

3

Demodulação de sensores a rede de Bragg

Como mostrado antes, uma resolução de aproximadamente 1 pm é necessária para medir uma mudança na temperatura de aproximadamente 0.1°C e uma mudança na deformação de aproximadamente 1με, ambos em um comprimento de onda de Bragg de 1.5μm. Conseqüentemente, a precisão na medição do deslocamento no comprimento de onda é crucial pra obter-se uma boa performance do sensor. Essa resolução no comprimento de onda pode ser obtida com o analisador de espectro óptico (OSA – Optical Spectrum Analyzer) e lasers sintonizáveis. Por outro lado, pode se tornar um desafio maior atingir a resolução no comprimento de onda requerida utilizando-se sistemas opto-eletrônicos mais simples.

Várias técnicas de demodulação [17] e monitoração de deslocamentos no comprimento de onda foram desenvolvidas, mas apenas poucas aparentam ter potencial para serem realizadas na prática, considerando-se os custos envolvidos. A tabela 1 mostra exemplos de algumas técnicas de interrogação de sensores, que analisam o espectro refletido pelos sensores, associadas a alguns valores relevantes [6].

Além das técnicas que analisam o espectro refletido pelos sensores, existem outras de mais baixo custo. Uma técnica que vem sendo implantada com sucesso é a baseada em filtros fixos, que será vista com mais detalhes posteriormente.

Quando existe a necessidade da leitura de mais de um sensor no sistema, é inevitável a utilização de técnicas de multiplexação, tendo em vista a diminuição do custo do sistema de leitura. Conseqüentemente, utilizando estas técnicas, pode-se compartilhar a fonte de luz e as eletrônicas de processamento. Sendo assim, o custo por sensor diminui, e aumenta a competitividade dos sensores a fibra óptica perante os sensores eletro-mecânicos convencionais. Diminuir o número de componentes eletrônicos significa a redução de pontos susceptíveis a falhas no equipamento, aumentando conseqüentemente sua durabilidade.

	Filtro Ajustável	Interferômetro	Laser Ajustável	CCD-espectrômetro
Velocidade de medição	média	baixa	média	alta
Estabilidade	boa	boa	boa	boa
Compatibilidade com WDM	média	alta	alta	média
Custo	médio	baixo	alto	médio

Tabela 3.1 - Análise de algumas técnicas de interrogação

Por outro lado, existem fatores limitantes para o número de sensores a serem interrogados utilizando-se as técnicas de multiplexação, tais como, velocidade de leitura dos sensores, razão sinal-ruído, faixa dinâmica de deformação ou temperatura a serem lidas e largura espectral do comprimento de onda.

Existem várias técnicas de multiplexação, e sua escolha não é óbvia, dependendo do tipo de aplicação a ser atendida.

3.1.

Multiplexação temporal : TDM (Time Division Multiplex)

Utilizando a técnica de multiplexação temporal [18,19], o número de sensores interrogados pode aumentar significativamente [20]. Neste caso, os sensores possuem a mesma posição espectral. A limitação para o número de sensores interrogados se deve principalmente à perda da intensidade da luz e à

distorção espectral referente a seguidas reflexões dos sensores dispostos em série (figura 3.1).

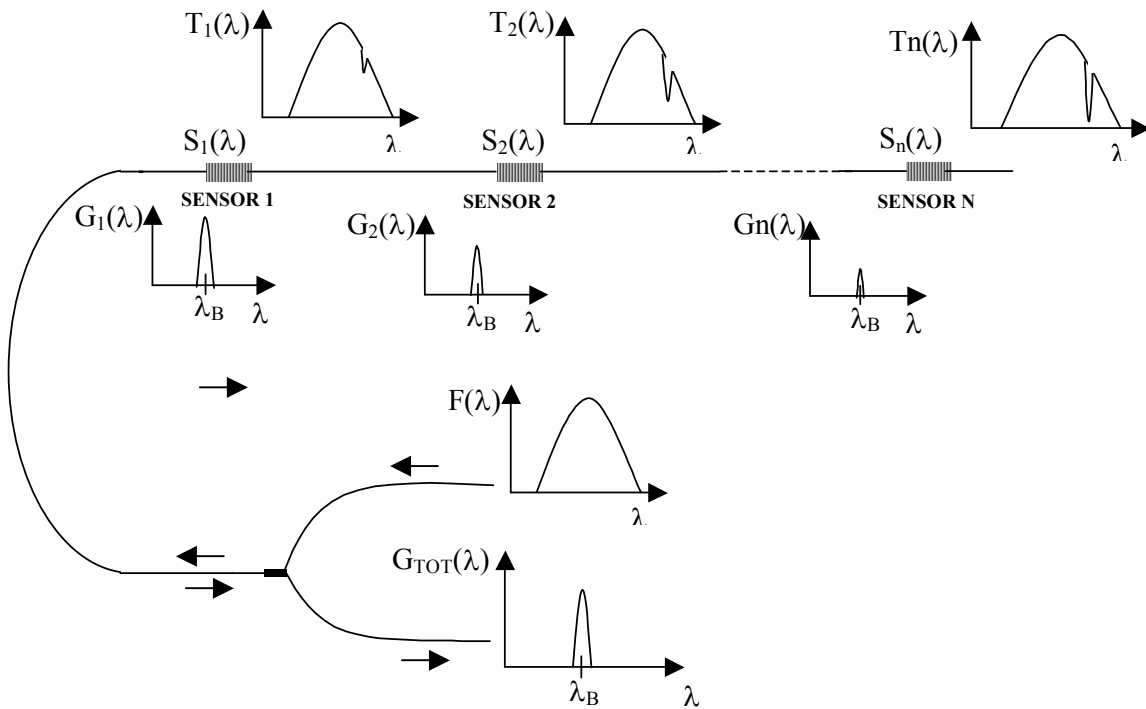


Figura 3.1 - Perda da intensidade da luz e a deformação espectral referente a seguidas reflexões dos sensores dispostos em série

Na figura 3.1, $F(\lambda)$ é definido como o espectro de luz da fonte acoplada ao sistema, $S(\lambda)$ é o espectro de reflexão do sensor em questão, $T(\lambda)$ é o espectro da luz após o sensor em questão. Sendo r_i uma constante de refletividade do sensor i , o espectro refletido pelo primeiro sensor pode ser expresso pela seguinte equação [21]:

$$G_1(\lambda) = r_1 S_1(\lambda) F(\lambda) \tag{3.1}$$

Após o primeiro sensor, o espectro de luz acoplada ao sistema pela fonte será distorcido referente ao espectro deste sensor. Considerando que o espectro refletido pelo segundo sensor sofre uma deformação devido a uma reflexão no primeiro sensor, a expressão para o espectro final detectado referente ao segundo sensor é dado por:

$$G_2(\lambda) = G_2^0(\lambda) - r_1 S_1(\lambda) G_2^0(\lambda) \quad (3.2)$$

$$G_2^0(\lambda) = r_2 S_2(\lambda) T_1(\lambda) \quad (3.3)$$

onde $G_2^0(\lambda)$ é o espectro refletido do segundo sensor, observado entre os dois sensores $S_1(\lambda)$ e $S_2(\lambda)$, obtidos com a fonte de luz após passar pelo primeiro sensor.

O espectro da fonte de luz transmitido através do primeiro sensor, que incide no segundo, pode ser escrito como:

$$T_1(\lambda) = F(\lambda) - G_1(\lambda) = F(\lambda) - r_1 S_1(\lambda) F(\lambda) = F(\lambda)[1 - r_1 S_1(\lambda)] \quad (3.4)$$

Sendo assim, o espectro refletido do segundo sensor, com a influência do primeiro, é dado por:

$$G_2(\lambda) = G_2^0(\lambda) - r_1 S_1(\lambda) G_2^0(\lambda) = G_2^0(\lambda)(1 - r_1 S_1(\lambda)) \quad (3.5)$$

Seguindo essa linha é fácil chegar às expressões gerais para o espectro incidente no sensor n após passar pelos $(n-1)$ sensores, T_{n-1} , e para o espectro refletido do sensor n indicado, $G_n(\lambda)$. Eles são dados por:

$$T_{n-1}(\lambda) = F(\lambda) \left[\prod_{i=1}^{n-1} (1 - r_i S_i(\lambda)) \right] \quad (3.6)$$

$$G_n(\lambda) = r_n S_n(\lambda) F(\lambda) \left[\prod_{i=1}^{n-1} (1 - r_i S_i(\lambda)) \right]^2 \quad (3.7)$$

A fonte deve acoplar luz pulsada no sistema de forma que a luz refletida pelos sensores possa ser demodulada, identificada e processada na detecção. Os pulsos devem ter duração proporcional à quantidade de sensores a serem

interrogados no sistema e sua separação espacial, de forma que pulsos refletidos por diferentes sensores não sejam confundidos na detecção.

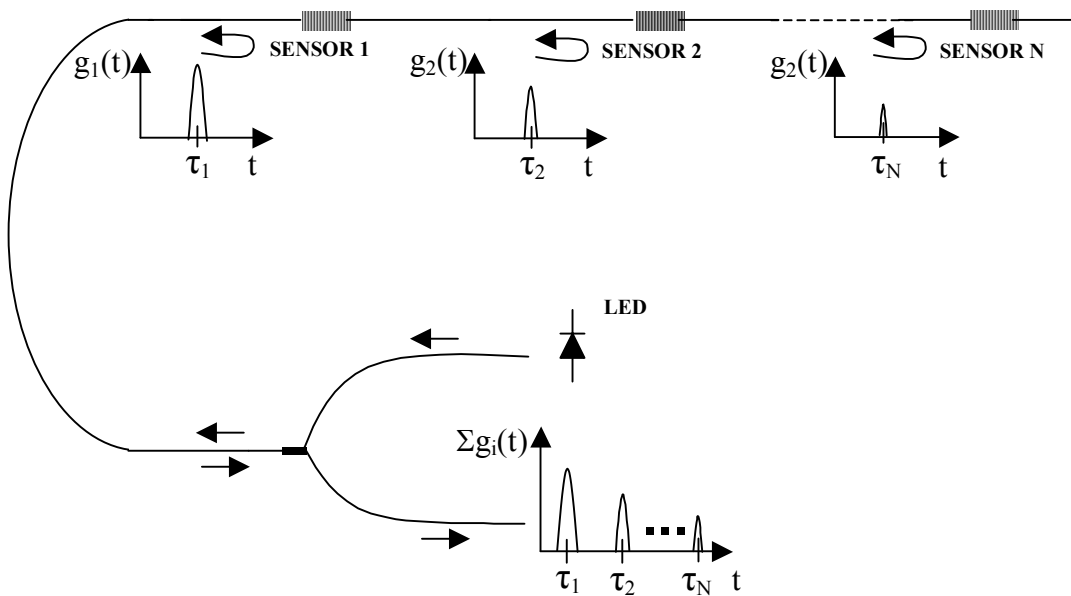


Figura 3.2 - Detecção das seguidas reflexões nos diferentes sensores separadas por um intervalo de tempo τ

A figura 3.2 mostra a detecção das seguidas reflexões nos diferentes sensores separadas por um intervalo de tempo τ proporcional à separação dos sensores. Conhecendo a posição dos sensores, pode-se identificar a qual sensor cada pulso na recepção corresponde.

No domínio do tempo, pode-se dizer que a expressão final que chega ao detector contendo todas as reflexões dos n sensores do sistema é expressa por:

$$g_{TOTAL}(t) = \sum_{i=1}^{i=n} g_i(t) \tag{3.9}$$

Tendo como sensor de prova o último sensor de um conjunto de sensores, nota-se que o espectro que atinge este sensor sofre uma distorção referente aos espectros dos sensores anteriores [21]. Esta distorção depende do número de sensores do conjunto, da sua refletividade e do comprimento de onda de Bragg. Na figura 3.3 são apresentados os espectros de transmissão para quatro diferentes situações.

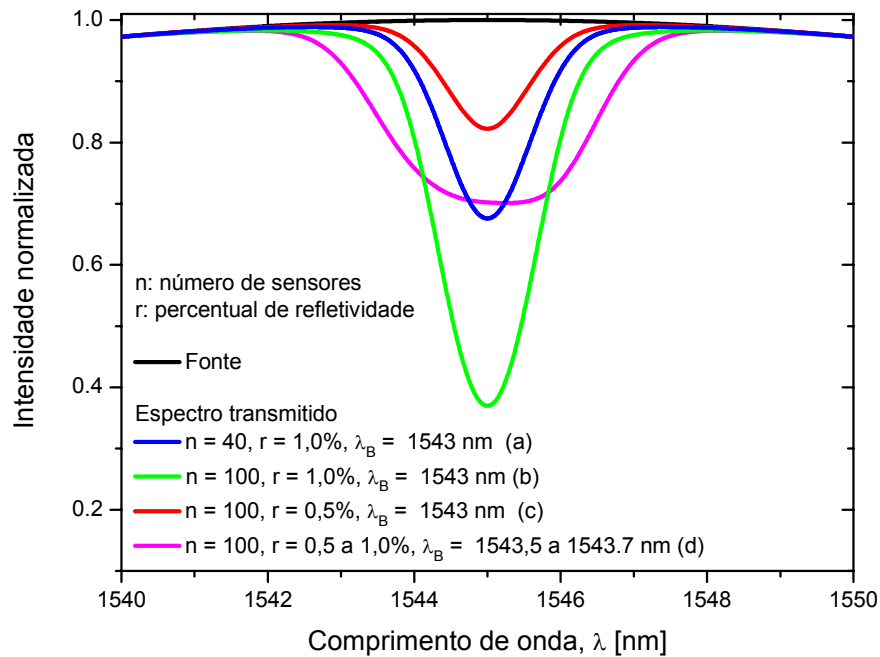


Figura 3.3 - Intensidade transmitida para quatro diferentes casos, considerando o número de sensores, o percentual de refletividade e a quantidade de sensores como variáveis. (a) 40 sensores com 1% de refletividade e mesma posição espectral; (b) 100 sensores com 1% de refletividade e mesma posição espectral; (c) 100 sensores com 0,5% de refletividade e mesma posição espectral; (d) 100 sensores com refletividade variando entre 0,5 e 1% e com a posição espectral variando entre 1543,5 e 1543,7 nm;

Nos três primeiros casos (a),(b) e (c), os sensores têm o mesmo comprimento de onda de Bragg. No primeiro caso (a), onde o número de sensores é menor, a distorção no espectro transmitido é menor também. Com o aumento do número de sensores, no caso (b), pode-se verificar que a distorção espectral de transmissão é mais acentuada. No caso (c), verifica-se que com a diminuição da refletividade dos sensores, a distorção do espectro de transmissão é ainda menor. Já no caso (d), com a refletividade e comprimento de onda de Bragg dos sensores variando, pode-se verificar que o espectro de transmissão sofre uma perturbação mais suave e distribuída espectralmente. Isso se deve à distribuição das redes no espectro, que faz com que não exista um ponto específico com atenuação mais acentuada do sinal transmitido.

3.1.1. Interferência – (*Crosstalk*)

O uso de sensores a rede de Bragg em série com o mesmo comprimento de onda resulta em um ruído de *crosstalk* [22,23]. Uma das possíveis fontes de *crosstalk* em um sistema com a técnica de multiplexação no tempo, em um conjunto de redes de Bragg em série com o mesmo comprimento de onda, reside nas múltiplas reflexões entre as redes. Isso pode levar a pulsos chegando simultaneamente no detector, sendo submetido a uma reflexão direta do sensor e múltiplas reflexões indesejadas que ocorrem entre as redes. Para sistemas com sensores de baixa refletividade apenas as reflexões de primeira ordem devem ser consideradas. A luz refletida pelo n -ésimo sensor de um conjunto em série de sensores idênticos é dada por:

$$I_n = I_0 R(1 - R)^{2(n-1)} \quad (3.11)$$

onde I_0 é a potência da luz acoplada na fibra, e R é a refletividade da rede de Bragg. Quanto maior for o número de sensores, maior é o *crosstalk*. Quanto menor for o pico de refletividade dos sensores, menor será o efeito de *crosstalk*. Por exemplo, para redes centradas no mesmo comprimento de onda, com 1% de refletividade, a interferência referente às múltiplas reflexões em um sensor está aproximadamente 40 dB abaixo da primeira reflexão deste sensor. Na prática, este valor está abaixo do nível ruído dos componentes do sistema.

3.2. Multiplexação no comprimento de onda - WDM

A técnica de multiplexação no comprimento de onda [24] requer que cada sensor na fibra corresponda a um específico comprimento de onda. Com esta técnica de multiplexação, têm-se vários sinais, em diversos comprimentos de onda, correspondentes às reflexões dos diversos sensores transitando pela fibra.

Uma forma interessante para esse sistema seria a utilização de uma fonte de luz de banda larga. A luz refletida por cada sensor pode ser separada pelo filtro

sintonizável no comprimento de onda desejado e detectada por fotodetectores (figura 3.4).

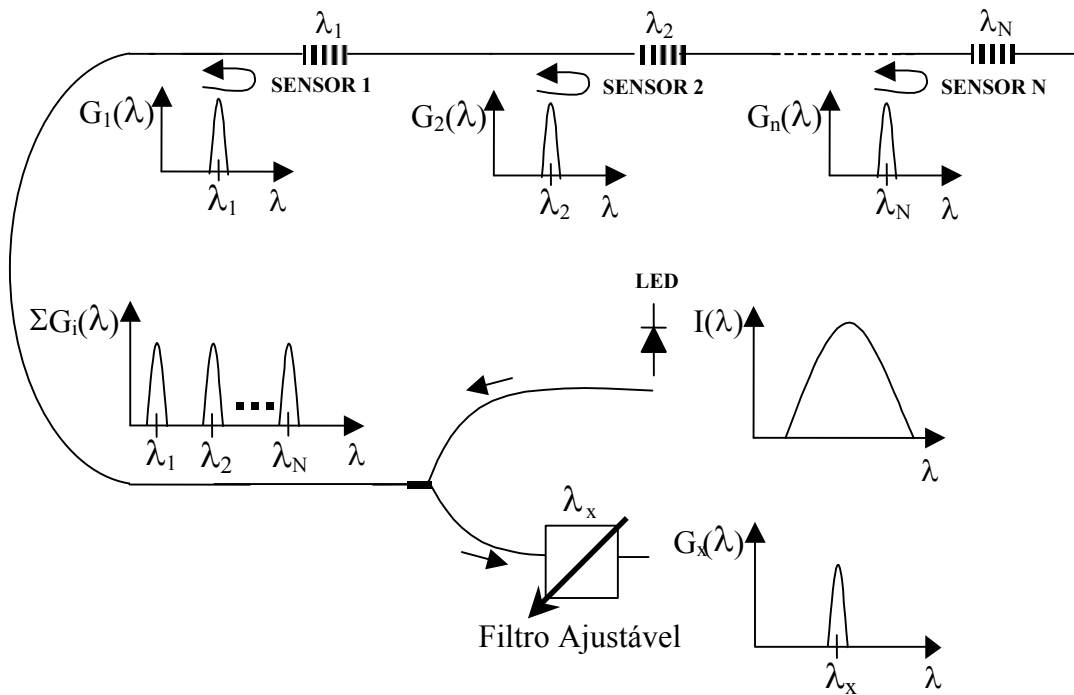


Figura 3.4 - Sistema de interrogação de sensores com filtro sintonizável utilizando a técnica de WDM

A figura 3.4 mostra um exemplo de uma configuração básica de um sistema de interrogação de sensores utilizando a técnica de WDM. É utilizada uma fonte de banda larga com uma largura de banda suficiente para cobrir todo o espectro contendo os comprimentos de onda onde os sensores a rede de Bragg foram escritos. A luz é refletida pelos sensores centrados em diferentes comprimentos de onda. Os sinais correspondentes aos vários sensores seguem simultaneamente através da fibra para o nível de detecção. Agora, a luz segue para um filtro ajustável que tem como característica selecionar a luz refletida pelos sensores, deixando passar apenas um sinal de luz centrado no comprimento de onda do sensor de interesse a ser analisado.

3.3. Demodulação utilizando um filtro fixo

Uma configuração básica da utilização da rede de Bragg como sensor é mostrado na figura 3.5. Nesse exemplo é apresentada uma configuração com uma única unidade de sensor.

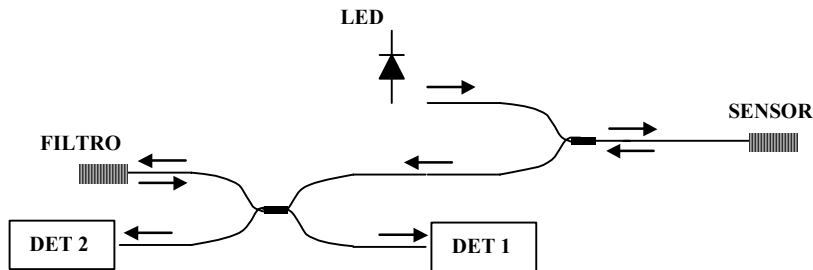


Figura 3.5 - Configuração básica da utilização da rede de Bragg como sensor com a detecção sendo realizada com um filtro fixo, um detector de sinal e um detector de referência

Neste sistema é utilizada uma fonte de luz de banda larga. O sensor reflete apenas a luz correspondente ao seu comprimento de onda, a qual segue para o sistema de detecção. O sistema de detecção nesta configuração é composto por uma rede de Bragg utilizada como filtro [26] com o mesmo comprimento de onda nominal próximo ao do sensor, um detector de sinal (DET 1) e um outro como referência (DET 2). O detector de referência é necessário para compensar possíveis variações de potência na fonte ou devido a perdas no sistema. Este irá detectar um sinal com intensidade proporcional ao refletido pelo sensor. Sendo assim, os valores obtidos pelo detector de sinal devem ser divididos pelos valores obtidos pelo detector de referência, tornando o sistema imune a qualquer variação comum de intensidade da luz acoplada no sistema pela fonte de banda larga.

O detector de sinal irá receber luz com intensidade proporcional a integral da sobreposição dos espectros do sensor e do filtro (figura 3.6) [27]. Quando ocorre uma variação espectral no sensor, a integral correspondente à sobreposição dos espectros do sensor e do filtro irá mudar. Isso ocorre devido à variação do espectro da luz refletida pelo sensor, a qual corresponde a deformação ou variação de temperatura que o sensor é submetido.

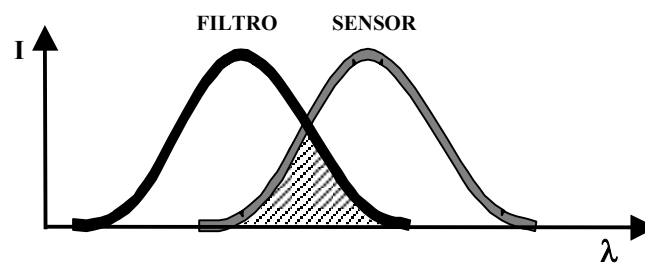
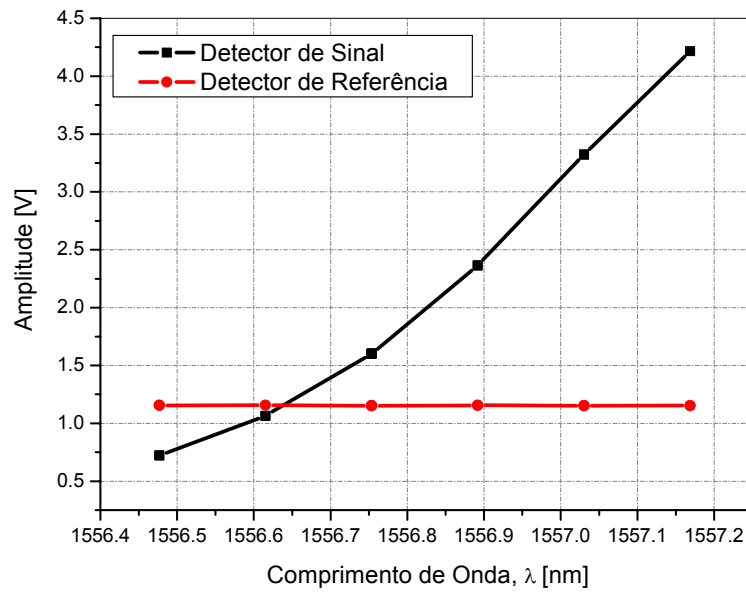


Figura 3.6 - Sobreposição dos espectros do sensor e do filtro: será detectado um sinal com intensidade proporcional a integral da sobreposição dos espectros do filtro e do sensor

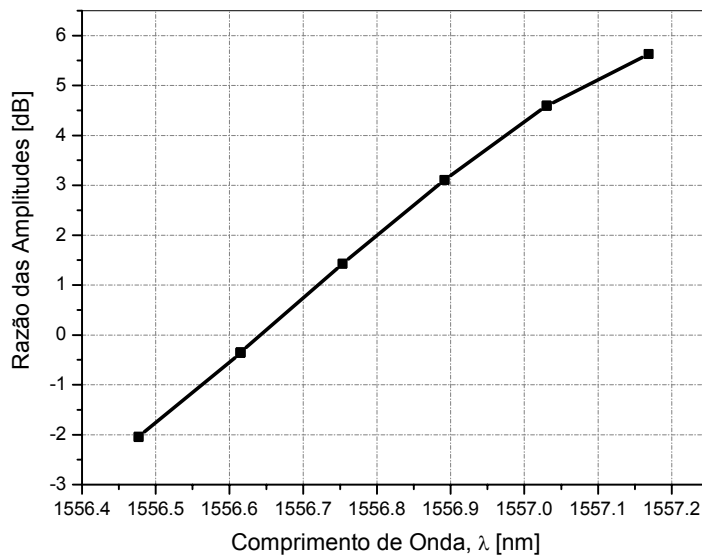
Diferentes deformações aplicadas ao sensor implicarão em reflexões com diferentes leituras no fotodetector de sinal. É necessário então a calibração do sensor para que as deformações aplicadas sejam relacionadas com as amplitudes lidas pelos fotodetectores. Um exemplo de uma curva de calibração e das leituras referentes aos fotodetectores é mostrado na figura 3.7.

O sinal captado pelo detector de sinal contém a informação direta do comprimento de onda de Bragg do sensor, variando diretamente com a deformação. O detector de referência mantém sua independência com as variações do sensor, captando apenas o sinal com a informação da quantidade de luz acoplada pelo LED ao sistema.

Nesta configuração, verifica-se a utilização de apenas um filtro fixo [28]. Existem alguns problemas relacionados a esta configuração especialmente quando se utiliza mais de um sensor na mesma fibra. Esses problemas podem ser supridos pela técnica mostrada na próxima seção, com a utilização de dois filtros fixos.



(a)



(b)

Figura 3.7 - Exemplo de uma curva de calibração para um sensor com a detecção sendo realizada com um filtro fixo e dois detectores: (a) as amplitudes lidas pelos detectores de sinal e referência; (b) a razão destas amplitudes em dB

3.4. Demodulação utilizando dois filtros fixos

Nesta configuração, apresentada na figura 3.8, são utilizados dois filtros fixos na detecção [21]. Uma fonte de banda larga acopla luz ao circuito óptico onde o sensor reflete uma parcela da luz correspondente ao seu comprimento de onda. Sua reflexão passa por dois filtros fixos antes de ser lida pelos fotodetectores. Os espectros dos filtros fixos devem ser definidos de forma que otimize a faixa dinâmica de leitura do sensor (figura 3.9).

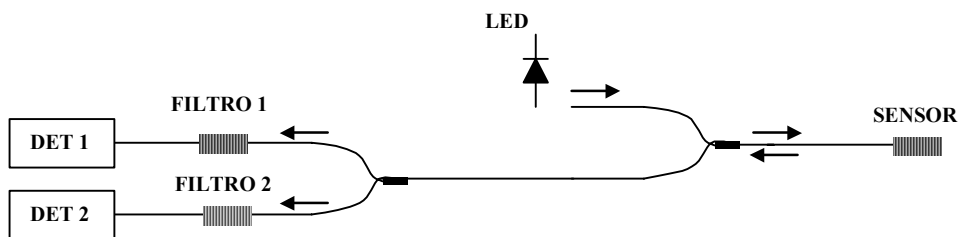


Figura 3.8 - Configuração de um sistema de interrogação com dois filtros

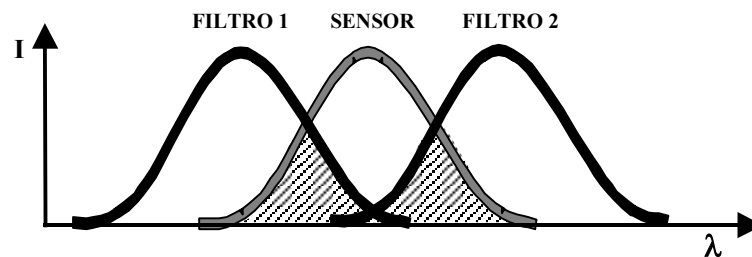
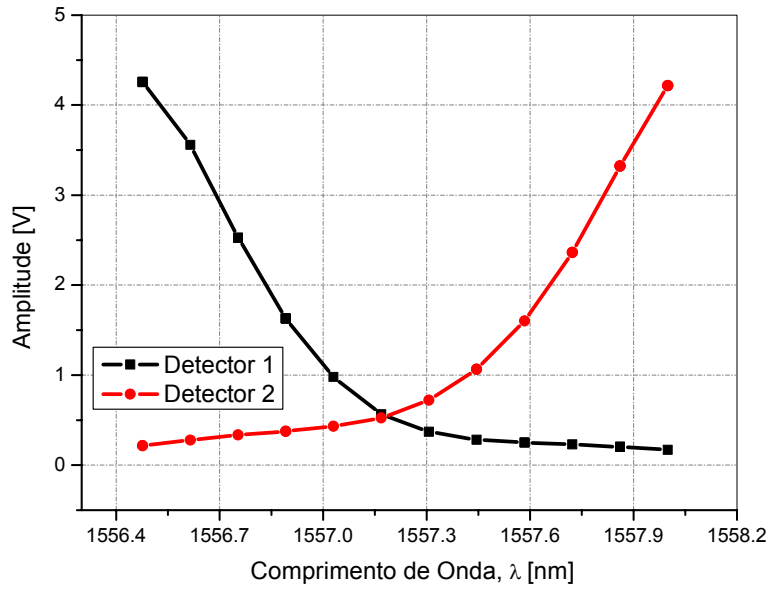
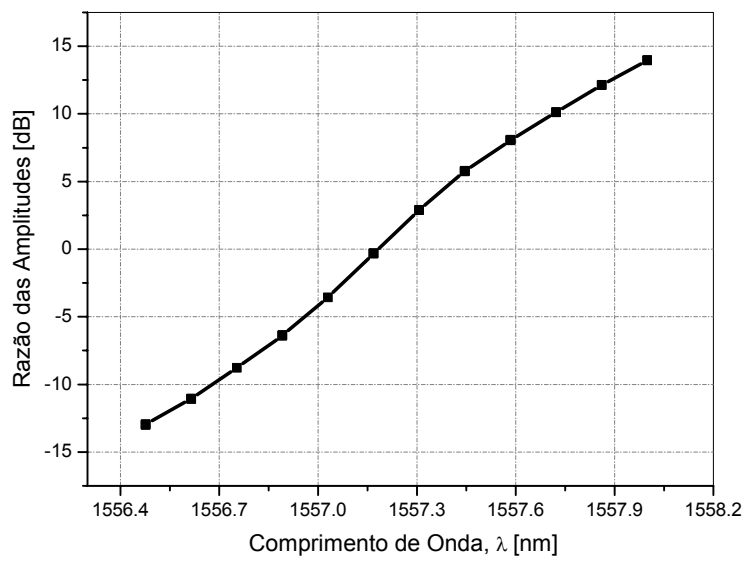


Figura 3.9 - Espectro do sensor e os dois filtros

As intensidades dos sinais lidos pelos fotodetectores serão proporcionais a superposição dos espectros de reflexão do sensor e de transmissão dos filtros. Pode-se então obter a razão das amplitudes dos sinais medidos pelos fotodetectores, que será diretamente relacionada às variações no comprimento de onda de Bragg do sensor. Neste caso, o uso de dois sinais proporcionais à potência total, torna o sistema imune a variações da intensidade de luz acoplada pela fonte de banda larga. Um exemplo com as amplitudes dos sinais lidos pelos detectores referentes a cada um dos filtros e de uma curva de calibração referente a razão das amplitudes lidas pelos fotodetectores é mostrado na figura 3.10.



(a)



(b)

Figura 3.10 - Exemplo de uma curva de calibração para um sensor, detecção com dois filtros fixos: (a) as amplitudes lidas pelos detectores referentes a cada um dos filtros; (b) a razão destas amplitudes em dB

3.5.

Modelo teórico para a demodulação utilizando dois filtros fixos

Neste capítulo é apresentado um modelo numérico desenvolvido na tese de doutorado, referência [21], para um sistema baseado em dois filtros fixos que será comparado com resultados experimentais.

Neste modelo, o primeiro passo é aproximar a forma espectral dos dois filtros e do sensor por uma função gaussiana. Para representar o ruído nos fotodetectores associado à eletrônica é adicionada uma constante à função gaussiana. As expressões para a refletividade do sensor S e dos filtros F_i são dadas por:

$$S(\lambda, \lambda_s) = y_0 + S_0 \exp\left[-\alpha_s (\lambda - \lambda_s)^2\right] \quad (3.1)$$

$$F_i(\lambda) = y_{0i} + F_{0i} \exp\left[-\alpha_{Fi} (\lambda - \lambda_{Fi})^2\right] \quad \text{onde } \alpha = \frac{4 \ln 2}{b^2}; \quad i = 1, 2. \quad (3.2)$$

onde λ é o comprimento de onda, $\lambda_{S,Fi}$ representam os comprimentos de onda centrais do sensor e dos filtros, y_0 é a constante de *offset* e b é a largura de banda à meia altura (*FWHM-Full Width at Half Maximum*). Um exemplo de três espectros experimentais, com seus respectivos ajustes gaussianos são mostrados na figura 3.11, onde observa-se que ambos os filtros são bem representados pelos ajustes. Para o sensor, neste caso, a expressão também se ajusta satisfatoriamente, embora apresente algumas subestruturas no espectro medido.

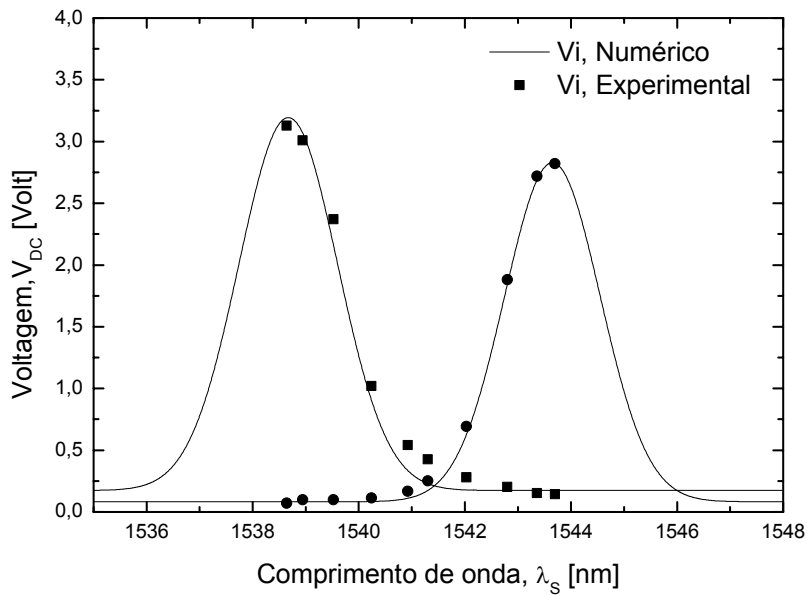


Figura 3.12 - Resultados numéricos e experimentais relativos aos dois fotodetectores, V_1 e V_2 , em função do comprimento de onda do pico espectral do sensor para uma separação entre os filtros de 5nm

Pode-se observar, figura 3.8, que os resultados teóricos divergem dos experimentais no primeiro pico de convolução na região fora do centro, isto se deve ao fato do sensor apresentar subestruturas no seu espectro.

Para compensar qualquer possível variação na potência, foi considerada a razão entre as grandezas lidas nos fotodetectores.

A saída do sistema, independente de flutuações de potência, será:

$$f = \frac{V_1}{V_2} \tag{3.5}$$

Um exemplo de f , calculado e medido como uma função da posição de pico do sensor, pode ser obtido dos dados mostrados na figura 3.12. O resultado pode ser visto na figura 3.13.

Os resultados teóricos e experimentais apresentam pequenas divergências devido ao perfil do espectro do sensor mas, de forma geral, os resultados mostram que a teoria apresentada é válida.

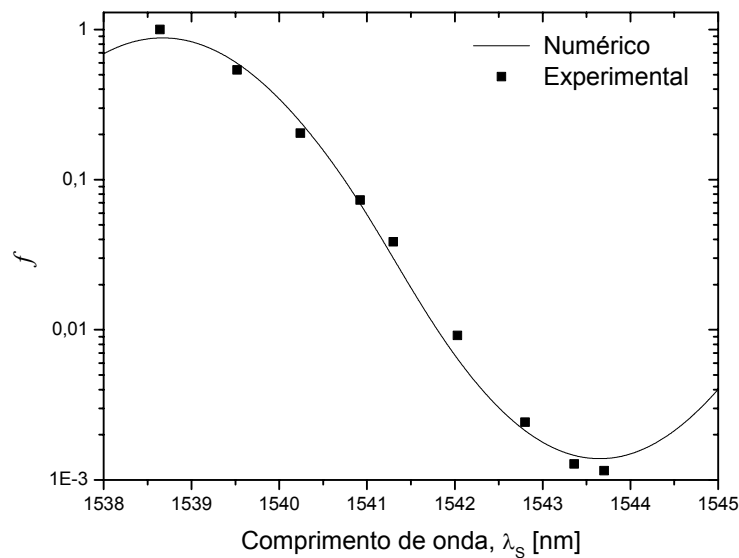


Figura 3.13 - Resultados numéricos e experimentais para a função f em função do comprimento de onda do pico espectral do sensor obtido a partir dos dados da figura 3.8

3.5.1. Erro de medição do comprimento de onda de Bragg

O comprimento de onda de Bragg aparente do n -ésimo sensor de um conjunto de sensores dispostos em série centrados no mesmo comprimento de onda é obtida do seu espectro refletido. Este espectro depende diretamente do espectro da luz que incide neste sensor, e da resposta espectral propriamente dita do sensor em questão. A distorção observada no espectro da luz que incide no sensor n devido à superposição dos $(n-1)$ sensores em conjunto com a distorção do espectro da luz refletida pelo sensor n após passando pelos $(n-1)$ sensores geram um desvio no valor lido do comprimento de onda de Bragg do sensor n . Define-se o comprimento de onda de Bragg verdadeiro, λ_{BV} , como o comprimento de onda na amplitude de pico do espectro de reflexão de um sensor quando a fonte de luz incidente neste sensor não sofre distúrbios.

Quando o espectro da luz incidente no sensor sofre alterações, o comprimento de onda na amplitude de pico do espectro de reflexão do sensor sofre um deslocamento aparente, λ_{BI} . Pode-se então definir um desvio do comprimento de onda como sendo:

$$Desvio = \lambda_{BV} - \lambda_{BI} \tag{3.6}$$

O gráfico da figura 3.14 mostra o desvio na posição espectral do sensor lido utilizando as técnicas de detecção da posição de pico do espectro e filtros fixos. Na técnica de detecção da posição de pico do espectro, a monitoração do sensor é feita através da posição de pico do espectro refletido pelo sensor em questão. São considerados dois sistemas de 100 sensores, um com sensores com refletividade de 1% e outro com sensores de 0.5% de refletividade, todos com FWHM de 1.3 nm, e todos com a mesma posição espectral, 1545 nm. Mantendo essa configuração, o último sensor, n , é variado de 1543 a 1547 nm e para cada posição do último sensor é calculado o desvio. Com relação aos filtros, os sensores se localizam exatamente entre eles, em termos espectrais, de modo que os espectros do sensor e dos filtros não estejam superpostos .

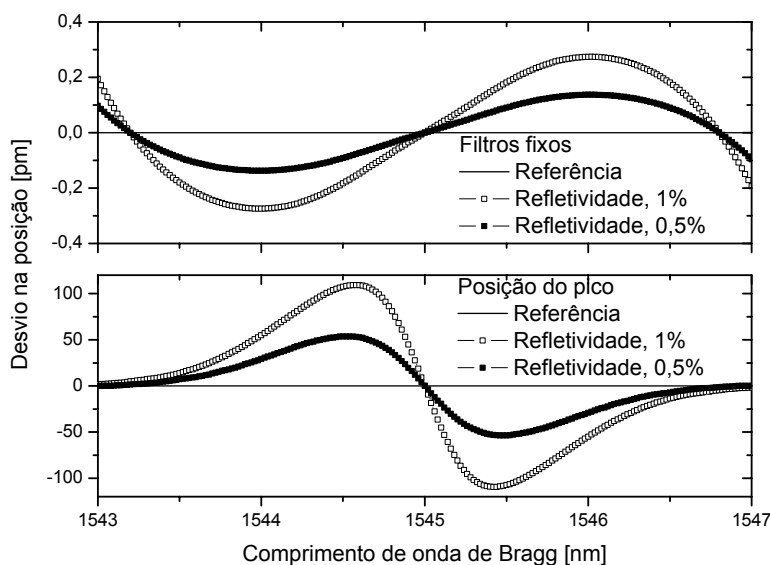


Figura 3.14 - Desvio para diferentes percentuais de refletividade, com 100 sensores na mesma posição espectral, 1545 nm

Pode-se então verificar que o sistema de detecção utilizando dois filtros fixos é pouco sensível a deformações na forma espectral do sensor. Isto se deve ao fato de que as posições espectrais dos filtros em relação ao sensor são de tal forma

que a superposição entre eles só ocorre na faixa espectral fora da região em que a deformação no espectro da fonte é mais acentuada.

Até aqui as análises foram feitas considerando todos os sensores, quando superpostos, centralizados espectralmente em relação aos filtros, ou então distribuídos aleatoriamente. Entretanto, em casos reais, pode acontecer que todos os sensores se desloquem de modo a ter comprimentos de onda mais próximos a um dos filtros fixos, gerando uma deformação no espectro da fonte localizado próximo a um dos filtros. Isto provocaria um aumento no desvio. Na figura 3.15, é apresentado este efeito e pode-se observar que entre os filtros o desvio tende a um valor pequeno, aumentando nas proximidades dos comprimentos de onda dos filtros ($\lambda_{F1} = 1542.5$ nm e $\lambda_{F2} = 1547.5$ nm). Assim, existe, neste caso extremo, uma severa limitação de faixa dinâmica. A utilização da técnica de filtros fixos deve levar em consideração a aplicação no projeto dos espectros dos sensores para evitar este tipo de situação.

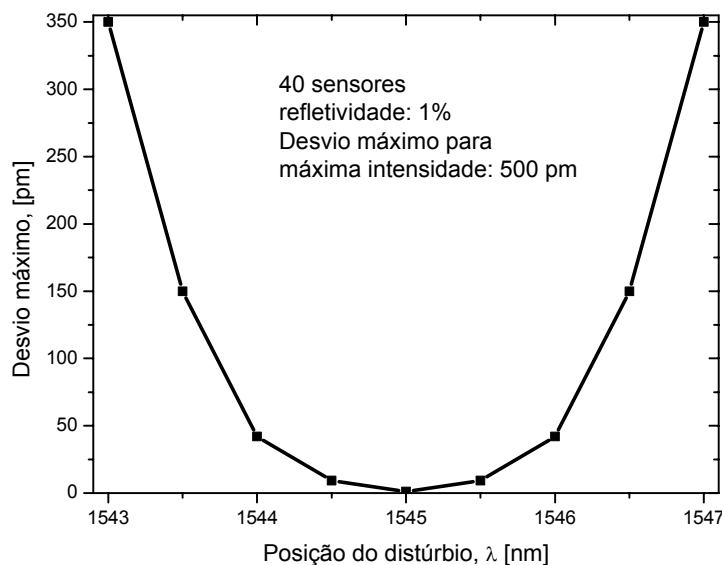


Figura 3.15 - Máximo desvio para diferentes posições do distúrbio, filtros fixos