

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO PARANÁ

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

DISSERTAÇÃO

Apresentada ao CEFET-PR
para obtenção do título de

MESTRE EM CIÊNCIAS

por

VALMIR DE OLIVEIRA

LEITURA DE REDES DE BRAGG POR MODULAÇÃO ÓTICA

Banca examinadora:

Presidente e Orientador:

Prof. Dr. HYPOLITO JOSÉ KALINOWSKI

CEFET/PR

Examinadores:

Prof. Dr. MARIA JOSÉ PONTES

IME/RJ

Prof. Dr. JEAN CARLOS CARDOZO DA SILVA

CEFET/PR

Curitiba, 08 de abril de 2005

VALMIR DE OLIVEIRA

LEITURA DE REDES DE BRAGG POR MODULAÇÃO ÓTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de “Mestre em Ciências” – Área de concentração: Informática Industrial.

Orientador:
Prof. Dr. Hypolito José Kalinowski

CURITIBA

2005

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CEFET-PR – Unidade Curitiba

O481 Oliveira, Valmir de
Leitura de redes de Bragg por modulação ótica / Valmir de Oliveira. – Curitiba :
[s.n.], 2005.
xi, 52 f. : il. ; 30 cm

Orientador : Prof. Dr. Hypolito José Kalinowski
Dissertação (Mestrado) – CEFET-PR. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2005.
Bibliografia : f. 51-2

1. Fibras óticas. 2. Grades de Bragg. 3. Demodulação (Eletrônica). 4. Análise espectral. 5. Instrumento óticos. I. Kalinowski, Hypolito José, orient. II. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD : 621.3692
CDU : 681.7.068

DEDICATÓRIA

Em memória da minha mãe Alzira Ribeiro de Oliveira, falecida em 2003.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Hypolito José Kalinowski, pela orientação, apoio e compreensão pelo tempo restrito que pude dedicar ao projeto.

Aos colegas do Laboratório de Ótica e Optoeletrônica e em especial ao Aleksander Sade Paterno pelas muitas dicas e experimentos compartilhados.

À Capes, CNPq e Fundação Araucária pelo suporte ao laboratório.

A minha esposa Marli e aos meus filhos Henrique e João Pedro pela compreensão das muitas horas de estudo por mim dedicado.

A meu pai e aos meus irmãos que sempre apoiaram os meus estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2 – FUNDAMENTAÇÃO	5
2.1 – REDES DE BRAGG COMO SENSOR TÉRMICO E DE DEFORMAÇÃO	5
2.1.1 – Redes de Bragg em fibra ótica.....	5
2.1.2 – Redes de Bragg como sensor térmico e de deformação	6
2.2 – ATUADOR PIEZELÉTRICO.....	9
Capítulo 3 – DEMODULAÇÃO DE FBG.....	11
3.1 – TÉCNICAS DE DEMODULAÇÃO DE FBG	11
3.1.1 – Demodulação em intensidade	12
3.1.2 – Demodulação em fase de redes de Bragg com um Interferômetro Mach-Zehnder.....	14
3.1.3 – Demodulação de FBG através de filtro Fabry-Perot sintonizável.....	15
3.1.3.1 – Interferômetro de Fabry-Perot.....	15
3.1.3.2 – Técnicas de demodulação através de sintonia de filtro Fabry-Perot.....	17
Capítulo 4 – DESENVOLVIMENTO	21
4.1 – SISTEMA DE DEMODULAÇÃO.....	22

4.2 – OPERAÇÃO DO SISTEMA.....	26
4.3 – SISTEMA ELETRÔNICO.....	28
4.3.1 – Gerador de formas de onda.....	29
4.3.2 – Amplificador de alta tensão	30
4.3.3 – Circuito de foto-deteção.....	31
4.3.4 – Amplificador <i>lock-in</i>	32
4.4 – CARACTERIZAÇÃO DO PZT	34
Capítulo 5 – RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	37
5.1 – PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO.....	37
5.2 – DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO.....	39
5.3 – CONCLUSÕES.....	42
5.4 – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
APÊNDICE.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de uma rede de Bragg uniforme e os sinais incidente, refletido e transmitido [Othonos, 1999].	6
Figura 2 - Demodulador de FBG por intensidade [Melle <i>et al.</i> 1993].	13
Figura 3 - A representação do espectro de reflexão da FBG sobre a curva de resposta (transmissão) em frequência do filtro passa baixas (FPB).	13
Figura 4 - Sistema demodulador de FBG, com interferômetro Mach-Zehnder desbalanceado [Kersey <i>et al.</i> 1992].	15
Figura 5 - Demodulação de FBG por FFP para sensor único. [Kersey <i>et al.</i> 1993].	18
Figura 6 - Demodulação de FBG por FFP para vários sensores [Kersey <i>et al.</i> 1993].	19
Figura 7 - Atuador piezelétrico desenvolvido.	22
Figura 8 - Representações esquemáticas do deslocamento do espectro da FBG de referência sobre o espectro da FBG sensora em diversas condições.	25
Figura 9 - Sistema de demodulação de FBG sensora através de modulação mecânica de uma FBG de referência.	27
Figura 10 - Dispositivo para aplicar deformação longitudinal na FBG sensora, no processo de caracterização do sistema demodulador de FBG desenvolvido.	28
Figura 11 - Diagrama de blocos do sistema eletrônico.	29
Figura 12 - Sinal de <i>dither</i> aplicado ao PZT no processo de modulação da FBG referência.	31
Figura 13 - Diagrama esquemático do circuito de foto-deteção.	31
Figura 14 - Amplificador <i>lock-in</i> , onde $r(t)$ é o sinal de referência, $s(t)$ é o sinal a ser processado, o qual contém ruído $n(t)$ e $v_p(t)$ é a tensão CC de saída.	32
Figura 15 - Arranjo básico para um sistema experimental com regeneração de sinal por amplificador <i>lock-in</i> [Meade, 1982].	33
Figura 16 - Deformação do PZT em função da tensão CC aplicada.	35

- Figura 17 - Variação no comprimento de onda central de reflexão da FBG sensora em função da deformação aplicada com a reta de ajuste determinada (medida realizadas com o OSA). **38**
- Figura 18 - A tensão de saída do *lock-in* em função do comprimento de onda e a integral da tensão de saída do *lock-in*. **40**
- Figura 19 a) Comparação entre o espectro da FBG referência e a integração da saída do *lock-in*. b) Espectro da FBG sensora não perturbada, medido com o OSA. **41**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente contínua
CI	Circuito integrado
F	<i>Finesse</i>
FBG	Rede de Bragg em fibra
FFP	Filtro Fabry-Perot em fibra
FPB	Filtro passa baixas
FSR	Faixa espectral livre
Gbps	Gigabits por segundo
OSA	Analisador de espectro ótico
PZT	Piezelétrico
SFP	Filtro Fabry-Perot de varredura
S/R	Relação sinal/ruído
WDM	<i>Wavelength division multiplexing</i>

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um sistema de leitura de redes de Bragg derivado da técnica por filtro Fabry-Perot sintonizável. A técnica apresentada é implementada através de um sistema atuador piezelétrico que modula mecanicamente uma rede de Bragg de referência, com seu espectro de reflexão convoluido com o espectro de reflexão de uma rede sensora.

A técnica desenvolvida apresenta vantagens em relação ao processo original por ter implementação mais simples, menor custo e melhor discriminação de posição espectral.

ABSTRACT

This work presents a process to detect Bragg grating spectra based on the tunable Fabry Perot filter technique. The apparatus is assembled with a piezoelectric actuator that mechanically modulates a reference Bragg grating. The spectrum of that grating is convoluted with the spectrum of the sensor during a sweep. The device presents some advantages as, eg., simplicity, lower cost and better discrimination for the spectral position of the reflected band.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da tecnologia de fibras óticas, uma gama enorme de novos equipamentos e dispositivos foram criados. No campo das telecomunicações, houve um grande aumento na velocidade de transmissão de dados com taxas de erro de *bits* muito baixas em relação aos sistemas anteriormente utilizados.

Redes de comunicações óticas permitem alta capacidade de interconexão entre produtores e consumidores de informação das mais diferentes localidades ao redor do mundo [Othonos, 1999]. Isto incrementou a demanda por largura de banda, resultando em novos serviços e aplicações que estimularam inovações nas indústrias de comunicações óticas. Isso inclui a fascinante possibilidade de conexão direta em qualquer rede operando em gigabits por segundo (Gbps) em um enlace totalmente ótico. A alocação de canais de comunicação através da divisão do espectro de frequências no domínio ótico estabelece a multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), a qual é um método convencional de aumento da capacidade do canal e que permite a implementação de outras funções na rede ótica. Existem comercialmente sistemas de comunicação ótica WDM operando ponto-a-ponto na região de comprimento de onda de 1550 nm, contendo 8, 16 ou mais canais, cada um transportando informação em taxas de 2,5 a 10 Gbps. Futuramente o tradicional enlace ponto-a-ponto será suplantado por redes que incluem inserção/retirada ótico ou capacidade de *cross-connect*. Acompanhando esta evolução, as redes óticas de comunicação estão dando ênfase às transmissões WDM e proliferam dispositivos óticos novos, muitos baseados em redes de Bragg em fibra (FBG).

A rede de Bragg em fibra surge como um importante componente para uma variedade de aplicações óticas. Sua propriedade de filtragem única e versatilidade para dispositivos em fibra é ilustrada pelo seu uso em estabilizadores de comprimento de onda para *lasers*, *lasers* em fibra, amplificadores de bombeamento remoto, amplificadores Raman, conjugador de fase, conversor de comprimento de onda, redes óticas passivas, multiplexadores e demultiplexadores por divisão de comprimento de onda, multiplexadores inserção/retirada, compensadores de dispersão e equalizadores de ganho [Othonos, 1999].

Além de todas as aplicações e vantagens apresentadas pelas redes de Bragg no campo das comunicações óticas, tem se difundido atualmente o uso das FBG's como sensores. De um modo geral, os sensores a fibra apresentam uma série de vantagens, incluindo sensibilidade similar a existente em sensores convencionais, geometria versátil; com uma tecnologia genérica o dispositivo é sensível a muitas perturbações físicas (acústica, magnética, temperatura, rotação, deformação e outras). A sua natureza dielétrica permite seu uso em alta tensão, ambientes eletricamente ruidosos, altas temperaturas, corrosivos e em outras condições agressivas para sensores convencionais. Além de apresentar inerente compatibilidade com sistemas de telemetria através de fibra ótica e ter custo potencialmente baixo [Giallorenzi *et al.* 1982].

Do ponto de vista da instrumentação, uma vantagem do uso da FBG como transdutor é o fato de que a informação sobre o agente que perturba a rede está codificada espectralmente [Hill and Meltz, 1997]. Isso permite determinar a magnitude do agente perturbador da FBG sem sistema de referência para a potência ótica, que necessitaria calibração periódica. Outra vantagem é a possibilidade de multiplexar em comprimento de onda um grande número de sensores, permitindo medições multi-pontuais. A multiplexação

permite monitorar estruturas com grandes dimensões como, por exemplo, cabos de transmissão de energia elétrica, oleodutos, cascos de navios e outras.

Na presente dissertação foi desenvolvido um sistema de leitura de redes de Bragg, similar a uma técnica pseudo-heteródina proposta por [Ferreira *et al.* 1997], porém baseado na técnica desenvolvida por Kersey *et al.* [1993] que utiliza a demodulação por filtro Fabry-Perot sintonizável.

O sistema desenvolvido utiliza um atuador piezelétrico (PZT) modulando uma rede de Bragg de referência para fazer a convolução entre os espectros da FBG sensora e a FBG de referência e, através da técnica da primeira derivada, obter uma tensão CC proporcional ao grau de superposição espectral das duas FBG's.

O sistema com PZT e rede apresenta muitas vantagens em relação ao com filtro Fabry-Perot, entre as quais o menor custo e a maior simplicidade do sistema; maior estabilidade térmica relativa devido às dimensões do PZT, as quais são muito maiores do que a cavidade ressonante do filtro Fabry-Perot, assim pequenas variações térmicas alteram proporcionalmente mais as dimensões da cavidade do Fabry-Perot do que o sistema com PZT e rede; o filtro Fabry-Perot tem uma região operacional estreita enquanto que no sistema com PZT a dependência é exclusiva da rede varrida, assim pode-se operar praticamente em qualquer comprimento de onda. Em relação ao sistema proposto por Ferreira *et al.* [1997], o sistema desta dissertação permite efetuar um processo de multiplexação de sensores e sintonia prévia das redes, as quais não precisam ser idênticas.

O capítulo 2 apresenta as redes de Bragg e sua resposta como sensor de deformação e temperatura. No capítulo 3 são apresentadas algumas das técnicas para a demodulação de redes de Bragg em fibra ótica. O desenvolvimento do sistema de demodulação e a eletrônica envolvida, bem como a operação do sistema e a caracterização do PZT são

apresentados no capítulo 4. No capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais, as conclusões dos resultados obtidos e as propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO

Este capítulo apresenta alguns conceitos das redes de Bragg em fibra ótica, bem como as expressões matemáticas que regem o desvio no comprimento de onda da rede ao sofrer perturbação por temperatura e deformação. Traz também algumas características relevantes dos atuadores piezelétricos.

2.1 REDES DE BRAGG COMO SENSOR TÉRMICO E DE DEFORMAÇÃO

2.1.1 Redes de Bragg em fibra ótica

A rede de Bragg em fibra ótica (FBG) é a alteração periódica do índice de refração do núcleo da fibra, como ilustrado na figura 1. A FBG apresenta a característica de acoplar a luz incidente do modo propagante para o modo contra-propagante em uma faixa estreita de comprimentos de onda. A faixa de comprimentos de onda refletidos pela rede depende do índice de refração efetivo (n_{eff}) e do período (Λ) da rede.

Ao incidir luz com espectro de banda larga em uma fibra ótica que contém uma rede de Bragg, ocorre a reflexão através do efeito de espalhamento coerente e sucessivo nas interfaces que separam as regiões com índices de refração diferentes. O comprimento de onda central do espectro de reflexão ocorre próximo ao comprimento de onda de Bragg (λ_B) da rede, o qual é dado por [Hill *et al.* 1997]:

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \tag{1}$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo na fibra ótica e Λ é o período da modulação de índice.

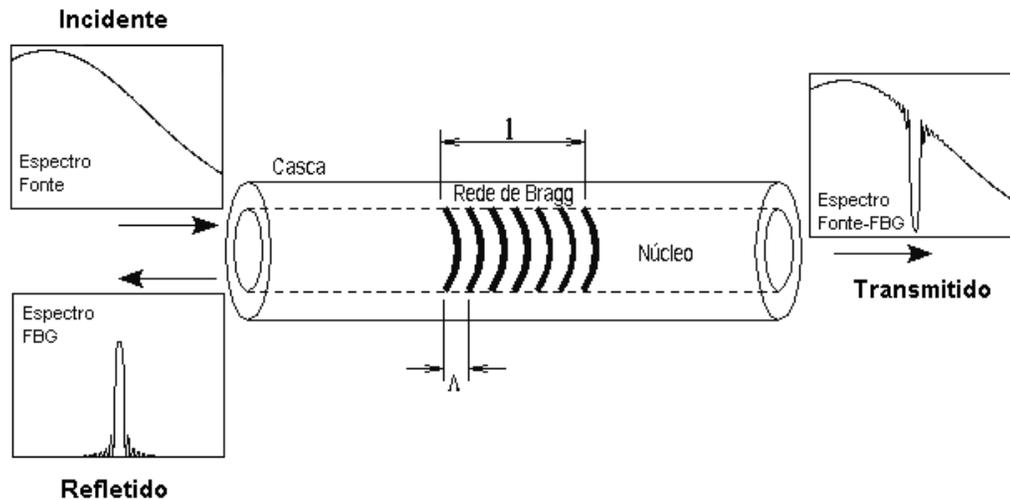


Figura 1 - Desenho esquemático de uma rede de Bragg uniforme e os sinais incidente, refletido e transmitido [Othonos, 1999].

2.1.2 Redes de Bragg como sensor térmico e de deformação

Qualquer perturbação que altere o índice de refração ou o período da FBG altera o comprimento de onda de Bragg, assim, pode-se medir um determinado parâmetro através da variação do pico espectral da luz refletida pela rede de Bragg. Com isso a FBG é um sensor intrínseco para temperatura, deformação e pressão, já que essas perturbações podem alterar o índice de refração ou o seu período [Kersey *et al.* 1997]. O comprimento de onda de reflexão central da FBG é dependente da característica da rede e assim, ao submeter a rede a um dos parâmetros a serem medidos, obtém-se um desvio no comprimento de onda de Bragg, proporcional à grandeza a ser mensurada.

A medida de um desvio de temperatura, ΔT , tem como correspondente um desvio de comprimento de onda $\Delta\lambda_{BT}$, expresso por [Kersey *et al.* 1997]:

$$\Delta\lambda_{BT} = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

onde α é o coeficiente de expansão térmica do material da fibra, e ξ é o coeficiente termo-ótico da fibra. Para a fibra de sílica, a sensibilidade do comprimento de onda à temperatura, em 1.55 μm , é em torno de 13 $\text{pm}/^\circ\text{C}$.

Para a medição de uma deformação longitudinal aplicada, $\Delta\epsilon$, o deslocamento no comprimento de onda $\Delta\lambda_{BS}$ é expresso por:

$$\Delta\lambda_{BS} = \lambda_B \left(1 - \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} - \rho_{12})] \right) \Delta\epsilon, \quad (3)$$

onde n é o índice de refração, ρ_{11} e ρ_{12} são os componentes do tensor para deformação da fibra ótica e o ν é o coeficiente de Poisson. Para a fibra de sílica, a sensibilidade do comprimento de onda a deformação para FBG em 1.55 μm é em torno de 1.15 $\text{pm}/\mu\epsilon$ (o $\mu\epsilon$ é uma unidade de deformação relativa, a qual é definida como 1 μm de deformação por metro de comprimento).

Devido ao comprimento de onda de Bragg ser sensível simultaneamente a deformação e temperatura, em aplicações práticas o deslocamento relativo de comprimento de onda pode ser reescrito como:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = \left(1 - \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} - \rho_{12})] \right) \Delta\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (4)$$

A primeira parcela da expressão (4) é devida à deformação e o segundo à temperatura.

A rede de Bragg em fibra, em comum com muitos tipos de sensores em fibra ótica, está sujeita aos campos de deformação e de temperatura simultaneamente. Na medição da perturbação induzida no deslocamento do comprimento de onda através de uma única FBG, não é fácil discriminar a resposta do sensor para cada uma das duas variáveis. Essa incapacidade de separação entre temperatura e deformação, chamada de sensibilidade cruzada é possivelmente a mais significativa limitação do sensor com rede de Bragg e traz sérias implicações para sensores de deformação projetados para medir sinais lentos, onde variações de temperatura ao longo da fibra podem ser indistinta da deformação. Para medida dinâmica de deformação isso não é um problema, pois a flutuação térmica ocorre em baixa frequência, que não coincide com a frequência de ressonância de interesse.

A eliminação da sensibilidade cruzada pode ser obtida através de medição em dois comprimentos de onda ou em dois diferentes modos óticos. Métodos de compensação de temperatura são classificados como intrínseco (dependente de propriedades da fibra) ou extrínseco (combinando a rede com um material externo de dimensões e propriedades adequadas). O simples uso de dois sensores próximos onde um é isolado do outro para uma perturbação indesejada pode separar os efeitos, porém este método não é aplicável em um sistema de medição onde uma invasão mínima seja necessária e um segundo sensor não seja aplicável. Apesar disto, muitos arranjos foram desenvolvidos para se obter o parâmetro de deformação e de temperatura separadamente, utilizando sensores com FBG [Othonos, 1999].

2.2 ATUADOR PIEZELÉTRICO

Em 1880 o efeito piezométrico foi descoberto pelos irmãos Curie, este efeito é uma conversão de uma força mecânica ou movimento em um sinal elétrico proporcional. Assim, por exemplo, ao aplicar pressão em certos cristais, tem-se como resultado uma carga elétrica neste cristal. Em 1881 Lippman previu o efeito piezométrico inverso, com base no princípio de conservação de cargas, onde uma deformação mecânica no cristal é causada pelo sinal elétrico aplicado. Após alguns anos, Jacques e Pierre Curie verificaram a hipótese de Lippman, mostrando que um campo elétrico aplicado em terminais, sobre o cristal provocam deformação neste material. Passadas muitas décadas, começou a ser resgatado o vasto potencial destes cristais. Em 1940 cientistas descobrem o efeito piezométrico em algumas classes de cerâmicas submetidas a campos elétricos. Atualmente se utiliza como cerâmica piezométrica o Zirconato Titanato de Chumbo (PZT) [Georgiou and Mrad, 2004].

As propriedades dos materiais piezométricos são conhecidas desde o século 19, porém sua utilização industrial teve um incremento na década de 70, sendo aplicado em filtros, alarmes sonoros, sonares e outros dispositivos, incluindo o popular acendedor “Magiclik”. O desempenho satisfatório das cerâmicas piezométricas impulsionou o desenvolvimento da pesquisa e possibilitou novas aplicações, atualmente há um grande interesse no seu uso como sensor e atuador mecânico.

O atuador PZT oferece alta resolução, menor que sub-nanometro em alguns casos, alta dureza, baixo desgaste e quebra e rápido tempo de resposta (ms), assim atende especificações de aplicação em sistemas de alta precisão em engenharia mecânica e elétrica [Georgiou and Mrad, 2004].

CAPÍTULO 3

DEMODULAÇÃO DE FBG

No presente capítulo serão apresentadas algumas técnicas para se fazer a leitura ou demodulação de FBG, entre as quais se destaca a técnica do filtro Fabry-Perot sintonizável, que serviu de referência para a técnica proposta na presente dissertação.

3.1 TÉCNICAS DE DEMODULAÇÃO DE FBG

Demodulação de FBG é o processo no qual é obtida uma informação de interesse, quando a FBG é utilizada como sensor, através da determinação de quanto variou o comprimento de onda de reflexão da rede.

A utilização de um analisador de espectro ótico (OSA) é uma forma imediata para observar diretamente o desvio do comprimento de onda de reflexão, $\Delta\lambda_B$. O OSA é um equipamento com alta resolução, porém de custo relativamente elevado e tempo de resposta lento (ordem de segundos), isto inviabiliza o seu uso em grande parte dos sensores baseados em FBG que exijam custo reduzido ou resposta rápida.

Naquelas aplicações, o processo de demodulação da variação do comprimento de onda de pico da FBG é feito pela aplicação de um dos seguintes métodos de demodulação: em intensidade, fase, frequência ou combinação destes. Os aspectos principais desses métodos de demodulação para a variação da posição espectral da banda de reflexão de uma FBG são discutidos nas próximas seções.

3.1.1 Demodulação em intensidade

A demodulação em intensidade é implementada por um dispositivo simples e de baixo custo, porém de baixa resolução e pouca imunidade a flutuações na potência ótica decorrente da fonte ótica ou do circuito ótico [Melle *et al.* 1993] .

O dispositivo, conforme apresenta-se na figura 2, é formado por uma fonte de luz de banda larga, a qual contém a faixa de comprimento de onda de reflexão de Bragg. Esta fonte ilumina uma FBG sensora através de um acoplador. A luz refletida é aplicada a outro acoplador onde parte do sinal será acoplada a um filtro passa baixas (FPB) com resposta conhecida e flanco do espectro na região do λ_B , como visto na figura 3. A outra parte do sinal servirá como referência e será diretamente foto-detectada em um módulo onde será executada a divisão das intensidades. O espectro refletido pela FBG deve variar somente sobre o flanco de transição do filtro, caso contrário o sensor sai de sua faixa de operação. Na figura 3 deve-se observar que a curva de resposta do filtro está representada em comprimento de onda (λ) e não em frequência (f).

A presença da corrente de referência (I_{1ref}) é um aprimoramento do sistema de demodulação, o qual assim apresenta uma maior rejeição às variações da potência ótica da fonte ou fatores ambientais nos enlaces e componentes óticos que influenciam o sinal do sensor.

A intensidade do sinal de saída é dependente da superposição relativa dos espectros de reflexão e o do FPB conforme mostrado na figura 3, ao variar a posição do espectro de reflexão de Bragg, conforme a mudança do parâmetro sensoreado, há alteração na intensidade da corrente foto-detectada (I_1).

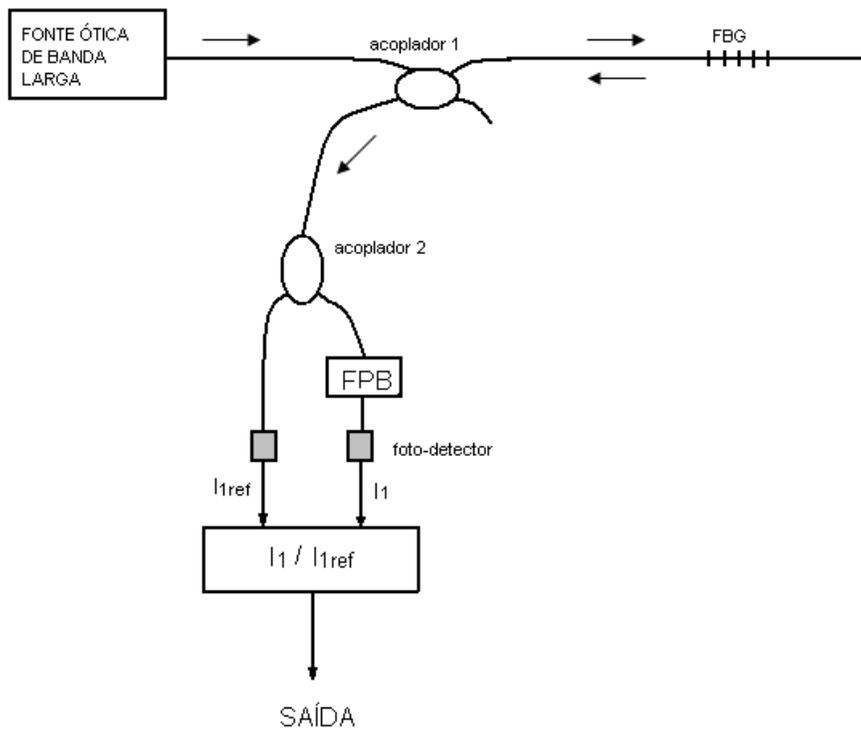


Figura - 2 Demodulador de FBG por intensidade [Melle *et al.* 1993].

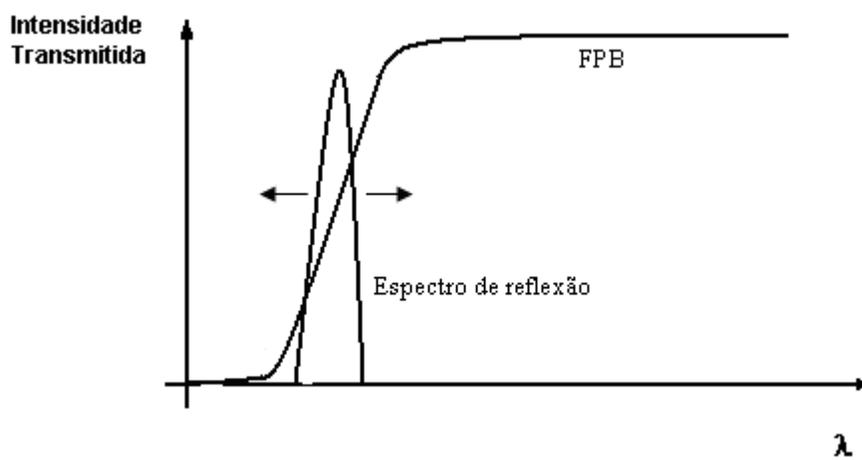


Figura – 3 Representação do espectro de reflexão da FBG sobre a curva de resposta (transmissão) em frequência do filtro passa baixas (FPB).

3.1.2 Demodulação em fase de redes de Bragg com um interferômetro Mach-Zehnder

A demodulação do comprimento de onda de Bragg de uma FBG sensora, quando iluminada por uma fonte de banda larga, pode ser realizada pela análise da fase do sinal refletido. Uma configuração empregada utiliza um interferômetro de Mach-Zehnder [Kersey *et al.* 1992] para determinar o comprimento de onda de Bragg a partir do deslocamento de fase, conforme representado na figura 4.

O interferômetro é desbalanceado, isto é, o comprimento dos dois braços é diferente. Ao lançar a luz da fonte de banda larga na FBG, através do acoplador 1, a banda refletida pela FBG é direcionada para o acoplador de entrada do interferferômetro e este divide o sinal em duas componentes óticas de mesma freqüência central, tomando cada uma o percurso por um dos braços. A diferença de comprimento entre os braços provoca interferência, com diferença de fase fixa, no acoplador de saída se o modulador de fase estiver desligado. Essa superposição de ondas é aplicada ao foto-detector.

Quando o sistema elétrico de modulação de fase é ligado, gera-se uma pequena alteração dinâmica na diferença de caminho ótico, resultando em uma baixa modulação na diferença de fase detectada. Ocorrendo deslocamento espectral na FBG sensora devido a deformação ou temperatura, por exemplo, há alteração proporcional na tensão de saída do amplificador *lock-in*.

Kersey *et al.* [1992] demonstraram que essa técnica apresenta elevada resolução para a detecção de sinais dinâmicos de deformação. Foram obtidos experimentalmente resoluções dinâmicas de aproximadamente $0,6 \text{ n}\epsilon/(\text{Hz})^{1/2}$ em freqüências superiores a 100 Hz.

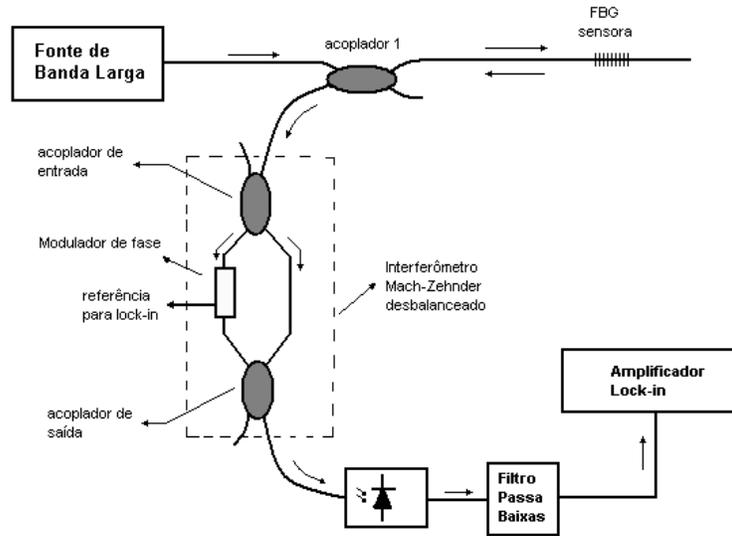


Figura 4 – Sistema demodulador de FBG, com interferômetro Mach-Zehnder desbalanceado [Kersey *et al.* 1992]

3.1.3 Demodulação de FBG através de filtro Fabry-Perot sintonizável

3.1.3.1 Interferômetro de Fabry-Perot

O interferômetro de Fabry-Perot é um tipo particular de ressonador ótico cujos modos de ressonância são soluções das equações de Helmholtz, sujeitas às devidas condições de contorno [Saleh *et al.* 1991]. As frequências ν_q dos modos permitidos para um ressonador ótico e a distância entre as duas frequências adjacentes de vibração, ν_f , são dados por:

$$\nu_q = \frac{qc}{2d} \quad (5)$$

$$\nu_f = \frac{c}{2d} \quad (6)$$

onde $q = 1, 2, \dots$, representa o número inteiro de semi-períodos que a cavidade comporta, c é a velocidade da luz no vácuo e d é a distância entre os dois espelhos paralelos que formam a cavidade do ressonador.

Uma das aplicações de maior êxito do interferômetro de Fabry-Perot é no filtro de Fabry-Perot de varredura (SFP), o qual é um equipamento importante para os sistemas de comunicações em fibra ótica, devido conseguir remover ruído de emissão espontânea gerados por amplificadores em fibra ótica, no estágio final do sistema receptor. Características como estabilidade e facilidade de aplicação o tornam solução viável em sistemas de demodulação de FBG em fibras óticas. [Othonos, 1999].

Os SFP se caracterizam por apresentarem ressonâncias passa-faixas periódicas, com banda de passagem, $\Delta\lambda_f$, típica de 0,3 nm, medidas à meia altura. Uma determinada banda de passagem é limitada na faixa de frequências em que pode ser sintonizada pela faixa espectral livre (FSR). A FSR apresenta larga faixa de operação, da ordem de dezenas de nanômetros e tanto a banda de passagem, quanto a faixa espectral livre dependem da separação física dos espelhos [Saleh *et al.* 1991]. O quociente que relaciona os dois parâmetros anteriores é a *finesse* (F).

O sintonia do filtro é obtida pela alteração precisa (nanométrica) da separação entre os espelhos, utilizando um elemento piezelétrico (PZT), o qual muda o espaçamento da cavidade quando ocorre mudança na tensão aplicada em seus terminais.

3.1.3.2 Técnicas de demodulação através de sintonia de filtro Fabry-Perot

Esta técnica proposta por Kersey *et al.* [1993], também conhecida por técnica do filtro sintonizável ou técnica de primeira derivada, é a principal referência para o sistema desenvolvido e ensaiado na presente dissertação. Na demodulação de FBG através de filtro Fabry-Perot sintonizável, apresentada por aqueles autores, há duas formas de operação, sendo que na primeira, o sistema opera em malha fechada e é aplicado a um único sensor, conforme representado na figura 5 e a segunda forma é o modo de varredura, o qual pode ser aplicado a vários sensores como representado na figura 6.

No sistema em malha fechada - figura 5 - a fonte de luz de banda larga é aplicada através do acoplador e ilumina a FBG, a banda de reflexão da FBG, centrada em λ_B retorna ao acoplador onde é direcionada ao filtro sintonizável de Fabry-Perot em fibra (FFP), com banda de passagem próxima à banda refletida pela FBG. O FFP recebe um sinal de *dither* com frequência ω_d (f_d), o qual altera o comprimento da cavidade ressonante e em consequência a banda de passagem do FFP. Esta alteração de banda da passagem, convoluída com o espectro de reflexão da FBG, resulta em um sinal de saída modulado na frequência ω_d .

(fundamental) ou em suas harmônicas. Havendo casamento entre os espectros, o sinal da fundamental é nulo, caso contrário terá amplitude dependente da posição relativa dos espectros da FBG e do FFP.

Como o sistema é em malha fechada, o espectro do FFP acompanha o espectro da FBG sensora, através da aplicação de tensão adequada. Quando a FBG tem o λ_B deslocado devido a mudança no parâmetro sensorado há um sinal de erro, para correção da posição espectral do FFP. Esse sinal de erro é a informação sobre o parâmetro sensorado.

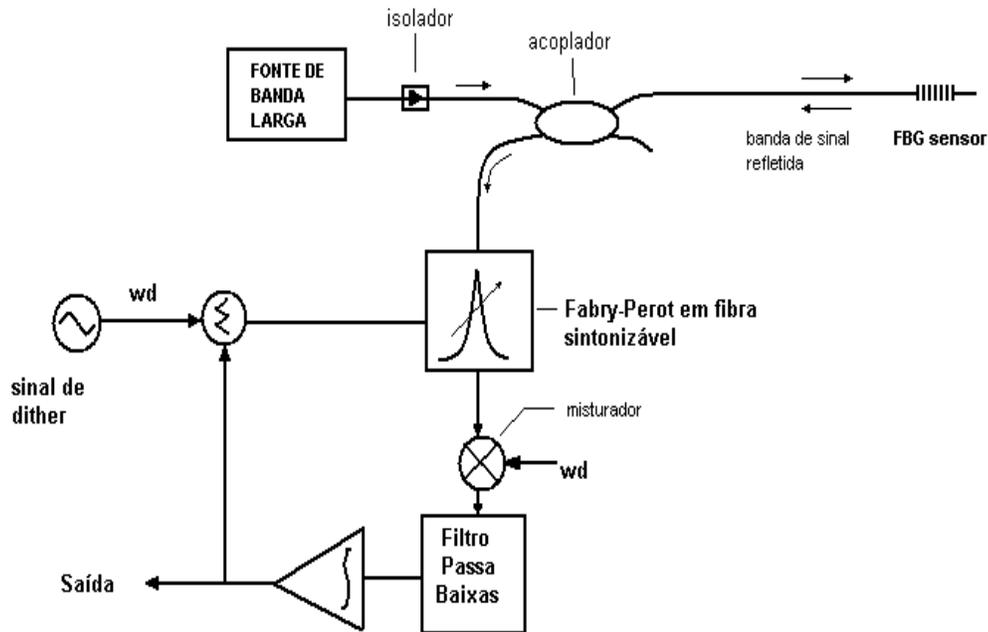


Figura 5 – Demodulação de FBG por FFP para sensor único. [Kersey *et al.* 1993]

No sistema experimental conseguiu-se resolução $< 0,3 \mu\epsilon$, para largura de banda de medição de 30 Hz [Kersey *et al.* 1993]

Como visto anteriormente, o sistema em malha fechada trava os espectros do FFP e FBG, assim é aplicável a sensor único. Para sistemas com vários sensores, figura 6, é aplicado o modo de varredura. Neste caso, muda o formato do sinal aplicado ao FFP, a forma de onda passa a ser triangular com *dither*, onde o *dither* é um sinal de formato senoidal com baixa amplitude que esta somado ao sinal triangular de varredura. Nesse processo, a subida/descida da tensão aplicado ao PZT que controla a cavidade do FFP faz com que a banda de passagem do filtro coincida com o espectro de reflexão das várias FBG's presentes (sensores) e o sinal de *dither* permite a obtenção da leitura de cada sensor.

Este processo cíclico faz a demodulação de cada FBG na seqüência de seus comprimentos de onda de reflexão.

No sistema experimental, foi obtida resolução da ordem de $3 \mu\epsilon$, para um sistema com 4 sensores [Kersey *et al.* 1993]

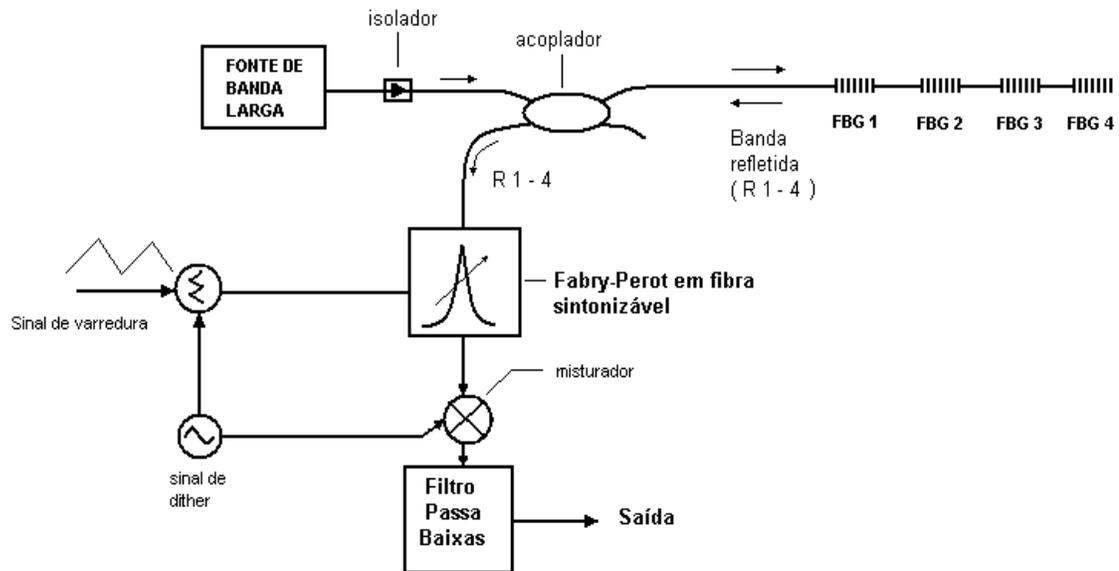


Figura 6 – Demodulação de FBG por FFP para vários sensores [Kersey *at al.* 1993]

Embora a técnica para demodulação apresentada tenha alta resolução e resposta razoavelmente rápida, o uso de um FP ou SFP requer alta estabilidade térmica e ambiental devido à sensibilidade do dispositivo. Além disso, o FP (ou SFP) ainda são dispositivos relativamente caros.

A possibilidade de determinar o espectro de uma FBG usando uma outra como filtro, modulado mecanicamente, foi demonstrado quando a primeira delas é deslocada por efeito de temperatura [Martelli, 2003].

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo descreveremos os procedimentos desenvolvidos para se chegar ao protótipo do demodulador de FBG.

O demodulador desenvolvido para sensores de FBG, apresenta muitas vantagens em relação aquele utilizado como referência para o desenvolvimento, o qual utiliza filtro Fabry-Perot sintonizável, proposto por Kersey [1993]; dentre estas vantagens estão o baixo custo, a utilização de componentes eletrônicos e dispositivos óticos de fácil aquisição, a estabilidade térmica do sistema é maior devido à maior dimensão do PZT em relação à cavidade ressonante do FFP, o FFP apresenta região de operação estreita enquanto que no sistema com PZT pode-se operar em uma faixa ampla de comprimento de onda, dependendo somente da rede submetida à varredura. Além disso, o sistema com PZT apresenta resultados similares aos obtidos com o sistema original.

O sistema proposto apresenta alguma similaridade com o apresentado por Zhao and Liao [2002].

Todas as redes de Bragg utilizadas neste trabalho foram gravadas no Núcleo de Dispositivos Fotorefrativos (CEFET/PR) usando um interferômetro com máscara de fase e fibras previamente hidrogenadas [Silva *et al.* 2003].

4.1 SISTEMA DE DEMODULAÇÃO

Foi desenvolvido e ensaiado um dispositivo de medição e controle formado por duas redes de Bragg em fibra, uma FBG é estabelecida como referência e a outra FBG é utilizada como sensor. O protótipo consiste de um dispositivo eletromecânico, o qual apresenta um atuador piezelétrico que opera sobre a FBG de referência, provocando variação cíclica em seu período, conforme o sinal elétrico aplicado ao PZT. Através de uma configuração adequada de dispositivos óticos e circuitos eletrônicos é obtido o parâmetro de temperatura ou deformação da fibra sensora, através da técnica de demodulação da primeira derivada.

O atuador piezelétrico é formado por dois braços, sendo um fixo e o outro móvel, conforme representado na figura 7. Próximo à articulação do braço, instala-se um PZT, o qual é alimentado por um amplificador de alta tensão, provocando o deslocamento do conjunto. Em função do arranjo do dispositivo, consegue-se um aumento na deformação da FBG de referência, a qual está acoplada na outra extremidade dos braços.

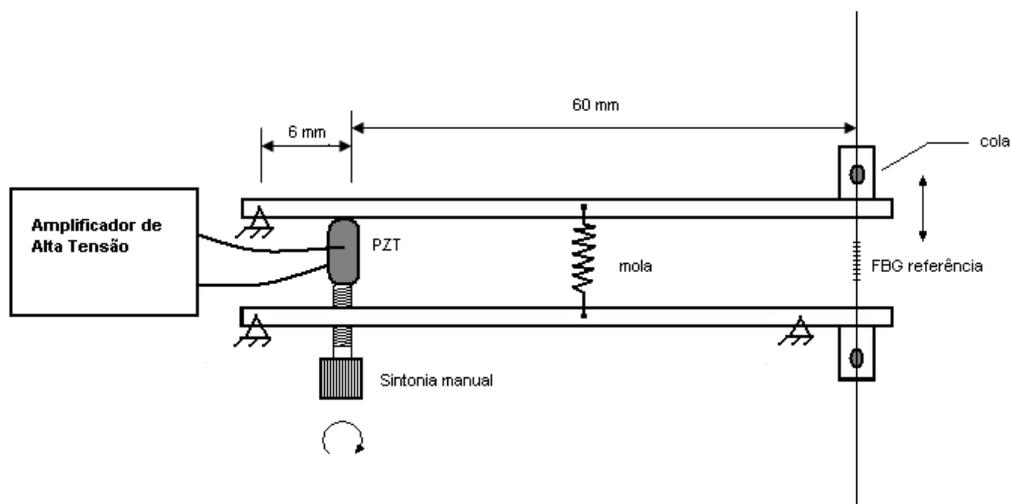


Figura – 7 Atuador piezelétrico desenvolvido

O PZT utilizado, modelo AE0203D08, vendido pela Thorlabs Inc, apresenta deformação de 4 μm ao ser submetido a uma tensão de 100 V. Através do atuador mecânico (braço), obteve-se deformação da ordem de 40 μm na região da fibra onde está gravada a FBG de referência, o que provoca uma deformação da ordem de 1300 $\mu\epsilon$ na rede, cujo limite de deformação recomendável é inferior a 1000 $\mu\epsilon$. Em função disso, operamos até 90 V.

Para fins de calibração determinou-se previamente o deslocamento da rede de referência, através da medição do comprimento de onda de reflexão desta FBG com um analisador de espectro ótico (OSA), obtendo-se um deslocamento de 0,28 nm ao se aplicar tensão CC de 100 V ao PZT.

O dispositivo permite a pré-sintonia da rede de Bragg de referência, através de um parafuso com passo micrométrico que desloca o braço móvel, tracionando esta FBG e alterando o seu λ_B . Após sintonizado, é aplicado o sinal elétrico de controle do PZT. A pré-sintonia posiciona o espectro de reflexão da FBG de referência sobreposto ao espectro de reflexão da FBG sensora. Desta maneira, ao se aplicar a tensão variável ao PZT, estando a FBG sensora sem perturbação externa, teremos uma variação na sobreposição espectral das duas FBG's, causada pela perturbação do PZT, a qual gera um sinal foto-detectado semelhante ao sinal senoidal aplicado ao PZT e com amplitude pico-a-pico constante, figura 8-a. Se as redes têm os espectros afastados, ocorre redução na amplitude do sinal foto-detectado e se os espectros aproximam-se, aumenta a amplitude do sinal foto-detectado.

Ao ocorrer perturbação na FBG sensora, por temperatura ou por deformação, o

sinal foto-detectado continua semelhante ao sinal aplicado ao PZT, porém sua amplitude pico-a-pico passa a variar proporcionalmente ao parâmetro sensoreado que desloca a FBG sensora, figura 8-b e assim se o espectro da FBG sensora for deslocado para maior comprimento de onda, reduz a amplitude do sinal foto-detectado e o seu deslocamento for para menor comprimento de onda, aumenta esta amplitude.

Desta forma, o sinal foto-detectado tem amplitude dependente da variação cíclica do comprimento de onda de Bragg da rede de referência devida ao sinal aplicado ao atuador PZT e do deslocamento da rede sensora, conforme uma variação de deformação ou de temperatura por exemplo.

Havendo o casamento perfeito entre os espectros, ou seja, se $\lambda_{\text{referência}} = \lambda_{\text{sensor}}$, conforme representado na figura 8-c, o sinal foto-detectado passa a ter o dobro da frequência do sinal que é aplicado ao PZT. Isto devido ao fato de que o processo de modulação induz um termo com o dobro da frequência ($2f$) cuja amplitude depende da superposição das redes. Para qualquer deslocamento da FBG sensora em relação à FBG referência ocorre redução na amplitude do sinal foto-detectado.

Na figura 8-d a FBG referência está posicionada em comprimento de onda central superior ao da FBG sensora e neste caso, há mudança na fase do sinal foto-detectado em relação ao caso tratado no item 8-b, devido ao fato que para esta posição relativa dos espectros, ocorre aumento na amplitude do sinal foto-detectado se o espectro da FBG sensora sofrer um aumento no seu comprimento de onda de Bragg e uma redução no caso de ocorrer redução no comprimento de onda refletido. Através desta mudança de fase é possível identificar com precisão o casamento dos espectros, ou seja, a posição na qual, o comprimento de onda central de reflexão das duas FBG se igualam, condição esta que é importante para a calibração do sistema.

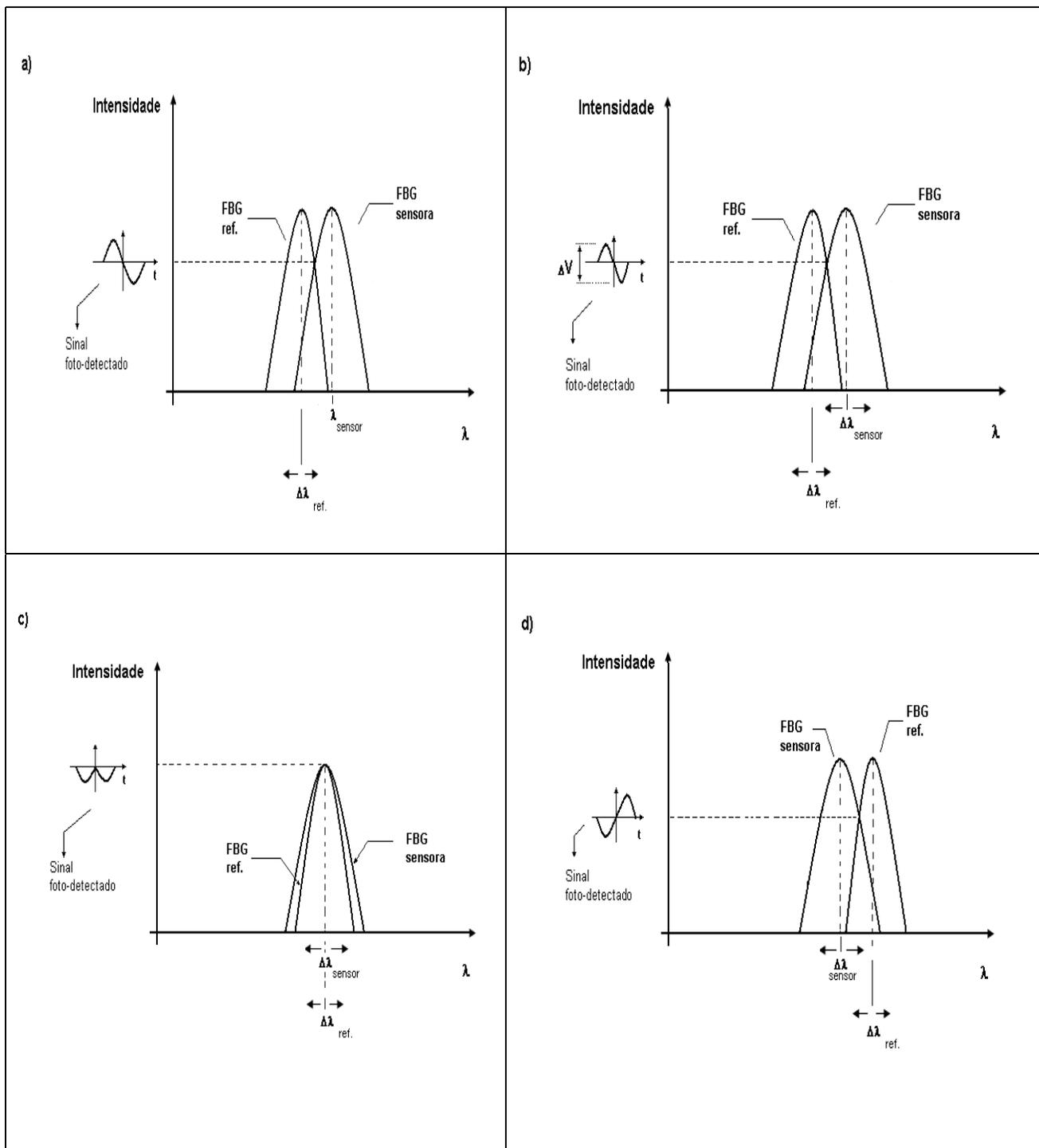


Figura 8 a) Representação esquemática do deslocamento do espectro da FBG de referência sobre o espectro da FBG sensora, estático. b) Variação da FBG sensora devido a deformação ou temperatura com a FBG ref. centrada em comprimento de onda inferior ao da FBG sensora. c) Casamento entre os espectros da FBG sensora e FBG referência. d) Variação da FBG sensora devido a deformação ou temperatura com a FBG ref. centrada em comprimento de onda superior ao da FBG sensora.

O sinal foto-detectado é processado eletronicamente através de um amplificador *lock-in*, gerando em sua saída uma tensão CC proporcional à amplitude do sinal resultante da convolução entre os espectros da FBG de referência e da FBG sensora, através desta tensão CC calibra-se o parâmetro a ser medido.

4.2 OPERAÇÃO DO SISTEMA

Uma fonte de luz banda larga proveniente de um amplificador ótico a fibra dopada com Érbio é aplicada ao circulador ótico, conforme representado na figura 9, propaga-se na direção da FBG sensora, sofre reflexão na banda espectral próxima ao λ_{BSen} (comprimento de onda de Bragg da rede sensora) voltando ao circulador e na seqüência passa pelo acoplador ótico 1 (10% / 90%), no qual retira-se 10% do sinal para o OSA e o restante da potência ótica é transferida ao acoplador ótico 2 (50% / 50%) de onde é direcionada à FBG de referência, que esta sendo modulada pelo atuador PZT. A nova reflexão nessa última rede, no comprimento de onda próximo ao λ_{BR} (comprimento de onda de Bragg da rede de referência) é direcionada pelo acoplador para o foto-detector.

A potência obtida no foto-detector é proporcional ao recobrimento entre as bandas das duas redes de Bragg, e assim ao desvio entre os dois comprimentos de onda centrais. Um amplificador *lock-in* recebe o sinal obtido do foto-detector após uma pré-amplificação, tendo como referência uma amostra do sinal aplicado ao PZT, e gera uma tensão CC de saída, a qual é função da superposição dos espectros de reflexão das duas FBG's ou da separação entre seus comprimentos de ondas.

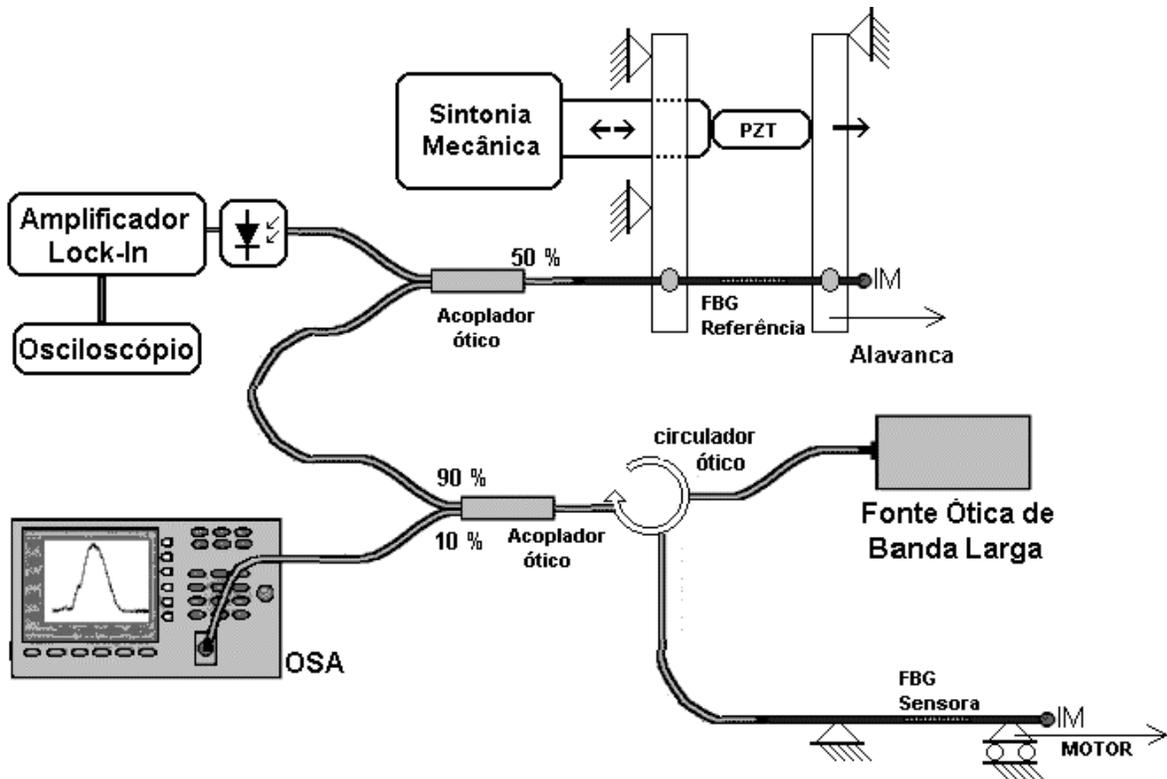


Figura 9 - Sistema de demodulação de FBG sensora, através de modulação mecânica de uma FBG de referência.

O sistema para a deformação da FBG sensora, utilizado para caracterizar o dispositivo demodulador de FBG para deformação, consiste de um micro-estágio de translação, acionado por um motor (Micro-Controlado MF 04 CC), acoplado a um suporte onde está fixado um micrômetro, o qual medirá o deslocamento, ΔL , conforme representado na figura 10. A fibra é fixada de forma tal que a rede de Bragg fique posicionada entre os pontos de colagem, no suporte e no carro do motor. A distância entre esses dois pontos será o comprimento inicial, L_0 . O sistema possui um painel de controle para o ajuste fino do deslocamento [Figueredo *et al.* 2003].

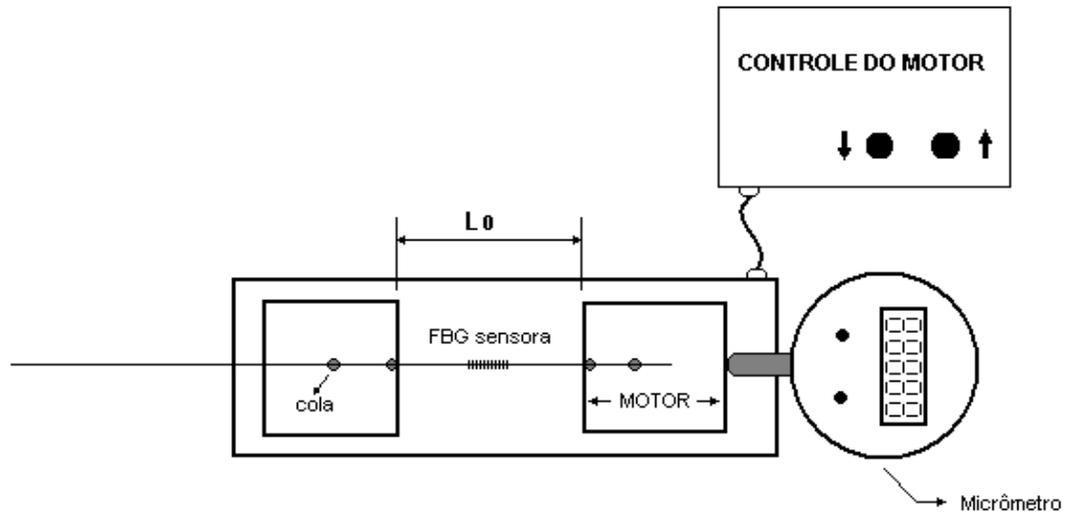


Figura 10 – Dispositivo para aplicar deformação longitudinal na FBG sensora, no processo de caracterização do sistema demodulador de FBG desenvolvido.

4.3 SISTEMA ELETRÔNICO

Durante o desenvolvimento do demodulador de FBG baseado em modulação mecânica da FBG, se fizeram necessárias várias etapas de circuitos eletrônicos, os quais foram projetados e construídos e serão descritos na seqüência.

O sistema eletrônico é composto pelas seguintes partes:

- Circuito gerador de formas de onda.
- Amplificador de alta tensão.
- Circuito de foto detecção.
- Amplificador *lock-in*.

O diagrama de blocos na figura 11 representa o sistema eletrônico desenvolvido.

4.3.1 Gerador de formas de onda

O circuito gerador de formas de onda é o responsável pela geração do sinal que é aplicado ao PZT, após ter passado pelo amplificador de alta tensão. O circuito desenvolvido é implementado com o circuito integrado (CI) ICL 8038 fabricado pela Intersil, o qual gera sinais com formatos senoidal, triangular e quadrado. Na montagem, utiliza-se a geração de sinal de saída com os seguintes formatos: senoidal e rampa somada com senoidal de baixa amplitude (*dither*). O formato senoidal foi o ensaiado, permitindo a demodulação de FBG única, e o sinal de rampa com *dither* é aplicado na técnica de demodulação por varredura, a qual pode ser aplicada a vários sensores, conforme Kersey *et al.* [1993]. Esses sinais têm as seguintes características: frequência ajustável entre 1,75 Hz e 100 Hz e amplitude até 10 Volts pico-a-pico (Vpp). A faixa de ajuste da frequência foi determinada pela natureza mecânica do atuador piezelétrico que varia a rede de Bragg de referência, o qual apresenta resposta relativamente lenta (ordem de 150 Hz) e a amplitude foi adequada ao nível de tensão de entrada requerida pelo amplificador de alta tensão, que aciona o PZT.

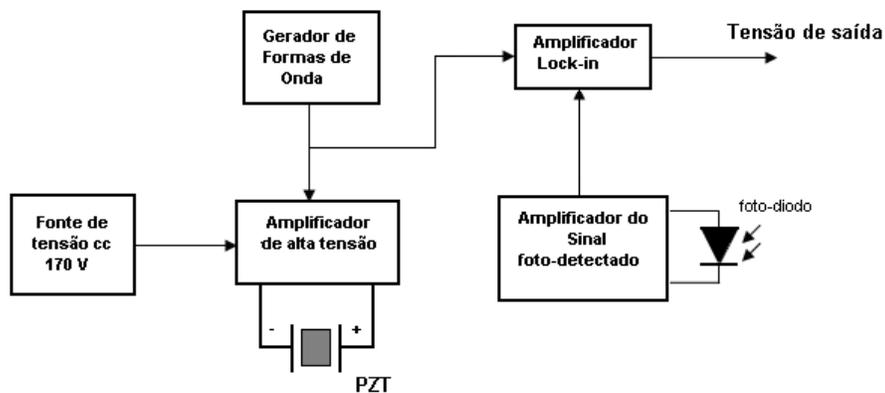


Figura 11 - Diagrama de blocos do sistema eletrônico.

O PZT utilizado no ensaio opera com tensão limite de 150 V e recomendação de uso até 100 V. A deformação nominal apresentada pelo PZT é $4.2 \mu\text{m} \pm 0.8 \mu\text{m}$ no limite da tensão e de $2.8 \mu\text{m} \pm 0.8 \mu\text{m}$ na tensão de 100 V.

4.3.2 Amplificador de alta tensão

O sinal produzido pelo gerador de formas de onda é aplicado a um amplificador de alta tensão discreto, o qual, apresenta na saída uma tensão oscilatória de mesmo formato que o sinal de entrada, com amplitude e *offset* ajustáveis, conforme o índice de modulação pretendido na FBG de referência. O sinal de saída do amplificador de alta tensão é aplicado ao PZT.

A tensão que aciona o PZT na saída do amplificador de alta tensão apresenta as seguintes características é um sinal CC com ondulação de 80 V (vale da tensão com 10V e pico com 90 V) limitada pela especificação do PZT, conforme representada na figura 12 e o formato da ondulação pode ser ajustado através do circuito gerador de formas de onda. No ensaio foi utilizado o sinal senoidal, devido ao nosso interessados em demodular uma única FBG .

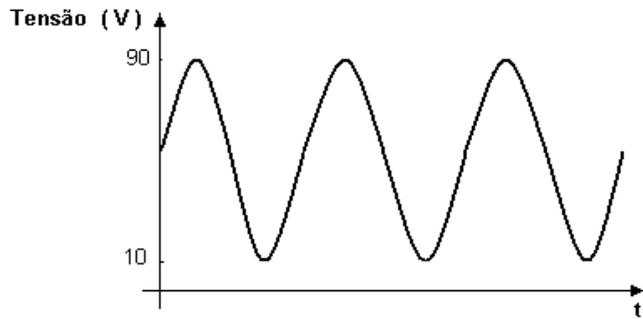


Figura 12 – Sinal de *dither* aplicado ao PZT no processo de modulação da FBG referência.

4.3.3 Circuito de foto-deteção

O circuito de foto-deteção é constituído por um foto-diodo InGaAs (FGA04 , vendido pela Thorlabs Inc.), o qual recebe o sinal ótico a ser processado e na seqüência possuiu outras etapas amplificadoras, sendo a primeira em configuração de transimpedância e as outras não inversoras, conforme representado na figura 13. São utilizados amplificadores operacionais de baixo ruído, com elevada resposta em frequência e alta impedância de entrada, características necessárias para um adequado processamento do sinal recebido e relação sinal/ruído (S/R) elevada.

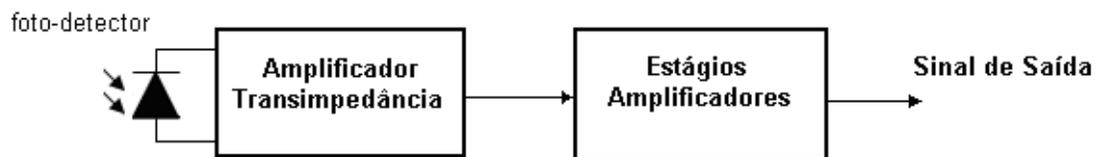


Figura 13 - Diagrama esquemático do circuito de foto-deteção.

4.3.4 Amplificador *lock-in*

O amplificador *lock-in* tem como principal característica, o fato de detectar um sinal, o qual esta com relação sinal/ruído (S/R) baixa.

O amplificador *lock-in* é composto por um circuito multiplicador em série com um filtro passa baixas (FPB), conforme esquema na figura 14. Na etapa multiplicadora de sinal são aplicados dois sinais, sendo que um é o de referência $r(t)$ e o outro é o de interesse $s(t)$, o qual apresenta nível de ruído elevado $n(t)$. O amplificador *lock-in* é essencialmente um correlator e o sinal de saída é altamente dependente do grau de correlação que há entre o sinal de referência e o sinal de interesse [Meade, 1982]. A presença de correlação é testada através da multiplicação dos dois sinais de entrada, conforme escrito abaixo:

$$vp(t) = r(t) (s(t) + n(t)) \quad (7)$$

onde $vp(t)$ é o sinal resultante da multiplicação, $r(t)$ é o sinal de referência, $s(t)$ é o sinal de interesse e $n(t)$ representa o efeito de ruído aditivo e interferência. Os produtos de alta ordem resultantes da multiplicação são eliminados pela presença do filtro passa baixas (FPB) na saída do sistema.

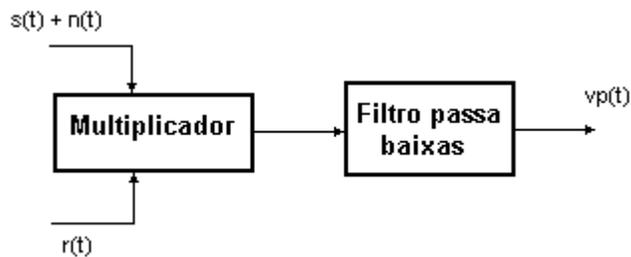


Figura 14 - Amplificador *lock-in* , onde $r(t)$ é o sinal de referência, $s(t)$ é o sinal a ser processado, o qual contém ruído $n(t)$ e $vp(t)$ é a tensão CC de saída.

Em um experimento o uso do *lock-in* é descrito pelo esquema mostrado na figura 15

[Meade, 1982]. O sinal de excitação é aplicado ao sistema experimental, o qual apresenta em sua saída sinal de resposta e ruído ($s(t) + n(t)$). O sinal de excitação aplica a referência $r(t)$ ao *lock-in* que também recebe o sinal de saída do sistema experimental. O sinal de saída do *lock-in* é dependente da correlação existente entre os sinais de entrada. Assim se $s(t)$ for correlato com o $r(t)$, há na saída do *lock-in* um sinal CC proporcional. Idealmente, a correlação entre $r(t)$ e $n(t)$ é nula, assim na ausência de $s(t)$ correlato com $r(t)$ o sinal de saída é nulo.

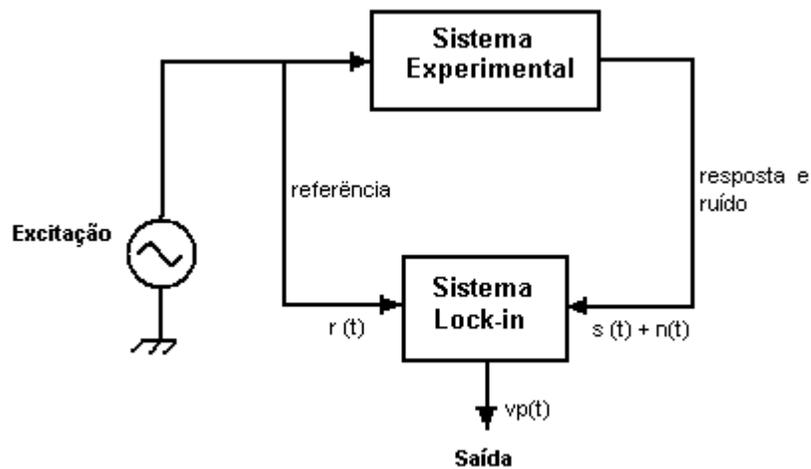


Figura 15 - Arranjo básico para um sistema experimental com regeneração de sinal por amplificador *lock-in* [Meade, 1982].

O amplificador *lock-in* projetado é composto de um CI multiplicador de sinal analógico de precisão MPY 634 da BURR-BROWN® e por um FPB formado por célula formada por resistor e capacitor (RC).

O amplificador *lock-in* recebe dois sinais, um de referência senoidal, que vem do circuito gerador de sinais e o outro proveniente do circuito de foto-deteção, e na sua saída há uma tensão CC cuja amplitude é proporcional ao grau de correlação existente entre o sinal foto-detectado e o sinal de referência.

A tensão CC de saída do amplificador *lock-in* é, no sistema de demodulação da FBG, proporcional ao grau de superposição espectral entre a FBG de referência e a FBG sensora, ou seja, contém a informação de interesse para quantizar o parâmetro sensoreado. Esta tensão CC pode então ser utilizada para indicar uma deformação ou aumento da temperatura na FBG sensora, bem como atuar em um sistema de controle.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO PZT

Neste item será descrito o procedimento para caracterização do PZT utilizado no dispositivo desenvolvido. Foram efetuados ensaios para se obter a característica da deformação no PZT em função da tensão CC aplicada.

O PZT utilizado foi AE0203D08, vendido pela Thorlabs Inc. O equipamento de medição é um metroscópio horizontal universal de precisão, modelo ULM 600 fabricação ZEISS, disponível no laboratório de metrologia do Departamento Acadêmico de Mecânica.

Para se efetuar o levantamento de dados, aplica-se uma tensão CC e se registra a correspondente deformação no PZT. Este procedimento foi feito durante o aumento progressivo da tensão e também na redução da tensão. Com os dados obtidos, foi levantado o gráfico representado na figura 16.

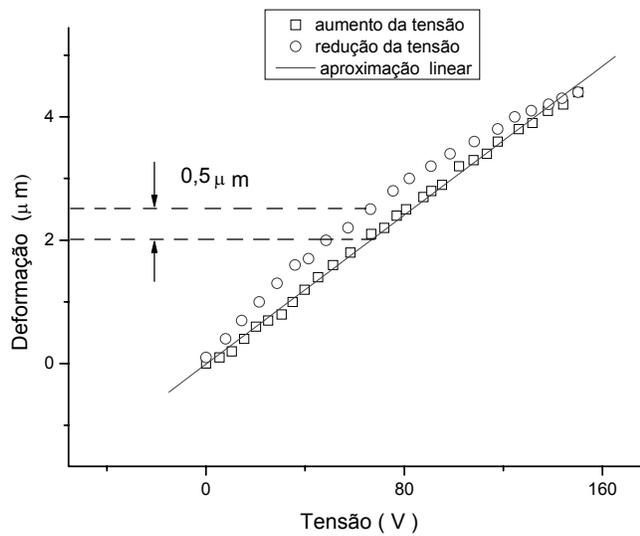


Figura 16 - Deformação do PZT em função da tensão CC aplicada .

Observa-se que ao se reduzir até zero a tensão aplicada ao PZT, os valores de deformação são superiores aos encontrados na elevação da tensão, havendo uma histerese intrínseca ao PZT. Essa histerese pode levar a diferença de $0,5 \mu\text{m}$ na deformação do PZT dependendo do histórico da tensão aplicada. A eliminação desse erro requer cerâmicas de qualidade superior ou observação sobre a aplicação de tensão na mesma seqüência com um sistema de controle adicional.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos bem como as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

5.1 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

Para fazer a pré-sintonia do comprimento de onda central da FBG de referência em um valor distante da FBG sensora é necessário conhecer o comprimento de onda central da FBG sensora não perturbada. Isso é possível através da monitoração da posição espectral do pico de reflexão da FBG sensora.

A FBG sensora é sistematicamente tracionada para efetuar sua caracterização, resultando em um deslocamento linear no comprimento de onda central desta FBG na faixa de operação.

No gráfico apresentado na figura 17 representa-se o deslocamento do comprimento de onda central de reflexão de FBG sensora, medido com o OSA, em função da deformação aplicada (equação (3)), e destes dados é obtida uma sensibilidade de 1.15 pm/ $\mu\epsilon$ para esta FBG, mediante um ajuste linear por mínimos quadrados. Como se observa naquele gráfico, a resposta da FBG à deformação é linear na faixa mostrada, devido as características mecânicas do vidro de Sílica. O máximo valor utilizado ($\approx 0,25\%$ de deformação relativa) é bem inferior aos limites de redes em fibras óticas ($\approx 0,5\% - 1,0\%$).

O sinal desejado será observado pela variação do sinal de saída do amplificador *lock-in* quando a rede sensora é deslocada espectralmente em relação à rede de referência, pois o grau de correlação dos dois espectros provoca o sinal recebido no foto-detector. A máxima intensidade luminosa no foto-detector é obtida quando os comprimentos de onda de Bragg das duas FBG's se igualam. A tensão senoidal aplicada ao PZT modula o sinal detectado, provocando uma oscilação na intensidade ótica dependente da sobreposição espectral da FBG sensora e da FBG de referência.

Como a detecção é realizada no sinal correspondente à derivada do grau de correlação, a posição de máxima superposição é vista pelo cruzamento do zero do sinal, o que permite melhor discriminação.

Uma vez feito o registro do sinal, sabendo que a tensão de saída do *lock-in* é proporcional à derivada primeira do espectro da FBG referência, uma integração da tensão de saída do *lock-in* reproduz o espectro de correlação entre a FBG de referência e aquela sensora e a posição do pico lido indica o comprimento de onda central dessas FBG's [Kersey *et al.* 1993].

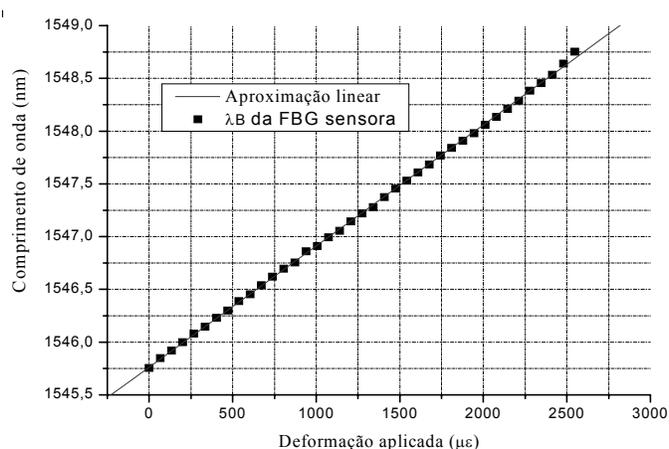


Figura 17 - Variação no comprimento de onda central de reflexão da FBG sensora em função da deformação aplicada com a reta de ajuste determinada (medidas realizadas com o OSA) .

No caso em que a largura espectral da FBG de referência é bem menor que aquela do sensor, $\Delta\lambda_{\text{referência}} \ll \Delta\lambda_{\text{sensor}}$, o sinal de correlação tende a reproduzir a forma espectral da banda de reflexão da FBG sensora. Quando isso não ocorre, observa-se um sinal cuja largura espectral é superior devido a característica da correlação.

5.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Para caracterizar estaticamente a resposta do sistema, é utilizada a configuração representada na figura 9. Um motor de passo acoplado a um dispositivo de translação, conforme apresentado na figura 10, estica progressivamente a FBG sensora e durante o processo, o espectro da luz refletida é monitorado por um analisador de espectro ótico (OSA) e o comprimento de onda central é registrado. O dispositivo de translação provoca uma deformação máxima de $2550 \mu\epsilon$ no sensor com incremento de $65 \mu\epsilon$, conforme já apresentado no gráfico da figura 17. Um osciloscópio (Tektronix TDS 220) registra simultaneamente a tensão de saída do amplificador *lock-in*. O gráfico contendo a tensão de saída registrada e o correspondente comprimento de onda central do espectro monitorado é apresentado na figura 18-a. Observa-se nesse gráfico o perfil típico associado à derivada de uma função com forma de sino (gaussiana, lorentziana, ...) que cruza o nível zero para $\lambda = 1547,41 \text{ nm}$, posição do pico de recobrimento dos espectros das duas FBG utilizadas.

Pode-se aproximar a região central naquele gráfico por uma reta (também mostrada) cujo coeficiente angular define a resolução experimental que pode ser obtida na região do cruzamento.

Integrando os dados associados à saída do *lock-in*, obtém-se o gráfico com o perfil do espectro de correlação das bandas de reflexão das duas FBG, que é apresentado na figura 18-b.

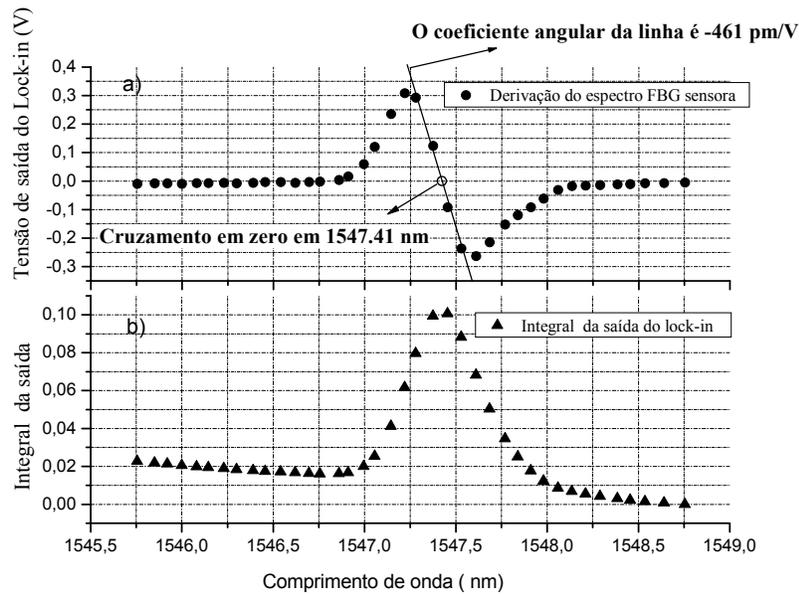


Figura 18 a) A tensão de saída do *lock-in* em função do comprimento de onda, corresponde a derivada do espectro de correlação e a região de operação linear é destacada através da linha reta onde o seu coeficiente angular corresponde à sensibilidade. O ponto de cruzamento em zero (1547.41 nm) é apresentado. b) Integral da tensão de saída do *lock-in* em função do comprimento de onda.

Utilizando o comprimento de onda central do espectro assim obtido é possível relacionar o sinal na saída do *lock-in* com a medida de deformação ou de temperatura, à qual a FBG sensora esteja submetida. O sensor deve operar na região onde a resposta é linear, próximo ao cruzamento por zero, como ilustrado pela linha reta na figura 18-a. No experimento, este intervalo é centrado no comprimento de onda 1547.41 nm e a resposta de saída do *lock-in* é linear com sensibilidade de -461 pm/V em um intervalo com largura de 250 pm. Se a FBG está sensoreando temperatura, esta região linear permite medição de

variação de temperatura de 25 °C, sendo considerado uma sensibilidade típica de 10 pm/°C para a FBG sensora.

A figura 19-a e b compara os espectros das FBG de referência e sensora com aquele de correlação determinado experimentalmente. Como, no experimento realizado, foi a FBG sensora que sofreu deslocamento espectral, aquele espectro de correlação aparece espectralmente superposto à rede de referência, mostrando também o aumento de largura de banda. Com a introdução de um acionador que permita a varredura espectral da própria rede de referência, o espectro de correlação estará superposto àquele(s) da(s) rede(s) sensora(s).

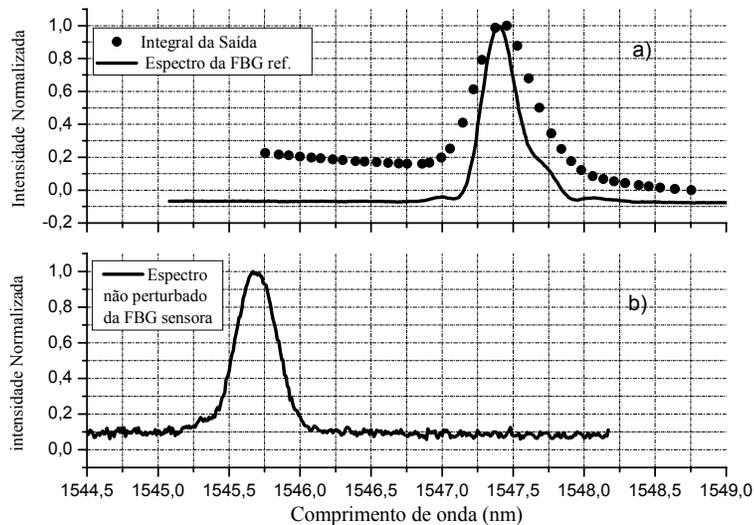


Figura 19 a) Comparação entre o espectro da FBG referência e a integração da saída do *lock-in*. b) Espectro da FBG sensora não perturbada, medido com o OSA.

A largura espectral à meia altura para a FBG de referência foi de 0,32 nm, para a FBG sensora 0,35 nm e de 0,62 nm para o espectro de correlação.

As diferenças entre o espectro obtido da integração da saída do *lock-in* e o espectro da FBG referência se devem a erro do processo de integração e ao fato da FBG sensora ser relativamente larga.

A resposta dinâmica do sistema é limitada pela resposta mecânica do atuador piezelétrico que deforma a rede, no caso, 100 Hz. Assim não é possível a detecção de vibrações com frequências superiores.

Uma característica importante do dispositivo para modulação mecânica da FBG é o fato de se poder automatizar o processo de varredura para o comprimento de onda central da FBG de referência em um intervalo de 7 nm, através do acoplamento do parafuso de sintonia em um motor de passo ou usando um acionador piezelétrico adequado, por exemplo um *worm-drive*. Na versão ensaiada esta sintonia é feita manualmente. Esta característica dinâmica permite ao sistema endereçar várias FBG no intervalo de 7 nm. Esse processo é análogo ao método do filtro sintonizável com um FFP [Kersey *et al.*, 1993].

A resolução do sistema é de 11 pm foi obtida através de medição com o OSA e corresponde à mínima variação de comprimento de onda que provoca uma variação na tensão de saída do amplificador *lock-in*. A resolução é limitada pela presença de histerese no PZT e por variações no dispositivo mecânico.

5.3 CONCLUSÕES

Esta dissertação mostra o uso de uma FBG modulada para interrogar uma outra FBG com características espectrais similares. Através da utilização da modulação mecânica de uma FBG, é possível efetuar o endereçamento espectral de outra FBG usada como

sensor. O método de filtro sintonizável proposto por Kersey *et al.*[1993] foi adaptado para esta configuração, similar à proposta por Ferreira *et al.* [1997], como uma forma de redução significativa de custo, aumento da estabilidade térmica e simplificação do sistema devido à substituição do filtro Fabry-Perot por uma simples FBG, preservando a detecção pela modulação em comprimento de onda através de *lock-in*.

O sistema pode operar no modo de tempo-real, monitorando frequências de dezenas de Hz, limitada somente pela resposta do dispositivo mecânico de modulação da FBG de referência.

O atuador piezelétrico é relativamente sensível às variações de temperatura, devido a ser confeccionado em alumínio, assim há necessidade de se manter em temperatura constante, porém em níveis menos críticos daqueles de um SFP.

Como ocorre uma convolução entre os espectros de reflexão da FBG sensora e a FBG referência, o espectro da FBG referência regenerado pela integração da saída do amplificador *lock-in* aproxima-se mais do real (figura 19-a) quando a FBG sensora tem largura espectral menor (aproxima-se do impulso), ou seja, idealmente teríamos a convolução da FBG referência com o impulso unitário, o que resulta no próprio espectro da FBG referência.

5.4 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Para aprimoramento do sistema, algumas propostas são consideradas:

- Desenvolver o atuador piezelétrico, através da utilização de mecânica mais elaborada (fina), possibilitando assim uma resposta em frequência maior para o sistema.

- Automatizar o processo de sintonia mecânica da FBG referência, através do acoplamento de um motor de passo, com controle computadorizado, ao parafuso que faz a pré – sintonia, assim é possível efetuar um sistema de leitura para vários sensores.

- Através do sinal de saída fornecido pelo *lock-in*, efetuar um controle de deformação ou temperatura.

- Utilizar um novo sistema atuador piezelétrico que possibilite a varredura e modulação na FBG referência. Assim é possível efetuar a leitura de vários sensores espectralmente separados através de multiplexação em comprimento de onda.

APÊNDICE

Resultados adicionais obtidos após a entrega da dissertação à banca examinadora são descritos resumidamente no trabalho em anexo, preparado para submissão a um periódico especializado.

Multiplexed fiber Bragg grating interrogation system using a modulated fiber Bragg grating and the tunable filter method

Valmir de Oliveira, Aleksander S. Paterno, Thiago S. Figueredo and Hypolito J. Kalinowski, *Member, IEEE*

Abstract—This work describes the use of a mechanically modulated fiber Bragg grating to address fiber Bragg grating sensors using the tunable filter method. A demonstration of FBG sensors multiplexing using this interrogation method is also presented, where the tunable FBG is used to scan the spectral operating range of the sensors. All the FBG used in the experiment do not need to match their center wavelengths.

Index Terms—Optical fiber devices, optical modulation.

I. INTRODUCTION

Over the last few years there has been a considerable interest in the development of in-fiber Bragg gratings (FBG's), which can be imprinted on photosensitized fiber optic cores by means of the use of a transverse holographic method [1]. Such devices have several applications, including the use as distributed strain or temperature sensors being well reviewed in the literature [2], [3]. When operating as a sensor, the measurand is directly associated to the center wavelength of the spectrum of the light the FBG reflects. Therefore, the instrumentation for the interrogation of the FBG must monitor the shift of this center wavelength. Many schemes that implement this task have already been reviewed in the literature [3]. In several cases, a PZT device is used to modulate the optical path in an optical device in order to implement the detection technique. It could be done, among other ways, modulating the length of a matched FBG with a serrodyne signal [4], the coupling length of a WDM coupler [5], or stretching the FBG with an apparatus that alters mechanically the length of the interrogating FBG [6]. Although the techniques that use a tunable FBG to interrogate other FBG sensors are pointed out as very attractive in comparison to others, the operating range of the PZT-driven interrogating element is mechanically limited in a way that it could tune only a few nanometers, when the tuning is done by stretching the fiber. It would be possible to tune over several tens of nanometers if a complex mechanical apparatus were used, as described in the literature [7]. Until now, detection techniques with tunable FBG have been using only matched FBG to interrogate FBG sensors, not requiring the interrogating FBG to be tuned over wider intervals. Due to the limited deformation capacity of the tuning apparatus or to mechanical characteristics of the fiber optic, the tuning range in the FBG is then restricted to a few nanometers, not allowing the multiplexing of even two FBG sensors. If one considers the standard spacing of 3 nm in spectrum between two Bragg wavelengths, a minimum tuning range of 6 nm for the tunable FBG would be required

to multiplex at most two FBG sensors with a dynamic range related to the 3 nm operating interval. Besides, in tunable FBG techniques the interrogating and the interrogated FBG usually have their center wavelengths matching, except when the system uses a simple pre-tuning mechanical apparatus to set the center wavelengths of the FBG at the same value, as described in [8].

In this paper, the use of a FBG bonded to a PZT-driven flexure hinge with paralelogram design is proposed as the interrogating element in a tunable filter configuration [9], so that the FBG sensors can be interrogated in an open-loop operating mode by the interrogating FBG, which is periodically swept by action of the PZT. In this case, there is the possibility of multiplexing more than one FBG sensors and there is no need of using matched FBG. As far as we know, this is the first time that a FBG is used as a multiplexed interrogating element.

II. THEORY

In the tunable filter method, a broadband source is followed by a filter that can be periodically scanned over the whole wavelength operating range of the sensor. This method allows the use of the system in a closed-loop operation, in a way that it could track the center wavelength of the light reflected by a single sensor, or it could be used in a sweep mode, allowing the interrogation of several sensors. In this latter configuration the filter is driven by a scanning triangular-like waveform and also by the dithering signal. The voltage ramp tunes the filter through the whole spectrum range of the sensor, such that a signal proportional to the first-derivative of the spectrum is available at the output of a lock-in amplifier. The lock-in amplifier selects and amplifies only the signal component with a defined phase relation at the dithering frequency. Another advantage of using the first derivative at the lock-in output is that the peak position of the spectral band is determined by the zero-crossing point in the signal, which simplifies the required electronic circuitry for on-board design, and it also permits a better signal discrimination in the spectral peak position.

The interrogation system makes use of a modulated FBG instead of a tunable Fabry-Perot filter as described in the original tunable filter method [9]. In the demonstrated configuration, shown in fig. 1, two multiplexed FBG sensors are interrogated by a tunable FBG, which can sweep typically a 10 nm wide interval starting at the nominal center wavelength of the interrogating FBG. The sweep range is limited only by

physical constraints of the fiber optic in which the FBG was imprinted.

In order to estimate the optimal characteristics of this modulation, the model requires that the spectrum of the light reflected by a FBG be approximated by a gaussian function[10], given by

$$R(\lambda) = R_G e^{-\left(\frac{4 \ln 2}{B_G^2} (\lambda - \lambda_G)^2\right)} \quad (1)$$

where R_G is the peak reflectivity of the FBG, B_G is the grating full-width at half maximum (FWHM) and λ_G is its center wavelength. To determine the intensity of light reflected by the sensor grating after being illuminated by the interrogating FBG, one has to consider the power spectrum of the source, and the gratings reflectivity functions represented by eq. (1). If one is going to use an ASE from an Erbium-doped fiber amplifier to illuminate the gratings, it is necessary that they operate in a spectral interval where the power spectrum is approximately constant, that lies around 1540 nm in the EDFA case. As a consequence, the light reflected by the sensor with reflectivity function $R_1(\lambda)$, after receiving light from the tunable FBG with function $R_2(\lambda)$, which is illuminated by the ASE/EDFA source with constant spectrum power S_λ , is given by:

$$I = S_\lambda \int_{-\infty}^{\infty} R_1(\lambda) R_2(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

If the integral is solved using the gaussian functions of eq. (1) for both FBG, the above integral leads to

$$I = \sqrt{\pi} \frac{S_\lambda B_1 B_2 R_1 R_2 e^{-\left(\frac{4 \ln 2}{B_1^2 + B_2^2} (\lambda_2 - \lambda_1)^2\right)}}{\sqrt{4 \ln 2 (B_1^2 + B_2^2)}} \quad (3)$$

where R_1 and R_2 are the the peak reflectivities of the Bragg grating sensor and the tunable FBG, B_1 and B_2 are the gratings full-width at half maximum (FWHM), and λ_1 and λ_2 their center wavelengths. Following the analysis in [11], it is easy to see that the intensity depends only on R_1 , R_2 , B_1 , B_2 , S_λ and on the wavelength mismatch $\delta = \lambda_2 - \lambda_1$.

A. Description of the system

The system is depicted in fig. 1. It uses three FBG: a tunable FBG (TFBG) for spectral scanning and the sensors(BGS) being interrogated. One of them is kept unperturbed and close to the other and is used to compensate temperature variations during the system characterization. The tunable FBG serves as a tunable reflection filter modulated by the dither signal and by a low frequency sawtooth waveform (1 Hz with 100 V peak voltage) that causes the center wavelength of the reflected light to simultaneously oscillate at a determined frequency(100 Hz) and scan the spectral interval of operation of the sensors. This FBG is bonded on both ends to a piezoelectrically driven flexure hinge with paralelogram design. The other BGS is bonded on one end to a metallic moveable platform and on the other end, to a fixed metallic platform and will be stretched by a micro-step motor. The unperturbed reflection spectrum of the light reflected by the sensor is centered at 1538.44 nm

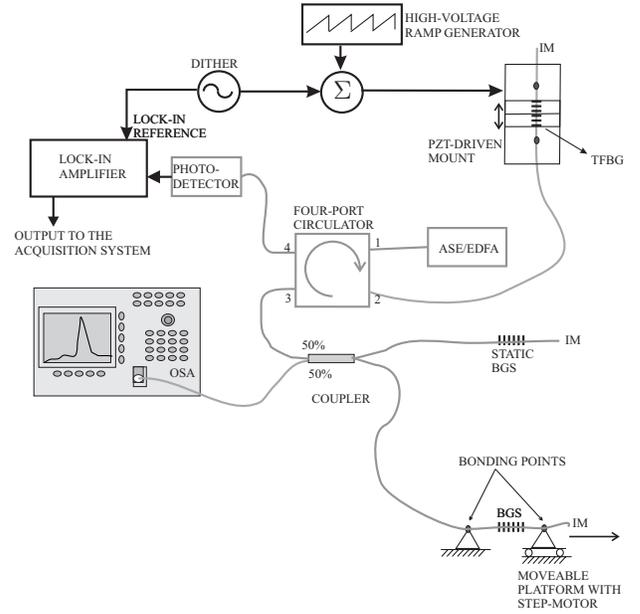


Fig. 1. Schematic diagram of the optical circuit and the piezo system for the interrogation system. Thick gray lines represent single-mode fiber in the optical circuit; thick black lines represent the electrical circuit; thin black lines represent the direction of movement in the moveable parts. (IM = Index matching gel)

with bandwidth (FWHM) 0.34 nm. The static BGS has a center wavelength at 1541.35 nm with bandwidth (FWHM) 0.36 nm. Both gratings were recorded at our Institute using standard phase-mask interferometer technique.

Light from a broadband source is launched into the system by means of port 1 of a four-port fiber optic circulator. Light is directed to port 2, where the tunable Bragg grating is connected. Signal reflected by this TFBG is coupled to a 3 dB-coupler through port 3 of the circulator. Two FBG sensors are connected to this coupler. A sample of the optical signal reflected by them is monitored by an optical spectrum analyser (Anritsu MS9710A) while the sensor is being stretched. Part of the reflected signal is also re-coupled to port 3 of the circulator and the resulting signal is acquired by a photo-detector at port 4. The detection circuit is connected to a lock-in amplifier that uses as reference a replica of the dither signal. The center wavelength of the TFBG has an unperturbed nominal center wavelength value of 1537.38 nm. The modulation index of the dithering is set by the peak-to-peak amplitude of the dither signal, previously set to 3 V. Considering that the TFBG has a sensitivity of 0.076 nm/V, this figure corresponds to a spectral modulation of 0.23 nm, which is determined to give a maximum output in the lock-in for a given gain in the lock-in amplifier.

B. Determining the optimum dithering modulation

Following the analysis in [11] for a reflective arrangement in the tunable filter method, it is possible to determine theoretically the optimum modulation index for the dithering signal, which will be added to the sawtooth waveform applied to the

PZT.

Let $\Delta\lambda$ be the dither amplitude, then the AC intensity modulation is given by the following equation:

$$I_{ac} = Ke^{-\left(\frac{4\ln 2}{B_1^2+B_2^2}(\delta+\Delta\lambda)^2\right)} - Ke^{-\left(\frac{4\ln 2}{B_1^2+B_2^2}(\delta-\Delta\lambda)^2\right)} \quad (4)$$

where $K = S_\lambda B_1 B_2 R_1 R_2 \sqrt{\pi} / \sqrt{4 \ln 2 (B_1^2 + B_2^2)}$. In order to obtain the optimum dither deviation that gives a maximum output in the lock-in amplifier, eq. (4) must satisfy the relation:

$$\frac{\partial}{\partial(\Delta\lambda)} \left[\frac{\partial I_{ac}}{\partial \delta} \right]_{\delta=0} = 0 \quad (5)$$

From eq. (5) one obtains the same optimum wavelength deviation that is obtained in a system in the transmissive configuration, given by:

$$\Delta\lambda_{opt} = \sqrt{\frac{B_1^2 + B_2^2}{8 \ln 2}} \quad (6)$$

For the used BGS and TFBG, an optimum dither amplitude of 0.21 nm is calculated, close to the value of 0.23 nm experimentally obtained. For a higher value of the dither amplitude, the intensity does not show a relevant variation. Above a certain threshold, there is a distortion in the shape of the lock-in signal, that might lead to errors in the measurement of the zero-crossing point.

III. DESCRIPTION OF THE EXPERIMENT

By applying a periodic ramp voltage to the piezo-electric mount, the TFBG center wavelength is tuned to higher values starting at its nominal value. It is then possible to monitor the spectral position of the peak of the BGS reflection spectrum when the sensor is perturbed, looking at the convolution between the interrogated and interrogating reflection spectra. A maximum intensity of light at the photo-detector is obtained when the Bragg wavelengths of both FBG match. In addition, the sinusoidal voltage applied to the PZT will modulate the detected signal, causing the intensity of the detected light to oscillate if there is spectral overlap of the spectra of the light reflected by the TFBG and BGS. If both FBG have their center wavelengths exactly matching, the detected signal will have no fundamental at the dither frequency. Generally, the amplitude of that fundamental component will indicate whether the TFBG center wavelength is equal, smaller or greater than center wavelength of the BGS.

If the BGS is systematically stretched, as it is done in the characterization of the system, this process will cause a linear shift of the BGS center wavelength along its region of operation. This shift is translated into a time shift of the zero-crossing point in the acquired data at the lock-in amplifier output. Since there are two sensors being monitored, a temperature variation in the static BGS can also shift the corresponding zero-crossing point. The characterization is done measuring the distance in time between zero-crossing points from the two sensors and relating this difference to the strain variation at constant temperature.

A. Description of the characterization

In order to characterize the system, the configuration depicted by fig. 1 is used. A step-motor stretches stepwise the BGS and during this process the spectrum of the reflected light will be monitored by an optical spectrum analyser, where the center wavelength of the spectra is recorded. The step-motor induces strains of as much as 1.7 mstrain in the sensor in 0.040 mstrain increments. The relation between the strain induced shift and the distance between the center wavelength of both sensors shows a sensitivity of 1.25 nm/mstrain. An oscilloscope (TDS220/Tektronix) simultaneously records the lock-in amplifier output and the modulation signal consisting of a ramp and a sinusoidal voltage. Once the ramp is calibrated with a wavelength scale, any point in the lock-in output can be associated to a wavelength value, although it is acquired with a time scale, which can also be associated to this wavelength scale. The graph in fig. 2 shows the ramp with the dither modulation (top) and the corresponding lock-in output voltage (bottom) for unperturbed sensors. The distance between zero-crossing points that is measured is also illustrated by Δt .

Moreover, the lock-in output is digitally filtered with a 50-th order low-pass filter with cut-off frequency in 10 Hz in order to minimize electrical noise in the system.

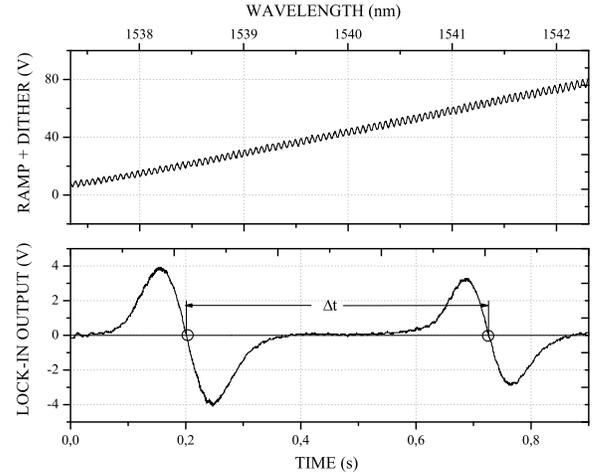


Fig. 2. Typical signal obtained with the acquisition system: on top graph, the ramp signal modulating the PZT; on bottom graph, the corresponding unfiltered lock-in output and the time distance Δt between zero-crossing points.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

In the graph in fig. 4 the behaviour of one of the perturbed sensors is shown by a series of filtered lock-in output data. The time difference between zero-crossing points obtained from this series of data is related, after conversion to the wavelength scale, to the induced strain in the sensor; the relation between strain and time interval is clearly linear, as can be seen in fig. 3. In fig. 4, although the static BGS is kept unperturbed,

the zero-crossing points corresponding to this sensor do not match exactly due to discretization errors. A slight fluctuation of temperature, in the order of 1 K was also noticed during the experiment, but this maintains the characterization unaffected, since the difference between zero-crossing points are being determined for both gratings subjected to the temperature changes.

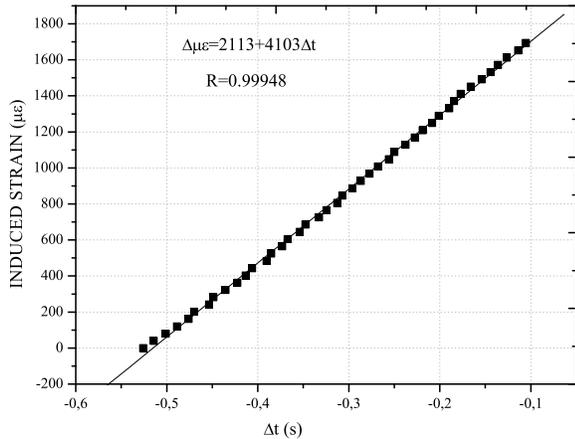


Fig. 3. Response of the system to induced strain in one of the sensors. In the x-axis, the time distance between zero-crossing points. In the y-axis, the induced strain.

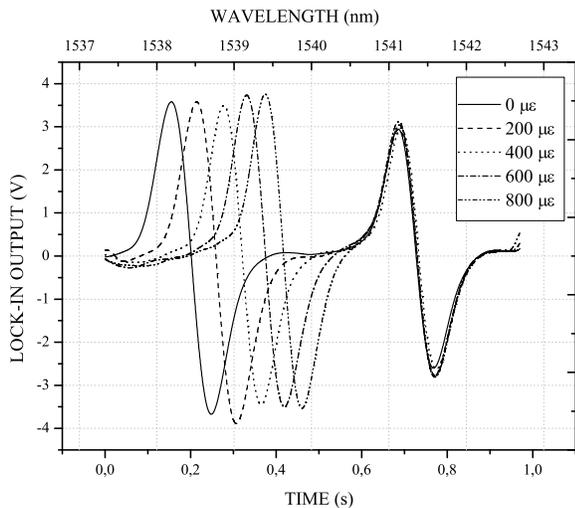


Fig. 4. Lock-in output data illustrating the behaviour of the signal after strain is induced in one of the sensors. From these data, time shifts in the zero-crossing point can be obtained.

From the graph in fig. 3, the sensitivity is shown to be 4.103 mstrain/s. Considering that the RMS fluctuation of the zero-crossing points was 0.00377 s, and the utilized time-constant in the lock-in was 1 s, the static strain resolution can

be determined as $0.01548 \text{ mstrain}/\sqrt{\text{Hz}}$ for this sensitivity. This fluctuation can be attributed to the intrinsic hysteretic behavior of the piezo-electric mount. The system was set to operate only on the uprise of the ramp signal, even though that fluctuation could not be eliminated, only minimized. The duty-cycle in the ramp signal was always set to values greater than 90%, since the mechanical inertia of the piezo mount did not show any influence on the resolution for frequencies of the ramp signal below 25 Hz, but this subject will be studied in a forthcoming article.

The dynamic range of the system depends on how far the center wavelength of a sensor is spectrally apart from a consecutive one. In the characterization experiment, the center wavelengths of the sensors were 2.91 nm apart, which allows a dynamic range of 2.33 mstrain for a 1.25 nm/mstrain BGS sensitivity. Since the piezo mount can stretch the tunable FBG along a 10 nm wide interval, there would be the possibility of multiplexing up to three BGS with this dynamic range. Operation in a 12 nm wide interval is observed and can be improved respecting the 1% elastic limit for the elongation of the fiber optic length.

One interesting property of the system is its capacity to show the spectrum profile of the sensors, as is depicted on the picture in fig.5. In this case, the signal driving the piezo mount must be without dither, and the whole system works as an optical spectrum analyzer, if the ramp voltage is calibrated with the wavelength scale. This result is similar to that presented by Ferreira *et al* [4].

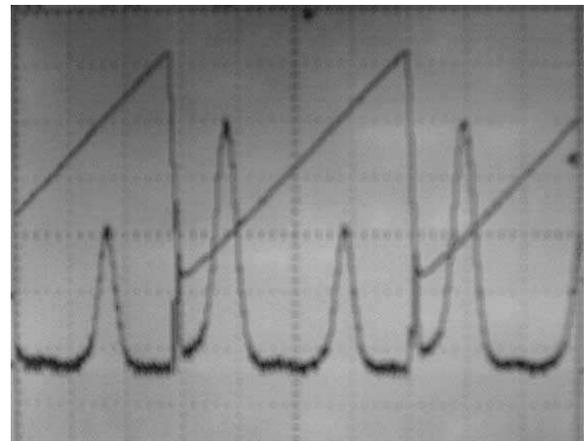


Fig. 5. Picture of the oscilloscope screen showing the spectrum profile of the light reflected by the sensors using only the ramp signal without dither modulation.

V. CONCLUSION

This paper proposed the use of a modulated FBG to interrogate FBG sensors using the elongation of the fiber with a piezo mount as a means to tune the FBG and address spectrally the sensors. The tunable filter method as proposed by Kersey *et al* [9] is adapted for this configuration in a way that the cost of the system decreases relatively, because it avoids the use of a Fabry Perot filter, whereas lock-in detection

based on the optical wavelength modulation is preserved. Another advantage of the system is that it works with the first derivative technique, where the peak position of the spectral band is determined by the zero-crossing point in the signal, simplifying the required electronic circuitry for on-board design, and permitting also a better signal discrimination in the spectral peak position. It is demonstrated the operation of the system in an open-loop configuration with a ramp signal driving the piezo-electric mount and a sinusoidal signal as a dither and reference for detection. A static strain resolution of $0.01548 \text{ mstrain}/\sqrt{Hz}$ was obtained with a dynamic range of 2.33 mstrain. The system can also operate in real-time mode, monitoring frequencies of a few Hertz, limited only by the mechanical characteristics of the stretching apparatus.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Agência Nacional do Petróleo (ANP) and the Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) for the financial support by means of the Human Resources Program of the ANP in the Gas and Oil Sector (PRH-ANP/MCT - PRH10 - CEFET-PR); the CAPES, CNPq and Fundação Araucária for the support to the laboratory.

REFERENCES

- [1] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Optics Letters*, vol. 14, no. 823, 1989.
- [2] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1263–1276, 1997.
- [3] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1442–1463, 1997.
- [4] L. A. Ferreira, J. L. Santos, and F. Farahi, "Pseudoheterodyne demodulation technique for fiber Bragg grating sensors using two matched gratings," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, no. 4, pp. 487–489, 1997.
- [5] C. J. Misas, F. M. M. Araújo, L. A. Ferreira, J. L. Santos, and J. M. López-Higuera, "Fiber bragg sensors interrogation based on carrier generation by modulating the coupling length of a wavelength-division multiplexer," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, no. 5, pp. 750–755, 2000.
- [6] Y. Zhao and Y. Liao, "Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 41, pp. 1–18, 2004.
- [7] A. Iocco, H. G. Limberger, R. P. Salathé, L. A. Everall, K. E. Chisholm, J. A. R. Williams, and I. Bennion, "Bragg grating fast tunable filter for wavelength division multiplexing," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 7, pp. 1217–1221, 1999.
- [8] A. S. Paterno, V. de Oliveira, T. S. Figueredo, and H. J. Kalinowski, "Tunable filter interrogation method with a modulated fiber bragg grating," *International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC*, 2005.
- [9] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "Multiplexed filter Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter," *Optics Letters*, vol. 18, no. 16, pp. 1370–1372, 1993.
- [10] V. Mizrahi and J. E. Sipe, "Optical properties of photosensitive fiber phase gratings," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 11, no. 10, pp. 1513–1517, 1993.
- [11] M. G. Xu, H. Geiger, and J. P. Dakin, "Modeling and performance analysis of a fiber Bragg grating interrogation system using an acousto-optic tunable filter," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 391–396, 1996.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FERREIRA L. A., SANTOS J. L., FARAH F., **Pseudoheterodyne demodulation technique for fiber Bragg sensor using two matched gratings**. Photonics Technology Letters. Vol. 9, no. 4, 1997.

FIGUEREDO, T.S., KALINOWSKI, H. J., MARTELLI, C., **Sistema para caracterização de redes de Bragg**, VIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica, CEFET/PR, 2003.

GEORGIU, H. M. S., BEN MRAD, R., **Experimental and theoretical assessment of PZT modeled as RC circuit subject to variable voltage excitations**. Mechatronics, 14 (2004) 667 – 674.

GIALLORENZI, T. G., BUCARO J. A., ANTHONY D., SIGEL JR., G. H., COLE J. H., RASHLEIGH S. C., and PRIEST R. G., **Optical fiber sensor technology**. Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-30, n. 4, 1982.

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

KERSEY, A. D., BERKOFF, T. A., MOREY, W. W., **High resolution fiber Bragg grating based strain sensor with interferometric wavelength shift detection**. Electronics Letters, v. 28, p. 236, 1992.

KERSEY, A. D., BERKOFF, T. A., MOREY, W. W., **Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter**. Optics Letters, v. 18, n. 16, p. 1370 – 1372, 1993.

KERSEY, A. D., DAVIS, M. A., PATRICK, H. J., LEBLANC, M., KOO, K. P., **Fiber grating sensors**. Journal of Lightwave Technology, v. 15, n. 8, p. 1442 – 1463, 1997.

MARTELLI, C., **Termômetro para altas temperaturas (0 - 400°C) com redes de Bragg em fibra ótica**, Dissertação de mestrado, CEFET/PR 2003 (seção 4.3 e 5.2).

MEADE, M. L., **Advances in lock-in amplifiers**, Journal of Physics E: Scientific Instrument., v. 15, 1982.

MELLE, S. M., LIU, K., MESURES, R. M., **A practical fiber optic Bragg grating strain gauge system**, Applied Optics, v. 32, n. 19, pp. 3601-3609, 1993.

OTHONOS, A., KALLI, K., **Fiber Bragg grating – fundamentals and applications in telecommunications and sensing**. Artech House, 1999.

SALEH, B. E.A., TEICH, M. C., **Fundamental of Photonics**, New York, John Wiley & Sons, p. 69 – 70, 1991.

SILVA, J. C. C., FALATE, R., NOGUEIRA, R. N., KALINOWSKI, H. J., FABRIS, J. L., PINTO, J. L., **Production of fiber Bragg gratings in phase mask interferometers**, Proc. 4th Conference on Telecommunications, Aveiro, Portugal, 449-451 (2003).

ZHAO, Y., LIAO Y., **Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors**. Optics and Lasers in Engineering, 41 (2002) 1-18.



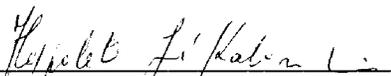
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG^a ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

“Leitura de Redes de Bragg por Modulação Ótica”

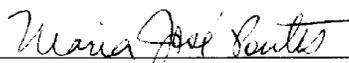
por

Valmir de Oliveira

Esta Dissertação foi apresentada no dia 08 de Abril de 2005, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Informática Industrial. Aprovada pela Banca Examinadora composta pelos professores:



Prof. Dr. Hipolito J. Kalinowski
(Orientador - CEFET-PR)



Prof. Dr. Maria José Pontes
(IME-RJ)



Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva
(ALL)

Visto e aprovado para impressão:



Prof. Dr. José Luís Fabris
(Coordenador do CPGEI)

RESUMO:

Neste trabalho é apresentado um sistema de leitura de redes de Bragg derivado da técnica por filtro Fabry-Perot sintonizável. A técnica apresentada é implementada através de um sistema atuador piezelétrico que modula mecanicamente uma rede de Bragg de referência, com seu espectro de reflexão convoluído com o espectro de reflexão de uma rede sensora.

A técnica desenvolvida apresenta vantagens em relação ao processo original por ter implementação mais simples, menor custo e melhor discriminação de posição espectral.

PALAVRAS-CHAVE

Redes de Bragg, Sistemas de Leitura de Redes de Bragg, Demodulação Espectral.

ÁREA/SUB-ÁREA DE CONHECIMENTO

3.04.06.03-4 Teoria Eletromagnética, Microondas, Propagação de Ondas, Antenas.

3.04.02.04-2 Instrumentação Eletrônica.

3.04.05.00-9 Eletrônica Industrial, Sistemas e Controles Eletrônicos.

Ano 2005

Nº: 368