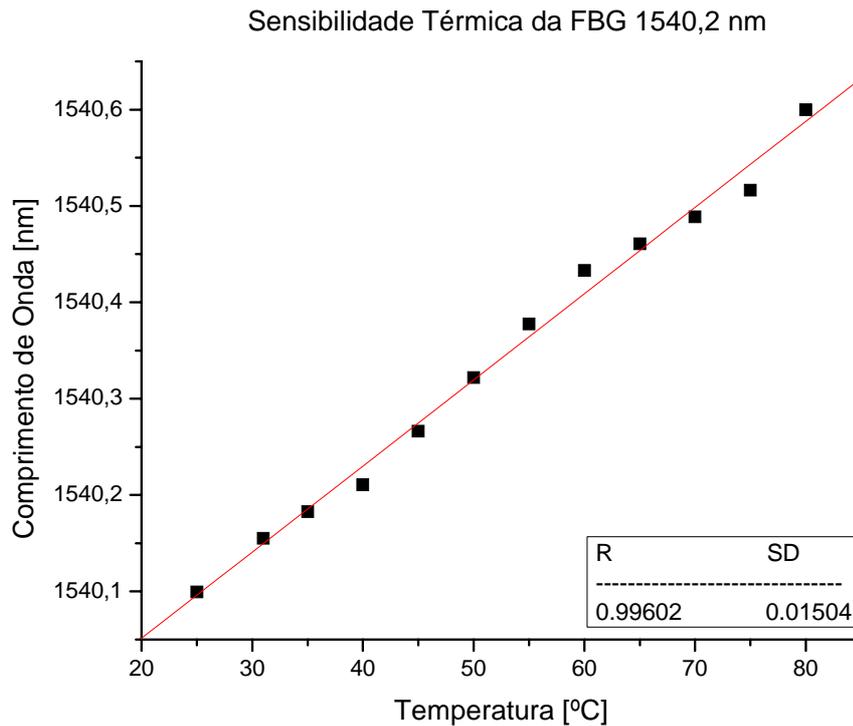
Na técnica utilizada para a demodulação da FBG sensora é utilizada outra FBG, denominada como filtro fixo. Nesta técnica é necessária uma temperatura constante e livre de tensões mecânicas que possam alterar o espectro da rede. No entanto, esta também tem a sua resposta suscetível a perturbações externas. Para tal possibilidade foi também determinada a sensibilidade térmica desta.

Um gráfico do espectro da rede submetida a uma variação térmica é mostrado na Figura 5.4.1. A temperatura foi variada de 25°C até 70°C.



**Figura 5.4.1: Deslocamento espectral da FBG 1540,4 nm, devido à variação térmica.**

O deslocamento do pico da FBG pela temperatura é mostrado na Figura 5.4.2. Esse deslocamento é utilizado para determinar a sensibilidade da FBG 1540,4 que é utilizada como filtro refletivo.



**Figura 5.4.2: Deslocamento espectral da FBG 1540,4 nm pela temperatura.**

No ensaio térmico realizado para caracterização de sensibilidade da rede foi encontrado um valor de 8,340 nm/°C.

## 5.5. Ensaio Térmico Experimental

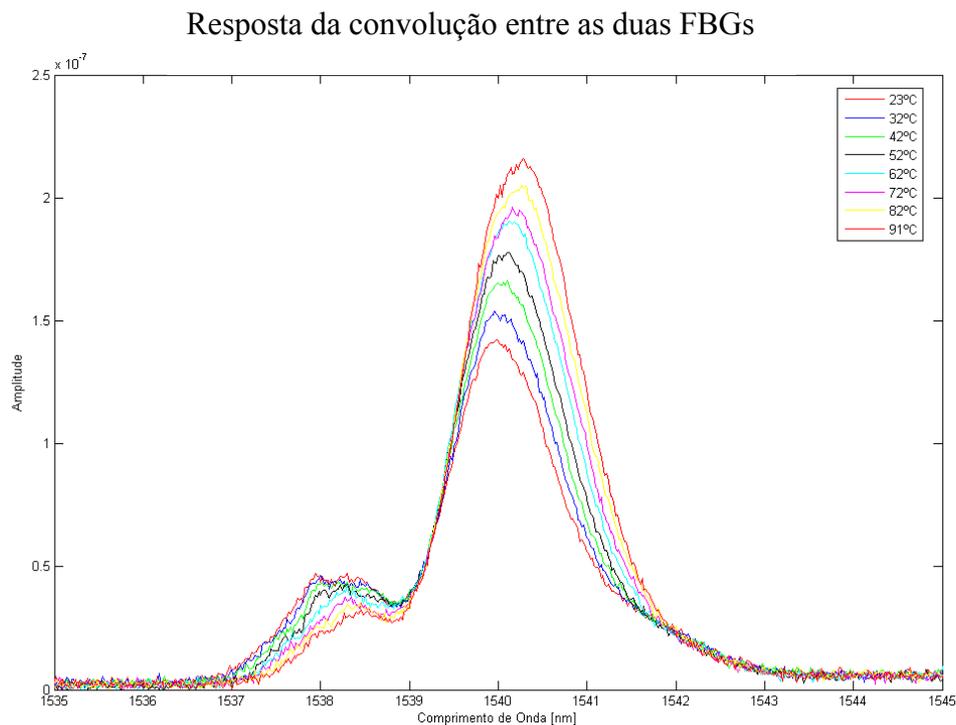
Neste item é descrito os experimentos realizados. A simulação serve de parâmetro teórico, experimental, justificativa, validação e motivação para o experimento.

Para um melhor embasamento serão realizados ensaios experimentais com um analisador de espectro óptico e um medidor de potência óptica, levando em consideração a diferença existente entre os dois equipamentos. O primeiro é utilizado para fazer uma análise espectral ou caracterização e é um equipamento de alto custo utilizado em laboratório. O segundo é um equipamento menos preciso espectralmente,

contudo com alta precisão de intensidade óptica, medindo o total da potência óptica incidente e resolução de 1 pW. Este último equipamento é creditado pelo primeiro que caracterizou espectralmente a luz medida, garantindo que há somente o espectro de interesse, conforme pode ser observado na Figura 5.5.1.

### 5.5.1. Medida com o Analisador de Espectro Óptico

O resultado da convolução das duas FBGs é mostrado na Figura 5.5.1. Este resultado mostra um aumento do pico do espectro devido ao incremento da temperatura, similar ao obtido na seção 5.2 de simulação, mais especificamente aos resultados mostrados na Figura 5.2.3.



**Figura 5.5.1: Resposta da convolução entre as duas FBGs em função da temperatura.**

Com a finalidade de quantizar o incremento da potência óptica devido ao incremento da temperatura, foi calculado o valor da área (por integração) de cada e os

resultados dessas integrais foram plotados com suas respectivas temperaturas. Na Figura 5.5.2 é mostrado a regressão linear da média de 3 medidas realizadas com o analisador de espectro óptico.

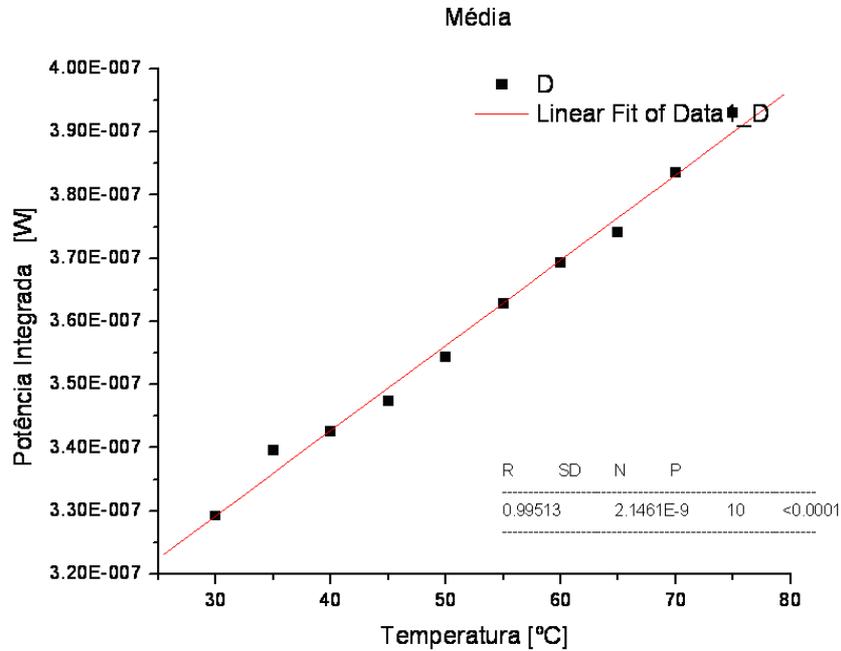


Figura 5.5.2: Regressão linear da integral média dos resultados obtidos no OSA.

Na Tabela 5.5.1 são mostrados os resultados da regressão linear realizada nos pontos da Figura 5.5.2.

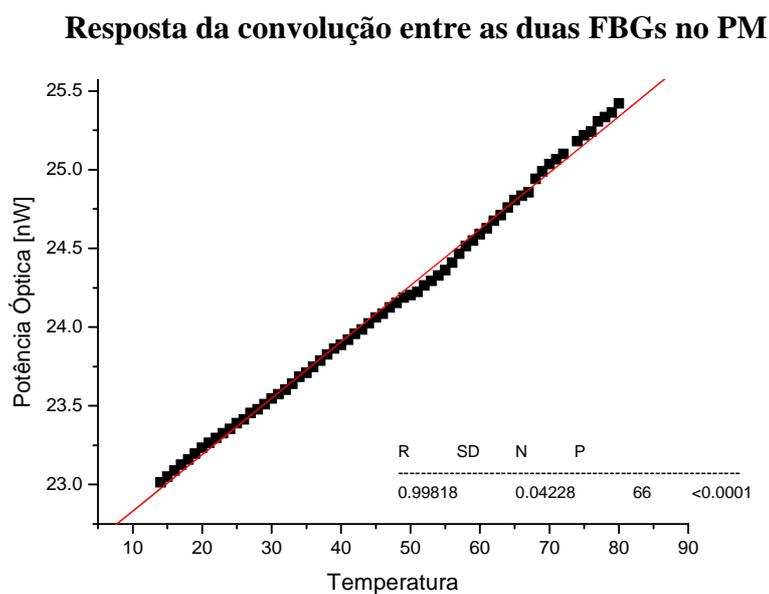
Tabela 5.5.1: Regressão linear para os dados da Figura 4.9 ( $Y=A+B*X$ ).

Parâmetro	Valor	Erro
A	2.88747E-7	2.57207E-9
B	1.34965E-9	4.72555E-11
R	SD	N
0.99513	2.1461E-9	10
		P
		<0.0001

## 5.5.2. Medida com o Power Meter

Uma vantagem do PM é que o resultado é mostrado diretamente no display já integrado dando uma medida imediata e permitindo a realização de medidas de parâmetros dinâmicos, enquanto o OSA faz uma varredura de todo o espectro selecionado o que leva certo tempo e pode dar uma variação da leitura de todo o espectro selecionado, fato que o limita a realização de medidas de grandezas estáticas.

Os resultados obtidos a partir do primeiro ensaio realizado no PM e uma reta de ajuste linear, obtida a partir da regressão linear, são mostrados na Figura 5.5.3.



**Figura 5.5.3: Potência Óptica refletida pelas FBGs em função da temperatura.**

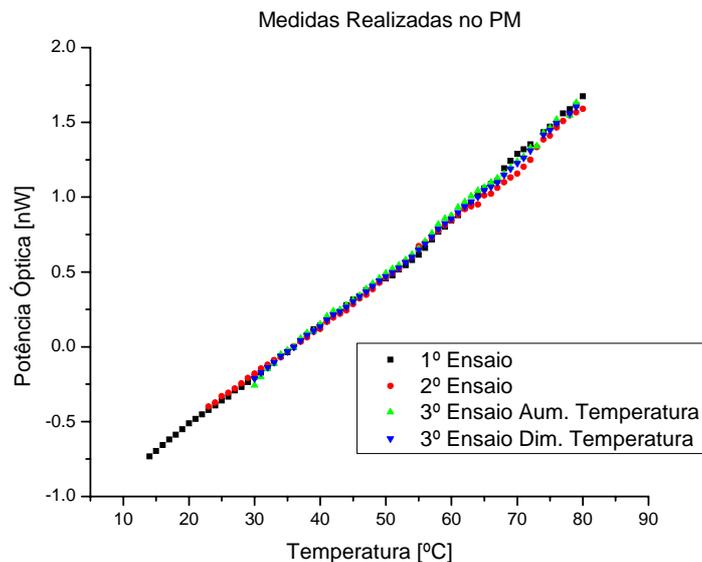
Na figura acima é possível observar a ótima relação linear entre os pontos obtidos, em função da temperatura, e baixa dispersão do mesmo.

Na Tabela 5.5.3 são mostrados os resultados da regressão linear realizada nos pontos da Figura 5.10.

**Tabela 5.5.3: Regressão linear para os dados da Figura 4.10 ( $Y=A+B*X$ ).**

Parâmetro	Valor	Erro	
A	22.47045	0.01365	
B	0.03587	2.70833E-4	
R	SD	N	P
0.99818	0.04228	66	<0.0001

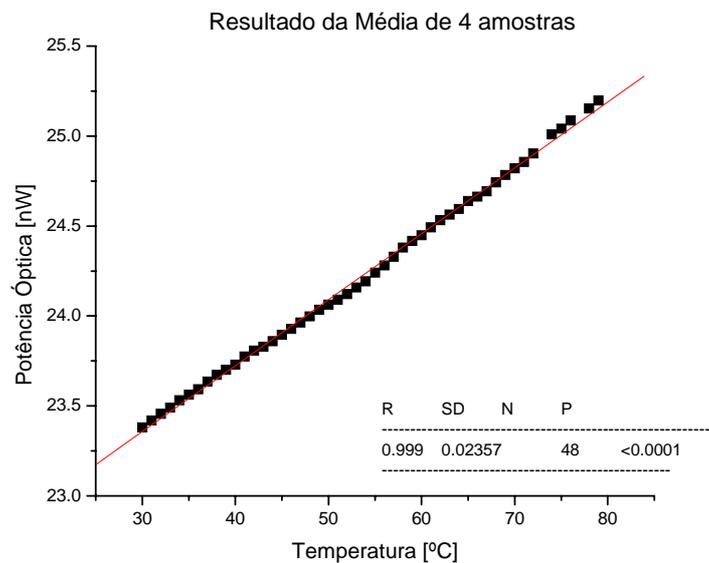
Na Figura 5.5.4 são mostrados os dados obtidos, de 4 medidas, no PM. Neste gráfico é possível observar a boa linearidade da curva, a repetibilidade, a alta correlação entre os pontos e a inexistência de histerese. No gráfico são mostrados os dados obtidos em 3 ensaios realizados. As duas primeiras variações foram somente de aquecimento, enquanto a terceira foi de aquecimento seguida de desaquecimento até a temperatura ambiente, para verificação de histerese.



**Figura 5.5.4: Medidas da Potência Óptica refletida pelas FBGs em função da temperatura.**

Os dados da Figura 5.5.4 foram ajustados matematicamente de maneira a corrigir o erro sistemático apresentado originalmente. Tal erro é proveniente da variação de potência óptica da fonte, o compensação do erro possibilitou a melhor comparação entre as diferentes amostras. Este artifício é eliminado com a utilização de um medidor de potência óptica com dois canais, um canal para medição do sinal e outro como canal de referência.

O resultado da média dos três ensaios térmicos realizados é mostrado na Figura 5.5.5. Esta é uma média dos pontos mostrados na Figura 5.5.4, totalizando 4 medidas.



**Figura 5.5.5: Potência Óptica Média refletida pelas FBGs em função da temperatura.**

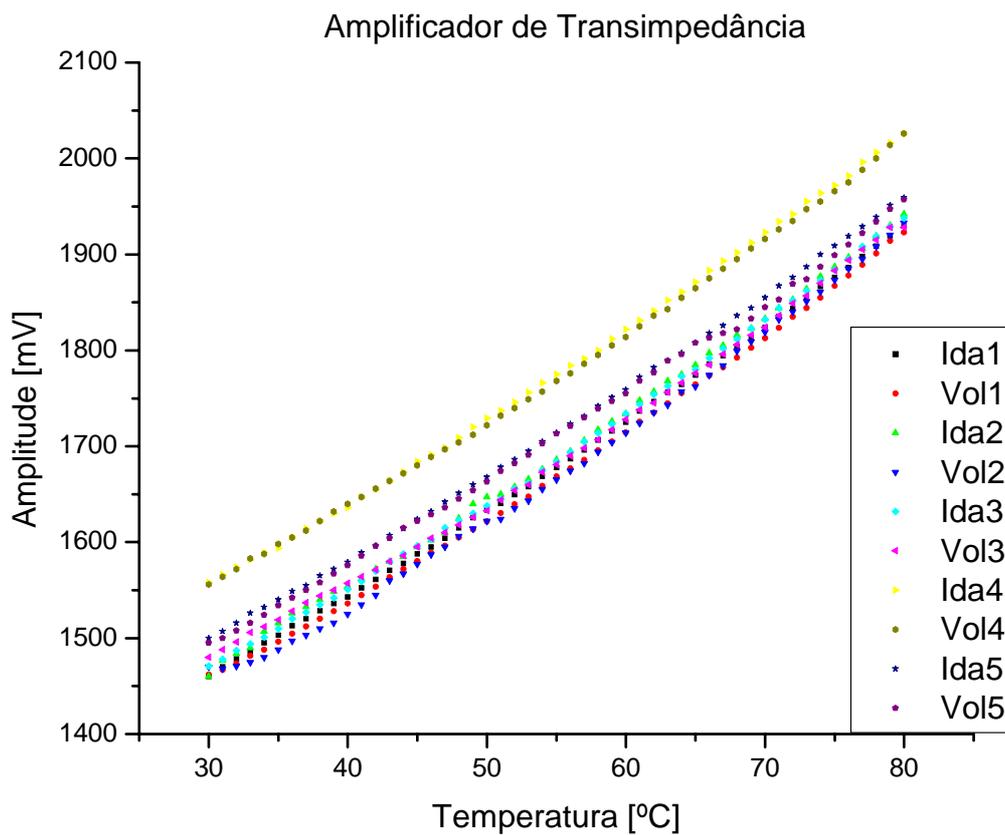
Na Tabela 5.5.4 é mostrado os resultados da regressão linear realizada nos pontos da Figura 5.5.5.

**Tabela 5.5.4: Regressão linear para os dados da Figura 4.12 ( $Y=A+B*X$ ).**

Parâmetro		Valor	Erro
A		22.25859	0.01339
B		0.03663	2.41408E-4
R	SD	N	P
0.999	0.02357	48	<0.0001

### 5.5.3. Medida com o Amplificador de transimpedância

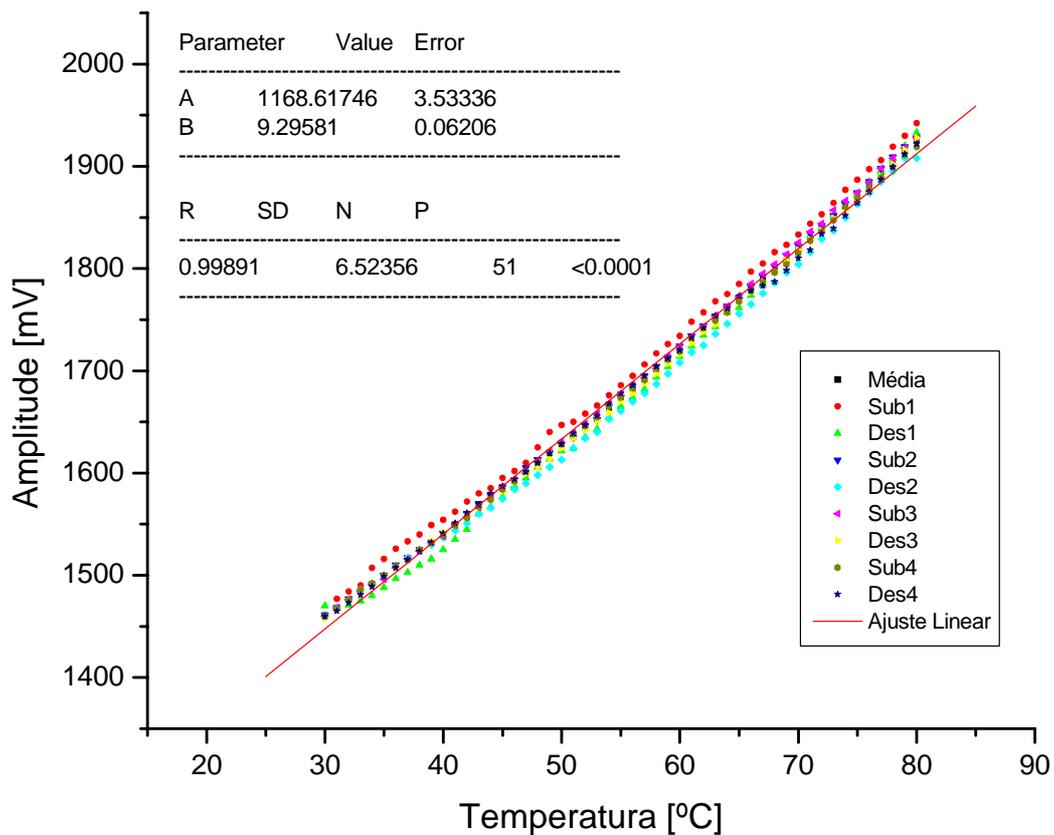
Um gráfico com os pontos obtidos no amplificador de transimpedância é mostrado na Figura 5.5.6. Neste, também, pode ser observada a ausência de histerese entre as medidas de incremento (Ida) e decréscimo (Vol) da temperatura. No entanto é visível a existência de um erro sistemático entre as curvas, tal erro é devido às flutuações de potência da fonte óptica que pode influenciar diretamente no valor da medida.



**Figura 5.5.6: Potência Óptica em função da temperatura.**

O erro sistemático apresentado é corrigido de modo a ser observado somente o erro aleatório da amostra. Um gráfico com essa correção é mostrado na Figura 5.5.7. Neste há apenas o erro aleatório das medidas.

## Resposta do Amplificador de Transimpedância



**Figura 5.5.7: Potência Óptica em função da temperatura com correção do erro sistemático.**

É possível observar na Figura 5.5.7 os parâmetros calculados pelo programa *OriginPro 7.5* pelo método de regressão linear. Através destas medidas foi calculada a sensibilidade térmica média do sensor que ficou em 9,30 mV/°C.

### 5.6. Análise dos dados por Distribuição t de “Student”

Medidas de grande amostragem ( $N > 30$ ) podem ser tratadas estatisticamente aproximado-as como uma distribuição normal, mas para  $n \rightarrow \infty$  torna-se normal. No entanto, para pequenas amostras ( $N < 30$ ) faz se necessária a introdução de modificações convenientes, pela teoria de pequenas amostras ou teoria exata de amostragem (SPIEGEL, 1971).

Neste seção, os dados apresentados na seção 5.5.3 são tratados estatisticamente pela distribuição t de *student* que é definida por:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{s} \sqrt{N-1} \quad [5.1]$$

onde  $\bar{X}$  é a média amostral,  $\mu$  é a media extraída de uma população normal, N é o número de amostras e s é o desvio padrão. Este último é considerado o calculado pela regressão linear no programa *OriginPro 7.5*, conforme pode ser observado na Figura 5.5.7.

Pela tabela de t para um intervalo de confiança de 95% bilateral e com 10 amostras,  $t_{0,975}$  é igual a 2,26 e é calculado pela equação:

$$ic = \bar{X} \pm t_{0,975} \frac{s}{\sqrt{N-1}} \quad [5.2]$$

Logo,

$$ic = \bar{X} \pm 4,91 \quad [5.3]$$

Então, o intervalo de confiança mostrado na equação 5.3 é a média das amostras  $\pm 4,91$  mV, que tem uma confiabilidade de 95% de conter a média verdadeira.

Para o cálculo da confiabilidade de 95% é utilizado  $t_{975}$ , devido à simetria da curva, pois a não confiabilidade total é de 5%, ou seja, 2,5% para cada lado.

Para uma confiabilidade de 99% bilateral utiliza se  $t_{0,995} = 3,25$  e substitui-se na equação 5.2. Logo,

$$ic = \bar{X} \pm 7,06 \quad [5.5]$$

Então, o intervalo de confiança  $\pm 7,06$  mV tem uma confiabilidade de 99% de conter a média verdadeira.

Se levado em consideração o resultado do último cálculo, com uma confiabilidade de 95%, para conversão do intervalo de confiança para temperatura teria um valor de  $\pm 0,53$  °C, e para uma confiabilidade de 99% um valor de  $\pm 0,76$  °C.

### 5.7. Calibração do Termopar Salvterm 1200K

O resultado proveniente da calibração do Termopar salvterm 1200 K é apresentado no gráfico da Figura 5.7.1. Este foi plotado no programa *Origin*. Os pontos em preto são relativos ao aumento da temperatura, os vermelhos à diminuição e os verdes são os pontos idéias (ou esperados).

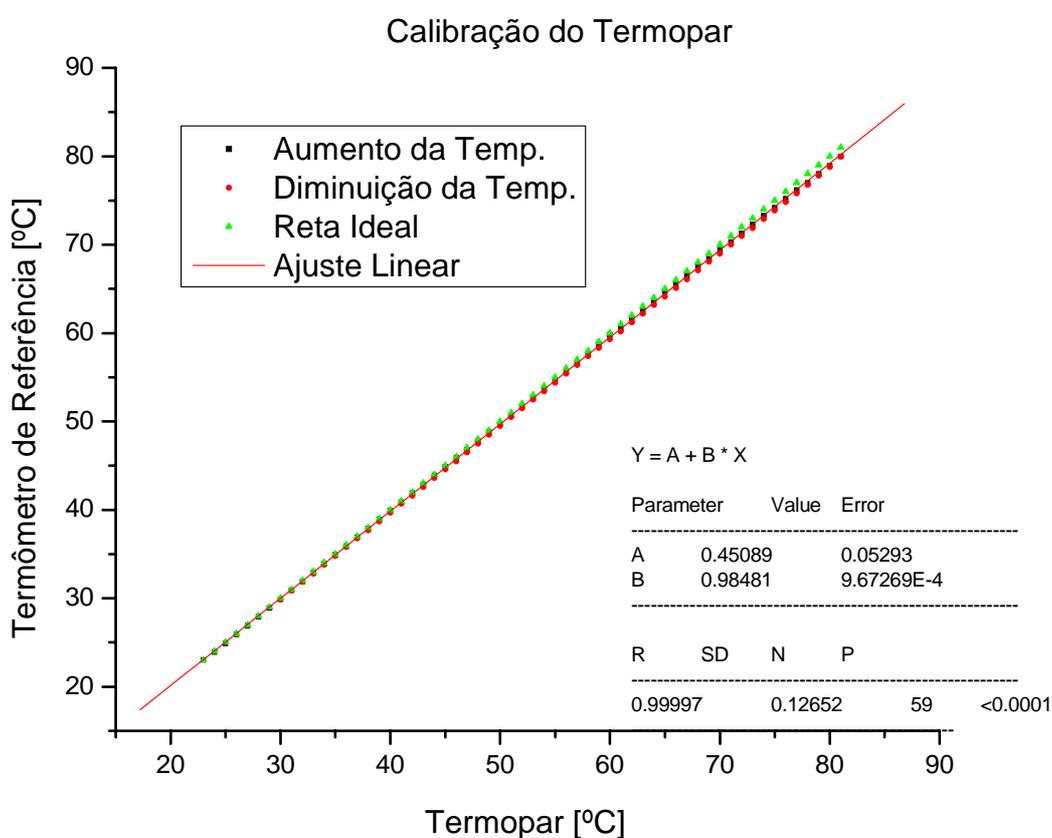


Figura 5.7.1: Resultado da calibração do Termopar Salvterm 1200K.

O resultado obtido desta calibração mostra a não necessidade de ajuste dos valores em função do termômetro PT100 utilizado como padrão para a calibração, pois para baixas temperaturas não há desvio entre o instrumento calibrado e o padrão. Entretanto, é possível observar uma pequena diferença do coeficiente angular do medido para o padrão, então há uma pequena variação desvio para altas temperaturas. Ainda é possível observar a não histerese da medida.

A curva de regressão linear foi traçada em função dos pontos de aumento de temperatura.

## CAPITULO VI

### 6. Conclusões

Na parte de simulação experimental não foram criadas curvas gaussianas e nenhum ponto fictício. Foram utilizados os dados reais da caracterização das Redes de Bragg. Nesta parte do trabalho a simulação ilustra e explana bem o fenômeno de convolução entre as duas FBGs. A convolução destas redes resulta em um espectro que é proporcional à interseção entre elas. Por último, o espectro tem um valor resultante da área, diretamente proporcional à temperatura do sensor, apresentou uma excelente resposta linear, com alta correlação entre os pontos e baixíssima dispersão. Assim, provando a viabilidade do método.

Na parte experimental com o OSA, o resultado obtido é a resposta espectral da convolução das duas redes e é proporcional à temperatura. Desta resposta é calculada a intensidade óptica e plotado um novo gráfico de intensidade óptica em função da temperatura. Em comparação aos resultados obtidos na parte de simulação, essa parte experimental apresentou respostas satisfatórias e, em potência óptica e espectralmente, de acordo com o simulado, com boa linearidade e correlação entre os pontos obtidos.

No experimento com o PM, o resultado é obtido diretamente pelo equipamento e é um valor dado pela intensidade óptica em função da temperatura. Com estes valores foi possível construir um gráfico, onde foi verificada a linearidade dos pontos e alto grau de correlação entre os pontos e também baixíssima dispersão.

Os resultados obtidos na simulação serviram para demonstrar a interação entre as duas redes e estimar a curva esperada. Por conseguinte, validar o espectro obtido no OSA em função da temperatura, o parâmetro validado foi integrado afim de se obter um valor absoluto em função da temperatura, que por sua vez serviu de parâmetro para validação dos dados obtidos no PM. Neste último o valor obtido é o absoluto em função da temperatura.

Por último foi utilizado o fotodetector 818-IR da *Newport* com um amplificador de transimpedância que fornece como saída um valor absoluto, medido por um multímetro. No entanto, devido ao ruído inerente do amplificador proveniente do alto ganho de transimpedância, nesse experimento obteve-se uma maior dispersão dos pontos em comparação ao experimento com o medidor de Potência Óptica (P.M.).

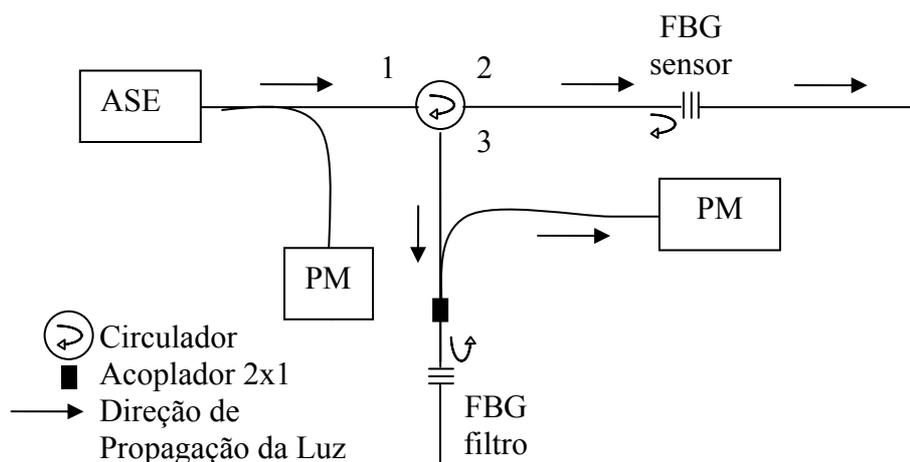
Após analisar os resultados é possível concluir que a técnica é eficiente, viável, e possibilita a demodulação de sistemas com redes de Bragg em fibra com sistemas ópticos de menor custo, com um tempo de resposta menor, quando comparado ao experimento com o OSA, e com boa repetibilidade.

No tratamento estatístico com t de “*student*” obteve-se um intervalo de confiança de  $\pm 0,53$  °C para uma confiabilidade de 95% e  $\pm 0,76$  °C para 99%. Neste caso, dependendo da aplicação, são resultados que extrapolam a resolução necessária, pois a maior parte das aplicações requerem resolução de mais ou menos 1°C.

A linearidade e a baixa dispersão dos resultados obtidos facilitam o processamento do sinal proveniente do sensor. Estas características permitem que sejam utilizados equipamentos menos complexos e mais baratos do que os utilizados atualmente para demodulação de Redes de Bragg em Fibra por comprimento de onda, como o amplificador utilizado.

Uma desvantagem deste método é que a faixa espectral medida é inversamente proporcional à resolução. Mas neste trabalho a faixa de temperatura utilizada foi da temperatura ambiente em laboratório (23°C) à proximidade da ebulição da água (23°C), utilizado no ensaio térmico. Assim, esse trabalho comprovou que esta técnica supri bem esse range de temperatura e dependendo da condições essa faixa pode ser alterada.

Em relação ao sistema óptico desenvolvido foram verificadas histereses nas medidas do sistema intensidade óptica na fonte. Para resolver esse problema é necessário um sinal de referência que poderia ser montado como ilustrado na Figura 6.1. Uma outra alternativa da proposta é o desenvolvimento de um amplificador de transimpedância de dois canais, sendo um deles o canal de referência.

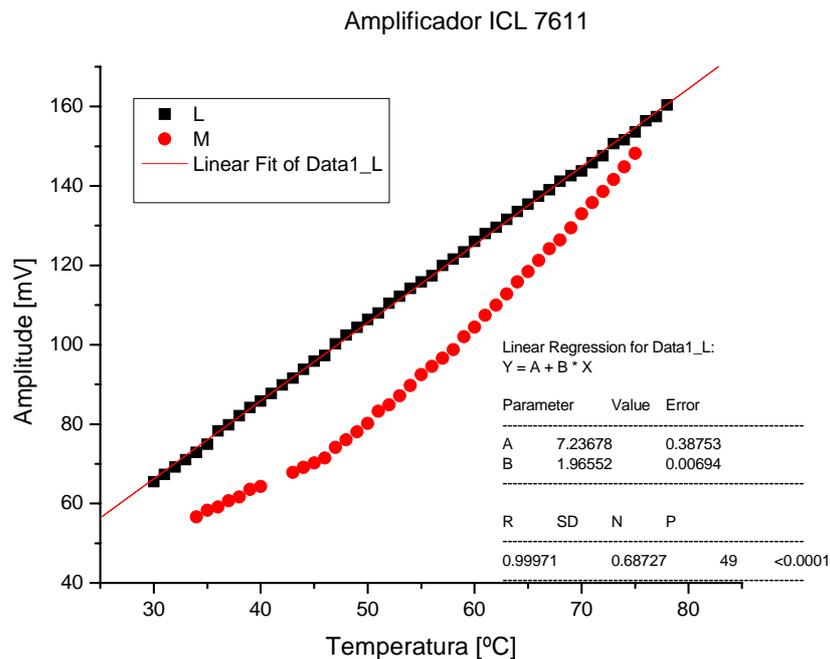


**Figura 6.1: Arranjo experimental com canal de referência.**

Na Figura 6.1 é adicionado mais um medidor de Potência óptica PM e um acoplador para a referência. Tal configuração não pode ser utilizada no trabalho realizado devido à existência de somente um PM de um canal. Contudo poderia ser usado um *Power Meters* de dois canais ou dois destes equipamentos.

Apesar da técnica escolhida já ter sido utilizada em outros trabalhos, esta ainda não havia sido aplicada em nenhum trabalho desenvolvido no laboratório de instrumentação e fotônica da COPPE/UFRJ. Assim, levando em consideração este fato, a mesma agrega conhecimento à instituição. Contudo, a técnica de demodulação por comprimento de onda que já havia sido estudada e desenvolvida na instituição, com trabalhos já publicados.

Neste trabalho foi utilizado inicialmente o amplificador de transimpedância com o amplificador operacional ICL 7611. A resposta no aumento da temperatura foi uma reta com boa relação entre os pontos, mas a resposta de diminuição da temperatura apresentou uma histerese que, foi atribuído ao amplificador operacional utilizado o ICL7611. Pois, somente com a simples substituição deste, o problema foi resolvido. O gráfico proveniente deste ensaio térmico é mostrado na Figura 6.2, Onde os pontos de L representam um aumento de temperatura e M diminuição.



**Figura 6.2:** Gráfico de resposta do amplificador de transimpedância utilizando o amplificador operacional ICL7611.

A histerese apresentada na diminuição de temperatura, do ensaio térmico, pode ser proveniente do alto *drift* térmico igual a  $25 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , característico do primeiro operacional utilizado. Assim, este foi substituído pelo amplificador operacional OPA111 AM com um *drift* térmico muito menor de  $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , e baixo ruído. Outros operacionais também foram avaliados. Porém, devido a baixa corrente de foi utilizado este último devido à baixa corrente de BIAS necessária neste. No sistema óptico estima-se uma corrente na faixa de  $10 \text{ pA}$  para ser amplificada.

## **CAPITULO VII**

### **7. Sugestões para trabalhos futuros**

- Montar um sistema óptico de demodulação por filtros fixos com a adição de um canal de referência a fim de contornar as flutuações de intensidade óptica da fonte;
- Utilizar FBGs com maior refletância para melhorar a intensidade do sinal do sensor;
- Automatizar a aquisição do sistema óptico.

## Referências Bibliográficas

ALLIL, R. C.; WERNECK, M. M.; OLIVEIRA, R. P.; BARBOSA, C. L., “Sensores Baseados em Redes de Bragg em Fibra Óptica para Monitoramento de Temperatura em Geradores de Potência”; *XXX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada*, São Lourenço – Brasil; 2007.

ALLIL, R. C.; WERNECK, M. M.; MACIEL, F. L.; OLIVEIRA, R. P.; NETO, J. L. S.; YUGUE, E. S.; CARVALHO, C.C.; BARBOSA, C. L.; “Sensores a Fibra Óptica para Monitoramento de Máquinas”; *XXII Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ*, Foz do Iguaçu, Brasil, Maio 2007.

BARREDA DE LA CRUZ, Hugo Angel; *Análise de Calibração de sensores a rede de Bragg em Fibra Óptica interrogados Através da Técnica de Filtros Fixos*; Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, 2007.

CANNING, J.; SOMMER, K.; ENGLUND, M.; “Fibre Gratings for high temperature sensor application”; *Measurement Science and Technology*, v. 12, p. 824-828, 2001.

CAZO, Ricardo Moreira; **Sistemas Interrogadores de Sensores Baseados em Grade de Bragg**; Dissertação de Mestrado – Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2001.

CULSHAW, Brian; DAKIN, John; *Optical Fiber Sensors: Components and Subsystems*; Volume 3, Artech House, 1996.

CULSHAW, Brian and KERSEY, Alan; “Fiber-Optic Sensing: A Historical Perspective”; *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, N° 9, Maio, 2008.

DA SILVA, Jean C. C.; ABE, Ilda; CHAVES, Roberta C.; FABRIS, José L.; PINTO, João L.; KALINOWSKI, Hypólito J.; BARBOSA, Carmen L.; “Development of Bragg grating sensors at CEFET-PR”; *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 39, 511-523, 2003.

DAVIS, M. A. and KERSEY, A. D.; “All-Fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler”; *Electronics Letters*, Vol 30, N° 1, 1994.

DAKIN, John; CULSHAW, Brian; *Optical Fiber Sensors: Principles and Components*; Volume 1, Artech House, 1988.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl; *Fundamentos de Física 4 – Ótica e Física Moderna*; 4ª Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1997.

HARTOG, Arthur H.; “A Distributed Temperature Sensor Based on Liquid-Core Optical Fibers”; *Journal of Lightwave technology*, Vol 1, n. 3, 1983.

HILL, Keneth O.; MELTZ, Gerald; “Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview”; *Journal of Lightwave Technology*, Vol 15, N° 8, 1997.

HUANG, Cen; JING, Wencai; LIU, Kun; ZHANG, Yimo; PENG, Gang-Ding; “Demodulation of Fiber Bragg Grating Sensor Using Cross-Correlation Algorithm”; *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 19, N° 9, 2007.

KATO, Carla Carvalho; *Sistema de Interrogação de Múltiplos Sensores a Rede de Bragg Utilizando Reflectometria no Domínio do Tempo e Filtros Fixos*; Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, 2004.

KERSEY, Alan D.; “A Review of Recent Developments in Fiber Optic Sensor Technology”; invited paper; *Optical Fiber Technology*, vol. 2, 291-317; 1996.

KERSEY, Alan and DANDRIDGE, Anthony; “Applications of Fiber-Optic Sensors”; *IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, Vol. 13, N° 1, 1990.

KLEMBBA, Francelli; *Sensores Ópticos a Fibra aplicados à área de petróleo*; Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2005.

KROHN, A. D.; *Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications*; 3ª Edição, Instrument Society of America; 2000.

JANG, Tae Seong; LEE, S. Seok; KIM, Y. Gil; “Surface-bonded fiber optic Sagnac sensors for ultrasound detection”; *Ultrasonics* 42, p. 837-841, 2004.

LEE, H. H.; NAM, Y. H.; LEE, D.; SHUNG, H. S.; KIM, K.; “A simple and low cost 1625 nm OTDR monitoring system for 350 Km WDM networks”; *Optical Fiber Communication Conferece, Technical Digest, OFC/NFOEC*, Vol. 4, pag. 3, 2005.

LEMAIRE, P. J.; ATKINS, R. M.; MIZRAHI, V.; REED, W. A.; “High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibres”; *Electronics Letters*, v. 29, n. 13, p. 1191-1193, 1993.

LI, Enbang e PENG, Gang-Ding; “Wavelength-encoded fiber-optic temperature sensor with ultra-high sensitivity”; *Optics Communications* 281, p. 5768-5770, 2008.

LYNN, Paul A.; *An Introduction to the Analysis and Processing of Signals*; The Macmillan Press LTD; Londres, 1980.

MALO, B.; ALBERT, J.; HILL, K. O.; BILODEAL, F.; JOHNSON, D. C.; “Effective index drift from molecular hydrogen diffusion in hydrogen-loaded optical fibres and its effect on Bragg grating fabrication”; *Electronics Letters*, v. 30, p. 442-444, 1994.

MASUDA, Y.; NAKAMURA, M.; KOMATSU, C.; FUJITA, K.; YAMAUCHI, M.; KIMURA, M.; MIZUTANI, Y.; KIMURA, S.; SUZAKI, Y.; YOCUSHI, T.; NAKAGAWA, K.; EJIMA, S.; “Wavelength Evolution of Fiber Bragg Gratings Fabricated From Hydrogen-Loaded Optical Fiber During Annealing”; *Journal of Lightwave Technology*, v. 22, n. 3, p. 934-941, 2004.

MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H.; “Formation of Bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method”; *Optics Letters*, Vol 14, N. 15, 1989.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.; *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*; 2ª Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, Rio de Janeiro, Brasil; 2003.

NUNES, L.C.S.; VALENTE, L.C.G.; BRAGA, A.M.B; “Analysis of a Demodulation System for Fiber Bragg Grating Sensors Using Two Fixed Filters”; *Optics and Lasers in Engineering* 42 529-542; 2004.

OPPENHEIM, Alan V.; WILLSKY, Alan S.; NAWAB, S. Hamid; *Signals e Systems*, Segunda edição, editora Prentice Hall;1997.

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

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*, Vol 19, n. 10, October 2001.

SPIEGEL, Murray R.; *Estatística*; Rio de Janeiro, Editora McGraw-Hill do Brasil, LTDA, 1971.

THORLABS, Inc.; disponível em <<http://www.thorlabs.com/Thorcat/13100/13122-S01.pdf>>; último acesso em 27 de Abril de 2009.

VENGSARKAR, A. M.; LEMAIRE, P. J.; JUDKINS, J. B.; BHATIA, V.; ERDOGAN, T.; SIPE, J.E.; “Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters”; *Journal of Lightwave Technology*, v. 14, p. 58-65, 1996.

WERNECK, M. M.; *Transdutores e Interfaces*; Rio de Janeiro; Livros Técnicos e Científicos Editora S. A; 1996.

XIAO, Gaozhi; MRAD, Nezh; GUO, Honglei; ZHANG, Zhiyi; YAO, Jianping; “A planar lightwave circuit based micro interrogator and its applications to the interrogation of multiplexed optical fiber Bragg grating sensors”; *Optics Communications* 281 p. 5659-5663, 2008.

YUAN, Libo and DONG, Yongtao; “Multiplexed Fiber Optic Twin-sensor Array based on a Combination of Mach-Zehnder and Michelson Interferometers”; *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Online First, doi: 10.1177/1045389X08097955; 2008

ZHAO, Yong e LIAO, Yanbiao; “Discrimination Methods and Demodulation Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors”; *Optics and Lasers in Engineering* 41, 1-18; 2004.