4 Modida

Medida simultânea de temperatura-pressão com uma única rede de Bragg usando demodulação baseada em dois filtros fixos

4.1. Introdução

Sensores FBGs são sensíveis a variações de deformação e temperatura e, em casos cuja deformação é axial, ambos induzem o mesmo tipo de alteração do espectro, ou seja, resultam em uma variação no comprimento de onda. Em muitas aplicações existe a necessidade de obter essas duas informações separadamente, mas com uma única rede torna-se difícil a discriminação. Existem inúmeras técnicas que têm o objetivo de discriminar as influências da temperatura e da deformação no sinal proveniente da FBG. Uma forma é trabalhar com duas redes, sendo uma delas usada como referência, sensível à temperatura e isolada dos efeitos mecânicos [4]. Existe, ainda, a possibilidade de usar um sistema híbrido FBG/LPG (*Long-period grating*) [4]. Outra seria baseada na combinação de duas redes de Bragg gravadas em fibras com diferentes materiais [27].

O trabalho apresentado neste capítulo consiste em determinar essas duas grandezas físicas (temperatura e pressão) simultaneamente usando a técnica de demodulação baseada em filtros fixos empregando apenas um sensor FBG gravado em uma fibra óptica de baixa birrefringência, que quando sujeito a compressão seu espectro se divide em dois. Para essa técnica ser aplicada, faz-se necessário usar um número mínimo de dois filtros fixos, de forma a associar as duas grandezas físicas com as intensidades medidas nos fotodetectores.

4.2. Sensor a rede de Bragg submetido a uma compressão transversal

Como foi apresentado no capítulo 2, quando uma rede de Bragg é exposta a uma compressão transversal, por ser um material fotoelástico, o índice de refração muda, quebrando a simetria cilíndrica da fibra. Esta mudança provoca uma separação em dois picos no espectro de reflexão da rede Bragg, onde cada pico está associado a um estado de polarização linear. A equação que rege esse efeito em conjunto com a influência da temperatura é dada por

$$\Delta\lambda_{Bx} = -n_{eff}^2 \frac{\lambda_B}{2} \Big[p_{11}\varepsilon_x + p_{12}\varepsilon_y \Big] + \lambda_B \alpha \Delta T$$
(4.1)

$$\Delta\lambda_{By} = -n_{eff}^2 \frac{\lambda_B}{2} \left[p_{11}\varepsilon_y + p_{12}\varepsilon_x \right] + \lambda_B \alpha \Delta T$$
(4.2)

onde y e x correspondem às componentes da polarização da luz, n_{eff} é o índice de refração efetivo no núcleo da fibra, p_{11} e p_{12} são os coeficientes fotoelásticos, ε_i são os componentes de deformação mecânica, α é o coeficiente de dilatação térmica da fibra, *T* é a temperatura.

As expressões (4.1) e (4.2) indicam que, quando uma compressão transversal é aplicada à FBG com a temperatura constante, dois picos de reflexão são observados, e a separação entre eles será proporcional à força transversal aplicada. Além disto, pode ser verificado também que se a FBG for submetida a uma força constante, variando a temperatura, os dois picos sofrerão a mesma alteração em comprimento de onda, pois os termos associados à temperatura são iguais para ambos os picos. A intensidade da luz que é refletida da rede submetida à compressão dependerá da polarização da luz incidente. Variando a polarização de entrada observa-se uma variação na intensidade dos espectros dos dois picos. Transdutores de pressão baseados neste princípio têm sido demonstrados [26,31].

4.3. Montagem experimental e resultados

A figura 4.1 ilustra o esquema experimental usado, no qual foram obtidos os dados. O sistema óptico foi composto de uma fonte de luz de largura espectral ampla (ASE), dois filtros de transmissão usando DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) comercial com 16 canais, sensor a rede de Bragg (FBG), acopladores, um medidor de potência óptica de alta sensibilidade, e um analisador de espectro óptico (OSA) que foi usado para monitorar o comprimento de onda de Bragg do sensor, podendo ser usado para calibrar o sistema. Após a calibração, o OSA deve ser substituído por um fotodetector de referência.

É comum, usando sensores FBG, realizar medidas indiretas através de transdutores mecânicos, convertendo a quantidade de interesse em alongamento da fibra, que se traduz na variação do comprimento de onda de Bragg, proporcional à deformação longitudinal. Dois problemas são comuns a este processo. O primeiro é que variações da temperatura também afetam o espectro refletido, enquanto o outro é a necessidade de se fixar a rede ao corpo do transdutor.

O transdutor pode ser sujeito, por um longo período, a severas condições tais como alta temperatura, tensão e umidade. Embora haja soluções aceitáveis, é interessante ter o efeito de temperatura independente do efeito de deformação e um mecanismo para obter deformação na FBG que não dependa de colagem.

Para superar os problemas da discriminação temperatura-pressão e da colagem foi desenvolvido um transdutor, sem o uso de cola, que converte a pressão atuante em compressão transversal à FBG e, com isso, uma separação em dois picos foi possível. Os detalhes do transdutor mecânico não serão descritos aqui por motivo de patente. A diferença de comprimento de onda entre eles é proporcional à pressão e a variação deles como um todo, proporcional à temperatura. Com este transdutor foi possível aplicar uma pré-carga, melhorando a sensibilidade e flexibilidade do sistema. E, para garantir uma distribuição uniforme da potência entre os dois modos de polarização, a fonte usada era não polarizada.

No esquema apresentado na figura 4.1, a luz da fonte ilumina o sensor FBG, sendo refletida na faixa do comprimento de onda de Bragg e, em seguida, se divide em dois caminhos após passar pelo segundo acoplador, um deles na direção do OSA, que serve para monitorar os comprimentos de onda de Bragg do sensor, enquanto o outro é novamente dividido, passando pelos filtros do DWDM até chegar aos medidores de potência óptica, de forma a realizar medidas simultâneas.

Capítulo 4– Medida simultânea de temperatura-pressão com uma única rede de Bragg usando demodulação baseada em dois filtros fixos



Figura 4.1 - Esquema experimental do sistema capaz de realizar medidas simultâneas de temperatura e pressão, usando filtros fixos

Foram escolhidos dois canais do DWDM com comprimento de onda de 1555.78 nm e 1560.63 nm e largura espectral, FWHM, de 0.83 nm e 0.85 nm, respectivamente. Esta escolha foi baseada nas características da rede de Bragg sem compressão, que possuía um comprimento de onda de 1555.63 nm com FWHM de 1.2 nm e com uma pré-carga que produzia um deslocamento entre os picos de aproximadamente 2 nm. Os espectros da rede de Bragg e dos filtros são apresentados na figura 4.2.



Figura 4.2 - Espectros dos filtros e do sensor (FBG) sujeito a uma pré-carga

O processo experimental iniciou-se com o posicionamento dos filtros e com a pré-carga adequada. Em seguida foi sendo aplicada a pressão gradualmente no transdutor com uma incerteza de 0.15psi, mantendo a temperatura constante. Este processo foi repetido, variando a temperatura. Para cada temperatura fixa foram feitos ciclos de pressão. A variação da temperatura foi obtida colocando o transdutor em um forno cuja incerteza na medida era de 2° C.

Os resultados experimentais obtidos, com o auxílio do analisador de espectro óptico, são apresentados na figura 4.3. Nesta figura é mostrada a variação do comprimento de onda de Bragg para os dois picos, associados a cada uma das polarizações, em função da pressão para diferentes temperaturas.



Figura 4.3 - Variação do comprimento de onda do sensor em função da pressão para diferentes temperaturas

Na figura 4.3 é possível observar que a variação do comprimento de onda de Bragg para a polarização x é maior que para a polarização y por causa das propriedades fotoelásticas do material da fibra óptica. A partir destes resultados fica claro que é fácil associar a pressão e a temperatura com os comprimentos de onda dos diferentes picos.

No mesmo momento em que foram obtidos os dados experimentais com o auxílio do OSA, foram tomadas as potências ópticas lidas em cada fotodetector após passar pelos respectivos filtros do DWDM. Os resultados experimentais das potências ópticas (fotodetector 1 - símbolo sólido / fotodetector 2 - símbolo aberto) em função da pressão para diferentes temperaturas com seus respectivos ajustes são apresentados na figura 4.4.

Capítulo 4– Medida simultânea de temperatura-pressão com uma única rede de Bragg usando demodulação baseada em dois filtros fixos



Figura 4.4 - Potência óptica lida nos fotodetectores 1 e 2

Procurando diminuir os erros experimentais foram obtidas curvas de ajuste e para ampliar o campo de medição os dados foram extrapolados. Considerando esses novos valores, são apresentadas, nas figuras 4.5 (a) e (b), as potências ópticas obtidas em cada fotodetector em função da temperatura e da pressão. Na figura 4.5 (c) são ilustradas linhas de mesma potência em um campo escalar relativas aos dois fotodetectores.



Fotodetector 1(linha cheia) e Fotodetector 2(linha tracejada)



Figura 4.5 - (a) potência óptica lida no fotodetector 1; (b) potência óptica lida no fotodetector 2; (c) linhas de mesma potência, fotodetectores 1 e 2

Para efetuar a leitura usando as informações contidas nestes gráficos basta entender que para cada ponto de interseção das linhas de mesma potência de cada fotodetector corresponde uma determinada temperatura e pressão. Por exemplo, considere a interseção (círculo na figura 4.5(c)) da linha de mesma potência cheia (fotodetector 1) igual a 1.408 μ W e a linha de mesma potência tracejada (fotodetector 2) igual a 0.139 μ W: os valores de pressão e temperatura correspondentes, de aproximadamente 229 psi e 35°C, são determinados de maneira única. Considerando que as curvas de calibração baseadas nos dados experimentais das figuras 4.4 e 4.5 foram obtidas com exatidão, as incertezas nas medições da pressão e da temperatura serão associadas às incertezas nas medidas de potência que, conforme discutido anteriormente no capítulo 3 podem ser estimadas por:

$$\delta P = \sqrt{\left(\delta I_1 \left| \frac{dI_1}{dP} \right|^{-1} \right)^2 + \left(\delta I_2 \left| \frac{dI_2}{dP} \right|^{-1} \right)^2} \tag{4.3}$$

$$\delta T = \sqrt{\left(\delta I_1 \left| \frac{dI_1}{dT} \right|^{-1} \right)^2 + \left(\delta I_2 \left| \frac{dI_2}{dT} \right|^{-1} \right)^2} \tag{4.4}$$

onde, I_1 e I_2 são as potências ópticas medidas pelos fotodetectores 1 e 2 respectivamente. Utilizando novamente a relação que considera a incerteza associada a 0.1 % da potência medida no limite de baixa freqüência

$$\delta I_i = 10^{-3} I_i \tag{4.5}$$

e através de (4.3) e (4.4), podem ser obtidas as incertezas nas medidas, associadas à pressão e a temperatura. Estas incertezas podem ser vistas nas figuras 4.6 e 4.7.

Pode ser observado pela figura 4.6 que a máxima incerteza associada à pressão é de 4 psi em uma faixa dinâmica de 400 psi, enquanto que na figura 4.7 a máxima incerteza associada à temperatura é de 0.1°C, em uma faixa de 22°C. No exemplo mostrado da figura 4.5, onde foram obtidos os valores de pressão e temperatura iguais a 229 psi e 35°C, os valores de incerteza associados são 3 psi e 0.1°C, respectivamente.

Capítulo 4– Medida simultânea de temperatura-pressão com uma única rede de Bragg usando demodulação baseada em dois filtros fixos



Figura 4.6 - Incerteza estimada para medida da pressão



Figura 4.7 - Incerteza estimada para medida da temperatura

4.4. Simulação numérica e validação teórico-experimental

Uma forma de prever os resultados desejados, visando otimizá-los, é usar simulações numéricas. Para tal processo é necessário validar a teoria proposta em relação aos dados experimentais. Até então, a rede de Bragg era considerada como uma função de uma única variável. Neste capítulo a rede de Bragg varia em função de duas variáveis, pressão e temperatura. Além disso, seu perfil espectral é deformado devido à pressão. Com base nas aproximações teóricas apresentadas no

capítulo 3, será feita uma extensão, considerando agora os efeitos induzidos na rede devido à presença dessas duas variáveis.

Estando a rede de Bragg sujeita a uma temperatura, T, e uma força transversal que pode ser relacionada com a pressão, P, o comprimento de onda de Bragg associado será expresso como uma função destes dois parâmetros e pode ser dado por:

$$\lambda_{Bi}(T,P) = \lambda_{0i} + \Delta \lambda_{Pi}(P) + \Delta \lambda_{Ti}(T), i = 1, 2.$$
(4.6)

onde λ_{0i} são as posições dos comprimentos de onda de Bragg iniciais relativos às polarizações *x*, *y*; *i* representa as duas direções de polarização.

Como já foram apresentados antes, os espectros das redes foram representados por funções gaussianas simples, e foi comprovado ser um bom ajuste, aqui não será diferente. A única mudança será a substituição da gaussiana simples por uma combinação de gaussianas buscando uma melhor aproximação. Matematicamente os espectros podem ser dados por

$$S_{i}(\lambda) = yo + So \exp\left[-\alpha(\lambda - \lambda_{Bi})^{2}\right]$$
(4.7)

$$A_{i}(\lambda) = 1 - \sum_{j} A o_{ij} \exp\left[-\alpha_{ij} \left(\lambda - \lambda_{ij}\right)^{2}\right], \text{ onde } \lambda_{ij} = \lambda_{Bi} - \Delta\lambda_{j}$$

$$(4.8)$$

$$Sr_i(\lambda) = \frac{S_i \cdot A_i}{2} \tag{4.9}$$

assim o espectro do sensor é definido como

$$S(\lambda) = Sr_1 + Sr_2 \tag{4.10}$$

onde A_i está associado aos picos laterais. A importância de tomar uma função que leva em consideração os picos laterais não simétricos se torna relevante, pois o espectro da rede é quase apodizado [8,9]. O resultado desse ajuste é apresentado na figura 4.8 (a) e pode-se observar que a escolha da função foi bem sucedida.



(a)



(b)

Figura 4.8 - (a) Espectro do sensor a rede de Bragg com e sem pré-carga. (b) Espectro dos filtros. Pontos: resultados experimentais; linhas sólidas: simulação

Foi usado o DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) como filtro de transmissão, cujo espectro pode ser representado por

$$F_{k} = \sum_{m} yo_{Fk} + Fo_{k} \exp\left[-\alpha_{Fk} (\lambda - \lambda_{Fkm})^{2}\right], \text{ onde } \lambda_{Fkm} = \lambda_{Fk} + \Delta\lambda_{m}, k = 1, 2.$$

$$(4.11)$$

onde *k* designa os filtros 1 e 2. A equação é um somatório de gaussianas, cuja largura espectral está relacionada com α_{Fk} , e com a posição de cada uma delas, λ_{Fkm} . Ajustando estes parâmetros é possível representar os espectros do DWDM, com exatidão, como mostrado na figura 4.8 (b).

A convolução entre o sensor, representado pela rede de Bragg, e o filtro de transmissão, representado pelo DWDM, é definida por

Fotodetector
$$k(T, P) = \beta \int_{-\infty}^{\infty} S(\lambda, T, P) \cdot F_k(\lambda) d\lambda$$
, (4.12)

onde β é uma constante que depende da fonte e da perda do sistema. As potências lidas nos fotodetectores equivalem a estas integrais de superposição.

Para simular os resultados experimentais com base na teoria apresentada acima é necessário obter algumas relações, que devem ser tiradas dos resultados experimentais. Pela teoria, o comprimento de onda de Bragg relativo a cada polarização está relacionado com a temperatura e a pressão por meio da equação (4.6). Através dos resultados apresentados na figura 4.3, podem-se extrair tais relações. Os valores de variação do comprimento de onda em função da temperatura foram obtidos a partir da subtração dos valores de comprimento de onda obtidos como referência, no caso temperatura de 24°C (temperatura ambiente) com ciclo de pressão de 0 a 400 psi, pelos outros valores extraídos com temperaturas distintas. Para cada valor de pressão foi obtido um valor de variação de comprimento de onda e, considerando um ciclo de pressão com a temperatura constante foi tomado seu valor médio. A figura 4.9 (a) e (b) mostra este resultado.

Analogamente foi feita a mesma análise para a variação do comprimento de onda de Bragg em função da pressão, para os dois picos, mostrada na figura 4.10(a) e (b).



Figura 4.9 - Ajuste da variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura: (a) primeiro pico, (b) segundo pico



Figura 4.10 - Ajuste da variação do comprimento de onda em função da pressão: (a) primeiro pico, (b) segundo pico

De posse das variações do comprimento de onda de Bragg relativos à pressão e à temperatura é possível, usando as equações (4.6), (4.10), (4.11) e (4.12), prever os valores lidos nos fotodetectores com bastante proximidade dos valores reais. Nas figuras 4.11 (a) e (b) e, 4.12 (a) e (b) são apresentados os valores experimentais e simulados, respectivamente, lidos nos fotodetectores 1 e 2 em função da temperatura e da pressão, sendo todos os valores normalizados.



Figura 4.11 - Distribuição dos valores de potência normalizada no fotodetector 1 em função da temperatura e da pressão. (a) Experimental; (b) simulação



Figura 4.12 - Distribuição dos valores de potência normalizada no fotodetector 2 em função da temperatura e da pressão. (a) Experimental; (b) simulação

Pelos resultados apresentados nas figuras 4.11 e 4.12 pode ser observado que os valores obtidos por meio de simulações numéricas, baseadas na teoria aqui proposta, apresentam boa concordância com os valores experimentais.

4.4.1. Exemplo otimizado

Com a validação da teoria podem ser simulados casos em busca da otimização do sistema tentando melhorar faixa de operação, mantendo baixa incerteza. Para isto os valores de largura espectral dos filtros e sensor foram alterados, juntamente com as suas posições. No exemplo mostrado na figura 4.13

os valores considerados foram os seguintes: comprimento de onda dos picos do espectro do sensor, devido à pré-carga, iguais a 1555.7 e 1557.5 nm; comprimento de onda dos filtros DWDM iguais a 1555.7 e 1561.9 nm; larguras espectrais, FWHM, do sensor igual a 2 nm e dos filtros, 2.5 nm.



Figura 4.13 - Distribuição dos valores de potência normalizada, fotodetectores 1 (a) e 2 (b)

Com estes valores foi possível aumentar a faixa de operação relativa a temperatura, de 25 °C para 70 °C. A priori, consideramos mais relevante aumentar a faixa operação da temperatura, tendo em vista que a faixa de operação relativa à pressão pode ser ajustada por meio do transdutor usado. As incertezas obtidas nessa nova configuração são ilustradas na figura 4.14.



Figura 4.14 - Incerteza na pressão (a) e na temperatura (b)

Na figura 4.14 (a) pode ser observado que o valor máximo de incerteza na pressão é de 4 psi, correspondendo a 1% da faixa de operação, desconsiderando o pequeno distúrbio próximo dos valores (0,0). Em relação à incerteza na temperatura, figura 4.14 (b), o seu valor máximo é de ordem de 0.4 °C, o que representa 0.6 % da faixa de operação.

Confrontando os resultados apresentados nas figuras 4.6 e 4.7 com os resultados apresentados nas figuras 4.14 (a) e (b), pode ser observado que ajustando as posições dos filtros é possível aumentar a faixa de operação da temperatura de 22 °C para 70 °C , mantendo os valores de incerteza baixo. Estes resultados mostram que é possível otimizar os valores, selecionando melhor os parâmetros que caracterizam o sistema como um todo, e com isso, ajustar para cada aplicação um sistema que melhor se enquadre.