

5

Análise do desvio provocado no comprimento de onda de Bragg do sensor devido a mudanças no espectro da luz incidente

5.1.

Introdução

Para obter informações sobre o comprimento de onda de uma rede de Bragg em uma fibra óptica basta incidir sobre a rede uma fonte de luz e observar a sua reflexão (ou transmissão). O espectro refletido (ou transmitido) de uma rede de Bragg tem uma forte dependência com o espectro da luz que incide sobre a rede: qualquer variação na forma espectral da luz incidente resultará em uma deformação no espectro refletido da rede, gerando um desvio no comprimento de onda de Bragg detectado. Neste capítulo será analisado este efeito para dois casos distintos. No primeiro caso será investigado o desvio no comprimento de onda de Bragg quando em uma multiplexação (TDM/WDM) os sensores, com baixa refletividade, se encontram superpostos espectralmente. Já, no segundo caso, será analisado o desvio no comprimento de onda de Bragg devido a uma variação da modulação no espectro da fonte de luz que incide sobre a rede, provocada, por exemplo, por uma variação de temperatura. Esta modulação é uma característica inerente de fontes do tipo SLED. Em ambos os casos serão confrontados o método baseado na determinação direta do comprimento de onda através posição de pico espectral com o método de demodulação baseada em dois filtros fixos para a obtenção indireta do comprimento de onda de Bragg.

5.2.

Análise do desvio no comprimento de onda de Bragg gerado na multiplexação (TDM/WDM) de sensores

Uma das vantagens em usar sensores a rede de Bragg em fibras ópticas é a capacidade de multiplexação. Várias técnicas de multiplexação têm sido propostas com a finalidade de aumentar o número de sensores a ser interrogado [9]. Entres

as técnicas duas delas merecem destaque, uma é baseada na multiplexação temporal (TDM-*Time Domain Multiplexing*), enquanto a outra na multiplexação do comprimento de onda (WDM-*Wavelength Domain Multiplexing*) [32-34]. Nos últimos anos alguns trabalhos foram desenvolvidos combinando as duas técnicas TDM/WDM, mostrando sua maior eficácia [35,38].

É possível interrogar dezenas de sensores com o mesmo comprimento de onda usando a técnica TDM/WDM, a limitação do número de sensores a serem interrogados está associada à intensidade de luz refletida pelas redes e ao erro observado na medida do comprimento de onda devido à superposição dos espectros das redes sensoras. Uma técnica usando algoritmo genético é proposta para melhorar a exatidão na leitura do comprimento de onda quando em um sistema WDM ocorre uma superposição espectral das redes sensoras [36,37].

A idéia do presente trabalho é analisar o desvio na avaliação do comprimento de onda de Bragg gerado na multiplexação de sensores em uma única fibra. Para a interrogação dos sensores são utilizados dois métodos, um usando um espectrômetro, o mais usual, e o outro usando demodulação óptica baseada em dois filtros fixos.

5.2.1. Multiplexação de sensores: modelo teórico e simulação

O princípio básico da multiplexação de sensores em uma única fibra óptica pode ser esquematicamente visto na figura 5.1, onde uma fonte de luz de banda larga $F(\lambda)$ ilumina um conjunto de sensores sendo suas reflexões analisadas. Considerando $S_i(\lambda, \lambda_b)$ como os espectros dos sensores sem sofrer deformação, tendo todos eles os mesmos comprimentos de onda de Bragg, λ_b , e com refletividade r_i . Eles são posicionados ao longo da fibra óptica com uma certa distância entre eles, equivalente a um intervalo de tempo τ_i . Quando os sensores são interrogados, os espectros refletidos analisados, $g_i(\lambda, \lambda_{bi})$, podem sofrer influência do espectro da luz transmitida $T_i(\lambda)$ que depende das posições espectrais, refletividades associadas e número de sensores.

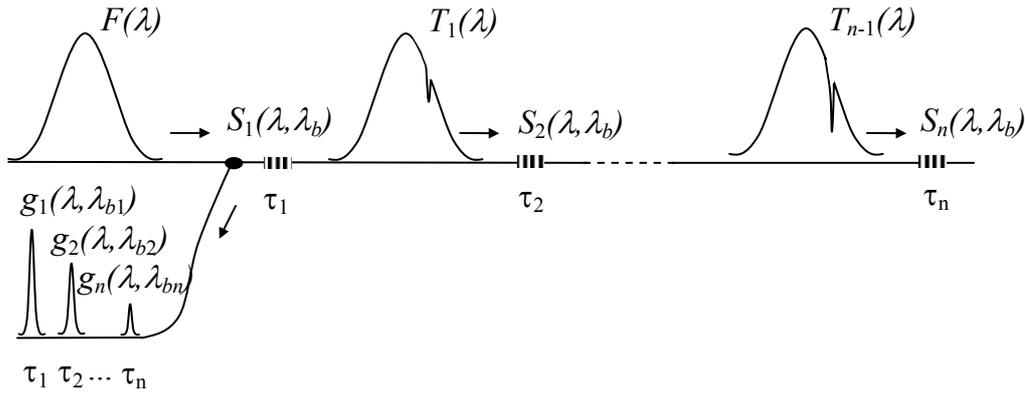


Figura 5.1 - Multiplexação de sensores com espectros idênticos

Matematicamente, o espectro refletido do primeiro sensor é dado simplesmente pela seguinte equação:

$$g_1(\lambda, \lambda_{b1}) = r_1 S_1(\lambda, \lambda_b) F(\lambda) \quad (5.1)$$

Se for analisado o segundo sensor, considerando que o espectro da fonte de luz será deformada após passar pelo primeiro sensor e que o espectro refletido do segundo sensor também passa pelo primeiro sensor, a expressão para o espectro final detectado será dado por

$$g_2 = g_2^0 - r_1 S_1 g_2^0 = g_2^0 (1 - r_1 S_1) \quad (5.2)$$

$$g_2^0 = r_2 S_2 T_1 \quad (5.3)$$

onde g_2^0 é o espectro refletido pelo segundo sensor, observado entre os dois sensores S_1 e S_2 , obtidos com a fonte de luz após passar pelo primeiro sensor.

O espectro da fonte após passar pelo primeiro sensor, que incide no segundo, é definido por

$$T_1 = F - g_1 = F - r_1 S_1 F = F(1 - r_1 S_1) \quad (5.4)$$

Substituindo (5.4) em (5.3), e conseqüentemente, (5.3) em (5.2), se obtém o espectro refletido do segundo sensor com a influência do primeiro,

$$g_2 = r_2 S_2 F (1 - r_1 S_1)^2 \quad (5.5)$$

Seguindo esse raciocínio é fácil chegar nas expressões gerais para o espectro incidente no sensor n , T_{n-1} , após passar pelos $(n-1)$ sensores e para o espectro refletido por ele, g_n :

$$T_{n-1} = F \left[\prod_{i=1}^{n-1} (1 - r_i S_i) \right] \quad (5.6)$$

$$g_n = r_n S_n F \left[\prod_{i=1}^{n-1} (1 - r_i S_i) \right]^2 \quad (5.7)$$

onde F é o espectro inicial da fonte; S_n e S_i , r_n e r_i são os espectros verdadeiros e refletividades dos sensores i , respectivamente; $i = 1 .. (n-1)$.

No caso crítico, quando os sensores se encontram na mesma posição espectral dois efeitos devem ser analisados. O primeiro é o decremento da intensidade de luz incidente no sensor n e o segundo, e mais importante, é o desvio provocado no comprimento de onda lido.

Com base nas equações (5.6) e (5.7) é possível se obter o sinal transmitido pelos $(n-1)$ sensores que incide no sensor n e a intensidade do espectro refletido pelo sensor n que é observado no final em função do número de sensores, vide figuras 5.2 e 5.3. No mesmo gráfico são apresentados casos com percentuais de refletividade de 0.5, 1.0 e 1.5% iguais para todos os sensores, e também considerando a refletividade crescendo (0.5 a 1.0%) e decrescendo (1.0 a 0.5%) linearmente do primeiro ao último sensor.

Nas simulações foram considerados sensores iguais, centrados em 1545 nm com FWHM de 1.3 nm, e fonte de luz com largura espectral ampla.

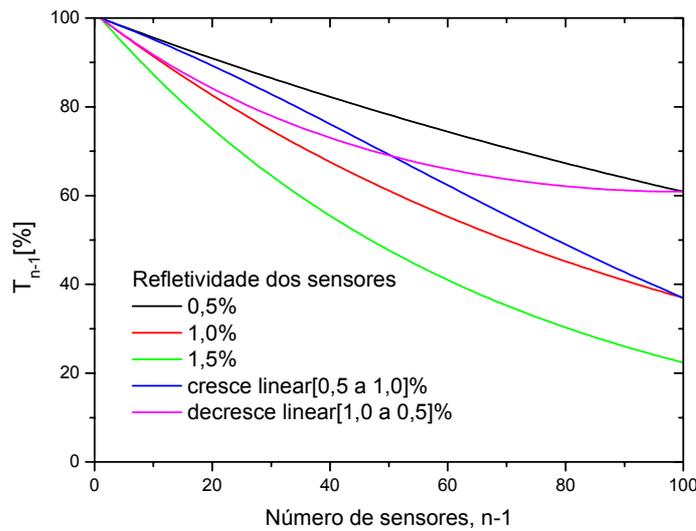


Figura 5.2 - Sinal transmitido que incide no sensor n em função do número de sensores

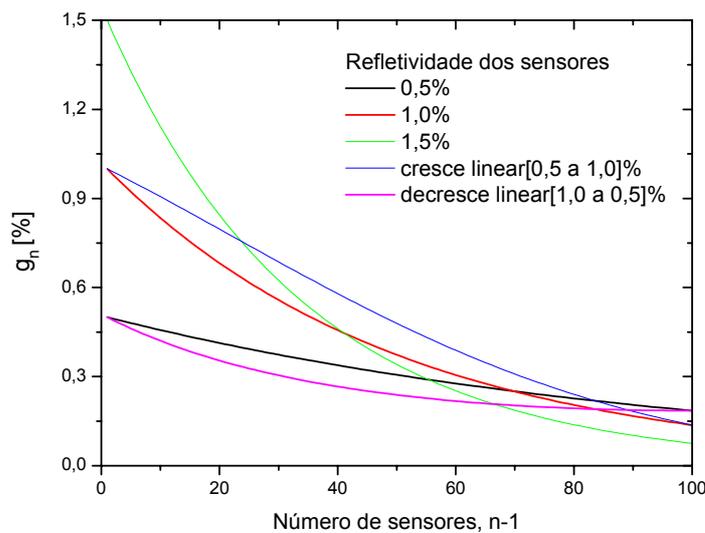


Figura 5.3 - Intensidade do espectro refletido do sensor n em função do número de sensores

Pelas figuras 5.2 e 5.3, temos que a melhor situação é quando os sensores têm a mesma refletividade de 0.5 %. O valor limite da intensidade do espectro refletido, g_n , dependerá da capacidade de leitura do sistema de medida e da intensidade da fonte usada.

Se for observado o espectro da fonte após a passagem por vários sensores nota-se que este espectro transmitido sofre uma deformação, que dependerá do número de sensores, da sua refletividade e do comprimento de onda de Bragg. Na

figura 5.4 são apresentados os espectros de transmissão para três diferentes casos: a) variação do número de sensores, mantendo a refletividade constante igual a 1%; b) diferentes refletividades, mantendo o número de sensores igual a 100. Nesses dois casos o comprimento de onda de Bragg para todos os sensores era de $\lambda_B = 1545$ nm; Já no terceiro caso, c) tanto a refletividade quanto o comprimento de onda dos sensores foram considerados aleatórios, com seus valores variando de 0.5 a 1% e de 1543.5 a 1546.5 nm, respectivamente, com 100 sensores.

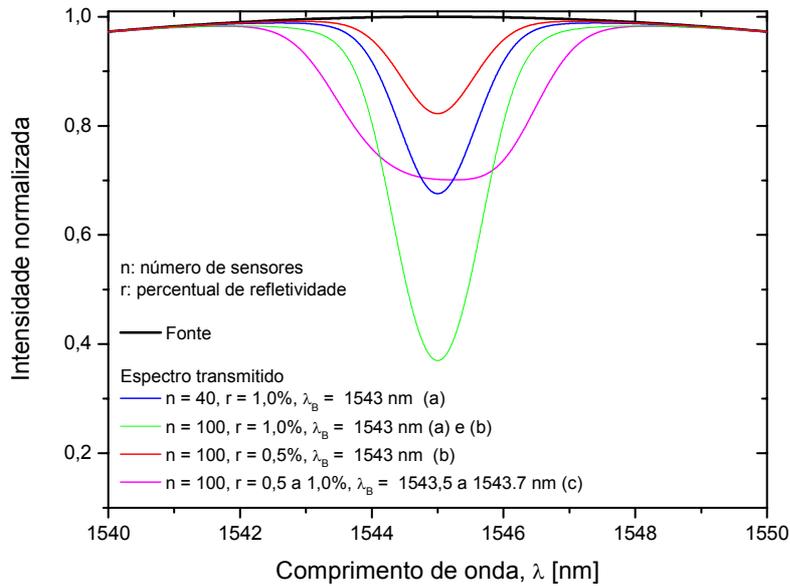


Figura 5.4 – Intensidade transmitida para três diferentes casos, considerando o número de sensores, o percentual de refletividade e a quantidade de sensores como variáveis

Como a determinação do comprimento de onda de Bragg do n -ésimo sensor é obtida do seu espectro refletido, o qual é dado pela convolução do espectro da luz incidente com o espectro do sensor n . Então, a deformação observada no espectro da luz que incide no sensor n devido à superposição dos $(n-1)$ sensores em conjunto com a deformação 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 valor obtido quando a fonte de luz incidente no sensor não sofre distúrbios. E quando o espectro da luz incidente sofre alterações na sua forma, o comprimento de onda de Bragg pode ser chamado de comprimento de onda indicado, λ_{BI} . O desvio é definido como:

$$Desvio = \lambda_{BV} - \lambda_{BI} \quad (5.8)$$

Para a análise do desvio são tomadas as equações (5.7) e (5.8), considerando o espectro verdadeiro do sensor n , S_n , centrado em λ_{BV} e o espectro indicado pelo sensor n , g_n , centrado em λ_{BI} . Na simulação é obtido o desvio em três diferentes casos, comparando o método baseado na determinação de comprimento de onda (posição de pico) com o método de demodulação usando dois filtros fixos.

Para a realização da análise de desvio utilizando o método baseado em dois filtros fixos foram considerados os filtros com as características encontradas no DWDM utilizado nos experimentos, com FWHM de aproximadamente 0.98 nm, sendo posicionados em 1542.5 e 1547.5 nm. Os espectros dos filtros e do sensor usados na simulação são ilustrados na figura 5.5 (a). Na figura 5.5 (b) é apresentado o resultado simulado da função razão f , baseado nos espectros da figura 5.5 (a), que pode ser associado ao comprimento de onda de Bragg. Deve-se lembrar que essas simulações foram baseadas nas equações (3.1) e (4.11) apresentadas anteriormente.

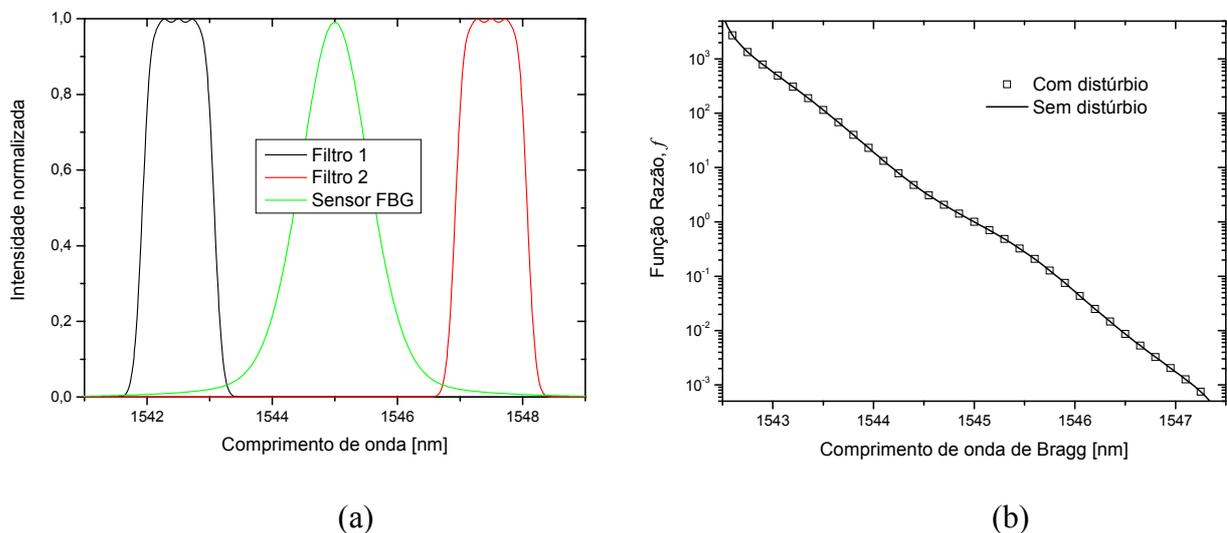


Figura 5.5 - (a) Espectro dos filtros DWDM e do sensor; (b) função razão f em função do comprimento de onda de Bragg

Na figura 5.5 (b) são apresentados os valores da função razão f com e sem distúrbio, que representam os valores obtidos com o espectro refletido do sensor n com e sem a influência dos outros sensores, respectivamente. Pode-se observar

que os resultados das funções razão f não apresentam grandes diferenças entre si, isso porque o sistema de filtros fixos é pouco sensível a deformações na forma espectral do sensor.

Para o cálculo do desvio, consideramos três casos distintos. No primeiro caso, é considerado um sistema com 100 sensores com o mesmo comprimento de onda de Bragg, 1545 nm, com a mesma refletividade e com FWHM de 1.3 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. Os resultados são apresentados na figura 5.6. É feita uma comparação dos desvios, considerando os 99 sensores com duas refletividades distintas: 1 e 1.5 %.

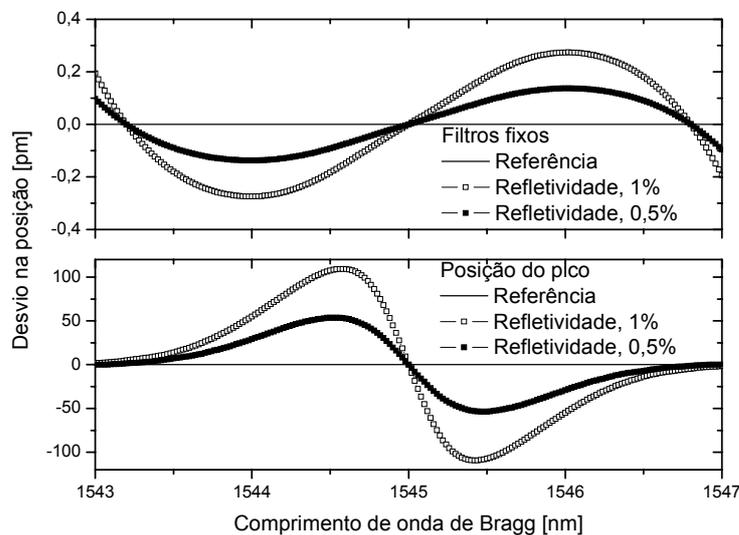


Figura 5.6 - Desvio para diferentes percentuais de refletividade, com 100 sensores na mesma posição espectral, 1545 nm

No segundo caso o procedimento é o mesmo, mas a análise é feita em relação ao número de sensores, mantendo o percentual de refletividade igual a 1%; figura 5.7. Já no terceiro caso, tanto o percentual de refletividade (0.5 a 1%) quanto a posição espectral (1543.5 a 1546.5) dos 99 sensores são aleatórios, com 100 sensores, figura 5.8.

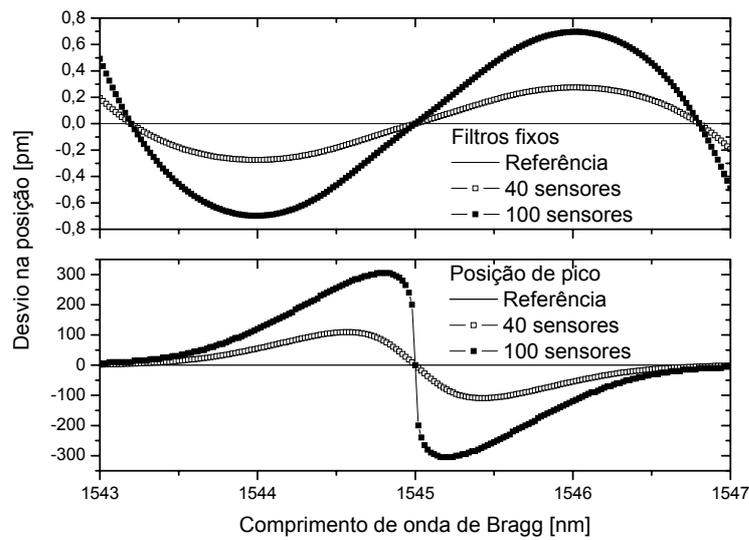


Figura 5.7 - Desvio para diferentes números de sensores na mesma posição espectral, 1545 nm, com percentual de refletividade de 1%

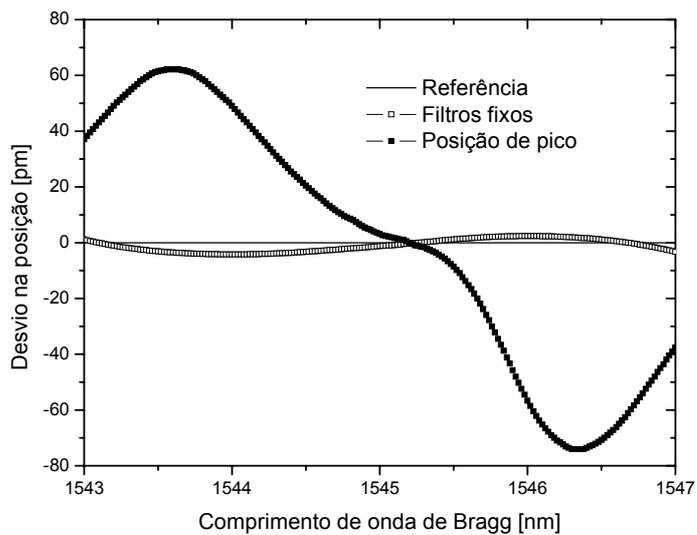


Figura 5.8 – Desvio calculado para valores aleatórios: comprimento de onda e refletividade variando de 1543.5 a 1543.7 nm e 0.5 a 1.0%, respectivamente, com 100 sensores

O resultado apresentado na figura 5.8 pode ser considerado o mais próximo da realidade, tendo em vista que a probabilidade dos sensores se encontrarem aleatoriamente é maior que superpostos em uma única posição espectral.

Nas figuras 5.6, 5.7 e 5.8 é mostrada uma curva referência que denota o desvio igual a zero. Por estas figuras pode ser verificado que o desvio no valor do comprimento de onda de Bragg do sensor depende da quantidade de sensores no

sistema e de suas características, podendo chegar a valores de 300 pm de desvio. Em relação ao confronto das técnicas, conclui-se que a técnica de filtros fixos se mostra mais eficaz na determinação do comprimento de onda de Bragg, apresentando menor sensibilidade à deformação do espectro da fonte de luz. Isto porque 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 5.9, 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 ($\lambda_{F1} = 1542.5 \text{ nm}$ e $\lambda_{F2} = 1547.5 \text{ nm}$). 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.

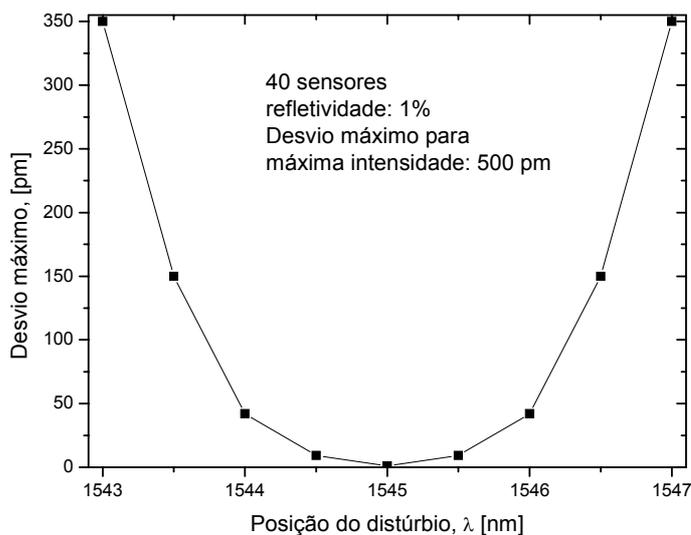


Figura 5.9 - Máximo desvio para diferentes posições do distúrbio, filtros fixos

5.2.2. Montagem experimental e resultados

Para validar as análises e simulações apresentadas anteriormente foi feito um experimento capaz de emular o efeito de um conjunto de sensores idênticos na mesma posição espectral. Na figura 5.10 o esquema experimental utilizado é apresentado para melhor compreensão. Uma fonte de luz de banda larga (ASE) é injetada no sistema através de um chave óptica onde pode-se escolher dois caminhos. No caminho 1 a luz passa por um filtro de transmissão ajustável tipo Fabry-Perot, λ_1 (1530 a 1560 nm), chegando simultaneamente no analisador de espectro óptico (OSA) e no sistema de filtros fixos. O sistema de filtros fixos, discutido anteriormente, é composto de dois filtros de transmissão do DWDM (1542.94 e 1547.72 nm com FWHM de 0.92 e 0.90 nm) acoplados a um medidor de potência óptica onde podem ser obtidos os valores independentes e simultâneos. No caminho 2 existe uma rede de Bragg fixa, λ_2 (1545.35 nm com FWHM de 1.32 nm), com alta refletividade a qual pode ser considerada como um conjunto de sensores de baixa refletividade, idênticos e superpostos. Após a passagem pela rede a luz segue a mesma trajetória do caminho 1.

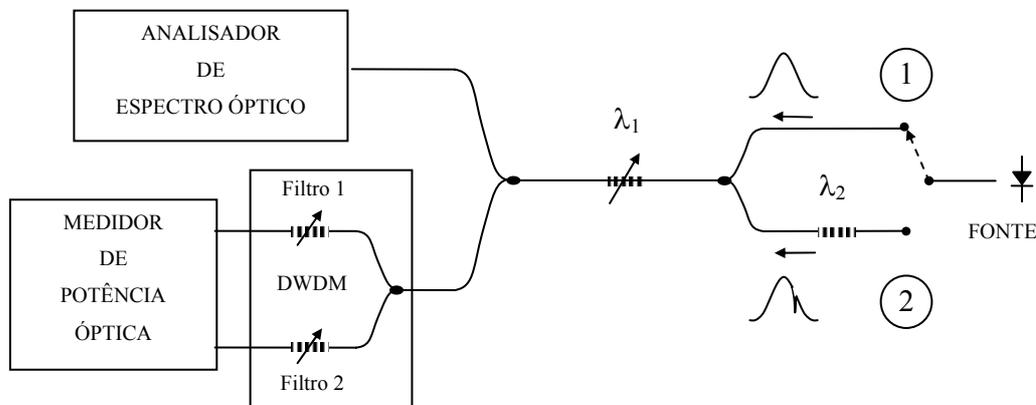


Figura 5.10 - Esquema experimental usado para representar um conjunto de sensores idênticos na mesma posição espectral

Na figura 5.11 são apresentados os espectros da rede de Bragg, que se mantém fixa, e do filtro de transmissão ajustável tipo Fabry-Perot. Os espectros simulados são apresentados na mesma figura, de forma a observar a concordância dos resultados gerados com os obtidos experimentalmente. Tais resultados foram gerados baseados na teoria apresentada nos capítulos anteriores.

O processo experimental se baseou em variar a posição do filtro ajustável, mantendo a rede de Bragg fixa. Nesse experimento o filtro ajustável representa o sensor n , definido anteriormente nas simulações. Para cada posição do filtro era feito o chaveamento de tal forma a obter um resultado com e sem a influência da rede de Bragg fixa, caminho 2 e 1, respectivamente. Esses resultados foram tomados simultaneamente pelo OSA e pelo sistema de filtros fixos.

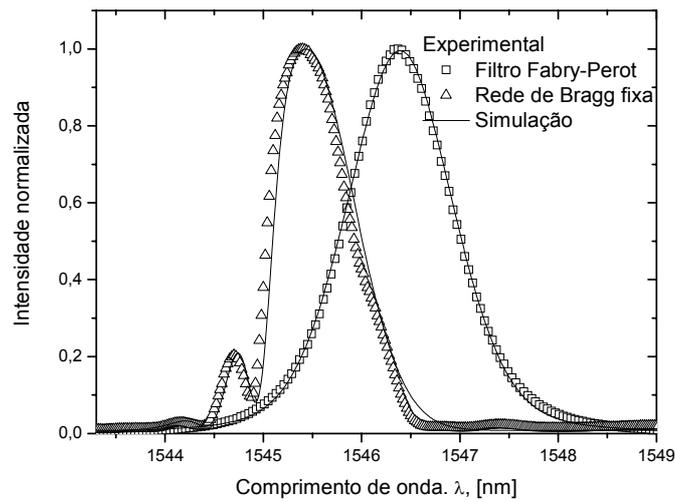
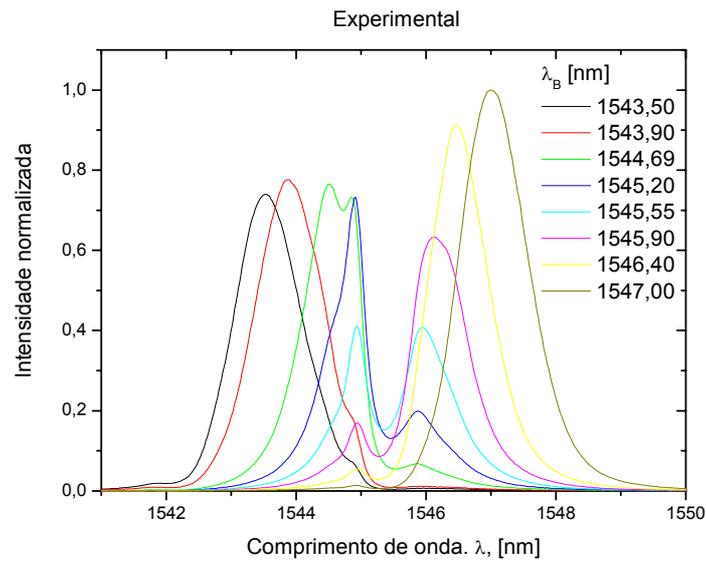


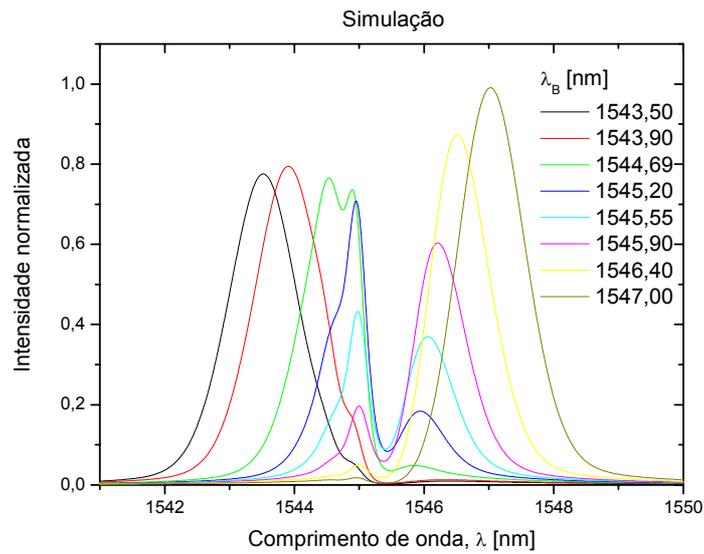
Figura 5.11 - Espectros da rede de Bragg fixa e do filtro de transmissão tipo Fabry-Perot, variável. Resultados experimentais e simulados

Antes de ser determinado os desvios nas posições do comprimento de onda de Bragg será analisado a deformação no espectro do sensor de interesse.

O espectro do filtro ajustável tipo Fabry-Perot interrogado sem distúrbio (caminho 1), o espectro da fonte de luz transmitida após passar pela rede de Bragg fixa e o espectro do filtro ajustável com a influência da rede de Bragg (caminho 2) são mostrados na figura 5.12. Esses resultados foram obtidos com a rede de Bragg e o filtro ajustável posicionados espectralmente em 1545.4 e 1545.2 nm, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 5.13 - Espectro observado do filtro tipo Fabry-perot após passar pela rede de Bragg fixa em algumas posições distintas: (a) dados experimentais, (b) simulação

A figura 5.13 (a) ilustra o espectro do filtro variável quando interrogado com a fonte com o espectro deformado pela rede de Bragg fixa. Pode ser visto que, quando o comprimento de onda do filtro ajustável se aproxima do comprimento de onda da rede de Bragg observa-se uma maior deformação no espectro do filtro ajustável medido, tornando menor quando seus comprimentos de onda se afastam. Adicionalmente, foi feita uma simulação considerando os

espectros da figura 5.12, onde o resultado de interesse (espectro indicado) é dado pela convolução do espectro da fonte deformada (sinal após a rede fixa) com espectro do filtro ajustável (espectro real). Os resultados podem ser vistos na figura 5.13 (b). Confrontando as figuras 5.13 (a) e 5.13 (b) verifica-se a boa concordância entre os resultados experimentais e teóricos.

Para analisar o desvio no valor do comprimento de onda do filtro ajustável é usada a equação (5.8). Em primeiro lugar será analisado o método baseado na determinação direta do comprimento de onda através da medida da posição de pico do espectro, equivalente a máxima intensidade.

Na figura 5.14, os resultados do comprimento de onda do filtro ajustável correspondem aos valores obtidos com o auxílio do analisador de espectro óptico, sendo os valores “sem distúrbio” obtidos sem a influência da rede de Bragg fixa, caracterizando os espectros verdadeiros (ou reais). Estes dados foram obtidos usando o caminho 1 no esquema apresentado na figura 5.10. Já o caso “com distúrbio”, as leituras foram feitas considerando o caminho 2, onde é agregada uma deformação no espectro provocada pela rede fixa. Foram feitas simulações para os dois casos, que são também apresentadas na figura 5.14.

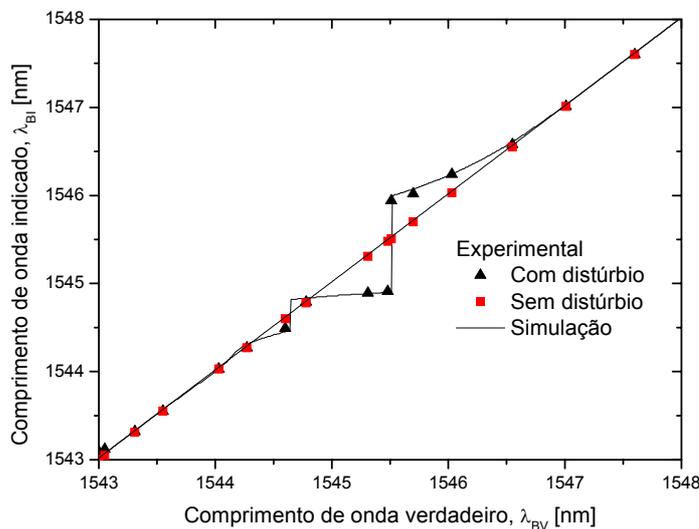


Figura 5.14 - Comparação entre o comprimento de onda do filtro ajustável indicado no analisador de espectro óptico e o seu valor verdadeiro para os casos onde o espectro da luz incidente sofre ou não a influência da rede fixa

Pela figura 5.14 pode ser observado um salto no comprimento de onda, ocasionado pela mudança da posição de pico espectral. Esta mudança de pico

pode ser vista nas figuras 5.13. Lembrando que o sistema de medição busca a maior intensidade para a posição de pico, sem observar a evolução da largura de banda.

Subtraindo os valores dos comprimentos de onda verdadeiros dos valores dos comprimentos de onda indicados apresentados na figura 5.14, podem ser avaliados os desvios utilizando a equação 5.8. Os resultados são ilustrados na figura 5.15.

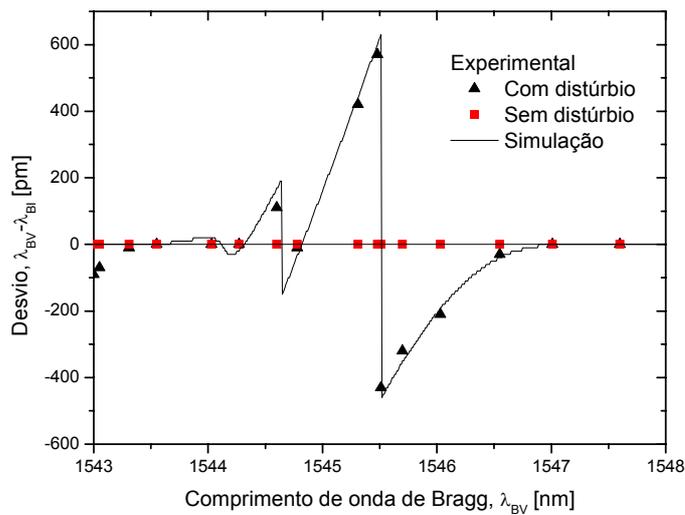


Figura 5.15 - Desvio provocado na posição espectral devido ao distúrbio gerado pela rede fixa

Analisando os resultados apresentados nas figuras 5.14 e 5.15, nota-se que os desvios gerados no comprimento de onda do filtro variam da ordem de 400 a 600 pm, que são erros muito grandes na leitura. Outra observação é a concordância dos resultados experimentais e simulados. E finalmente, pode se concluir que os resultados simulados vistos anteriormente são válidos.

Como foi analisado anteriormente, através de simulações numéricas, a técnica usando filtros fixos mostram ser menos sensível aos distúrbios na fonte do que a baseada na posição espectral. Para confirmar essa baixa sensibilidade foram utilizados dois canais do DWDM para atuar como filtros fixos no sistema óptico acima, figura 5.10, acoplados a um medidor de potência. Tal medida foi feita simultaneamente nos dois canais existentes no medidor de potência. Os espectros dos filtros com características já mencionadas anteriormente, juntamente com suas respectivas simulações são mostrados na figura 5.16.

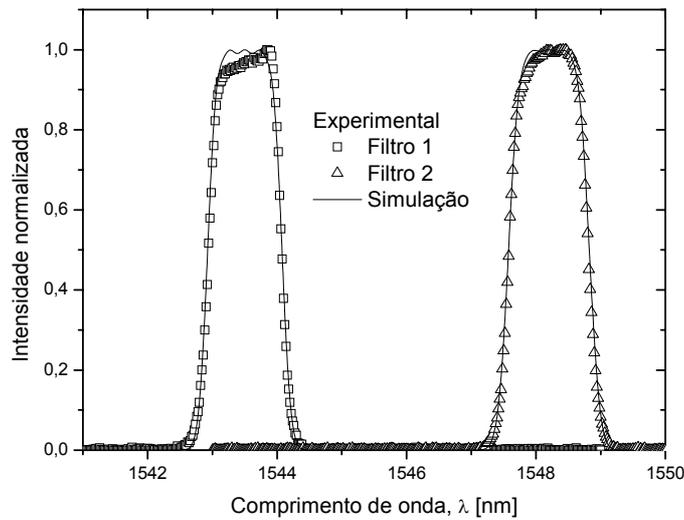
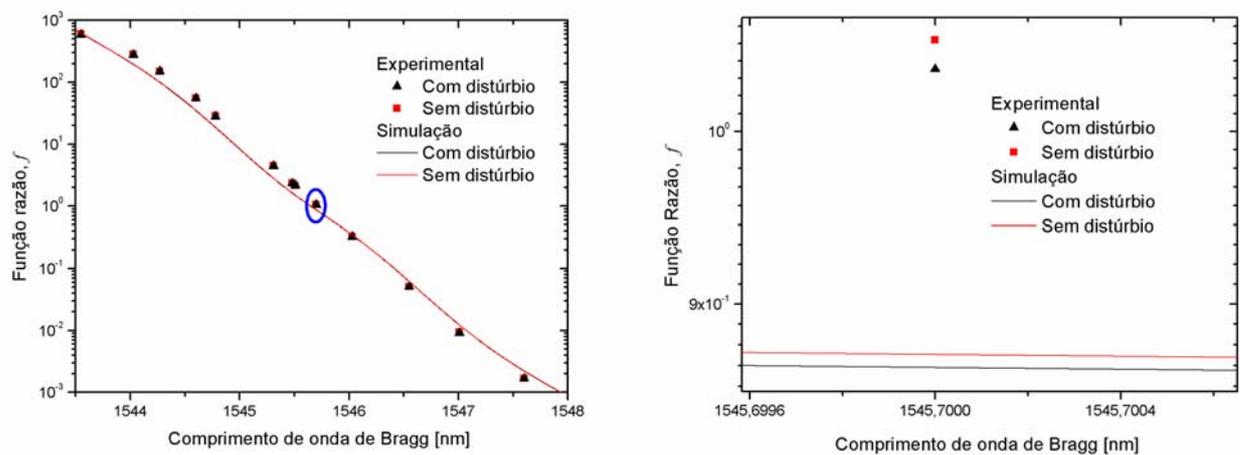


Figura 5.16 - Espectros do DWDM, usados como filtros

Com as potências obtidas em cada fotodetector foi tomada a razão entre elas, relacionando seu valor com o comprimento de onda do sensor, como já foi discutido no capítulo anterior. Tanto os resultados experimentais quanto as simulações são apresentados na figura 5.17.



(a)

(b)

Figura 5.17 – (a) Função gerada pela razão entre as potências obtidas no medidor de potência óptica versus o comprimento de onda do filtro ajustável para os casos com e sem influência da rede fixa; (b) visualização em escala ampliada, região do círculo.

Nas figuras 5.17(a) e (b) é possível verificar que no confronto das funções razão f , com e sem distúrbios, seus valores não apresentam grandes disparidades,

conseqüentemente o desvio no comprimento de onda será praticamente desprezível.

Para determinar o desvio no comprimento de onda do filtro, usando as informações contidas na figura 5.17, basta usar a seguinte relação,

$$Desvio_{FF} = (f_c - f_s) \left[\frac{df_s}{d\lambda_B} \right]^{-1} \quad (5.9)$$

onde relaciona o desvio no comprimento de onda com a variação da função razão. Sendo f_s e f_c definidos como a função razão para os valores obtidos sem e com distúrbio, respectivamente.

De posse da equação (5.9) e dos dados apresentados na figura 5.17 pode-se determinar o desvio do comprimento de onda do filtro, quando é usada a técnica de filtros fixos. Esse resultado, juntamente com o exposto na figura 5.15 são ilustrados na figura 5.18.

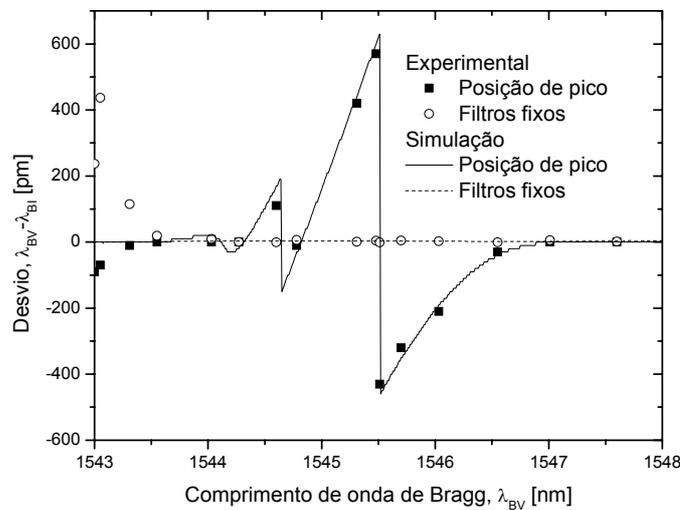


Figura 5.18 - Comparação entre o desvio obtido na leitura da posição de pico espectral e no uso da técnica de filtros fixos

O que já era previsto pelas análises feitas a priori, onde o desvio estimado na posição do comprimento de onda era mais acentuado quando utilizado o método baseado na posição de pico espectral, agora pode ser comprovado pelos resultados mostrados na figura 5.18.

5.3.

Análise do desvio no comprimento de onda de Bragg devido à variação da modulação residual no espectro da fonte de luz

Os dois principais parâmetros que caracterizam um sensor a rede de Bragg são o índice de refração do núcleo da fibra e o período da rede, equação (2.2), qualquer distúrbio na rede produzirá uma variação na posição do comprimento de onda de Bragg. Entretanto, se o espectro da luz que incide sobre a rede sofrer alguma alteração na sua forma espectral observará uma mudança no espectro refletido (ou transmitido) que levará a uma avaliação errada do estado da rede.

Um dos problemas freqüentes na aplicação da rede de Bragg é a influência da temperatura nos valores a serem medidos. A temperatura também pode influenciar nos resultados de interesse indiretamente. Por exemplo, se a fonte de luz tiver uma modulação residual, tipicamente encontrada nos SLED (*Superluminescent Light Emitting Diode*), e for submetida a uma variação de temperatura, pode-se observar que o espectro como um todo varia em função desta temperatura e conseqüentemente o espectro refletido da rede de Bragg lido com o auxílio dessa fonte de luz será modificado.

A idéia é analisar, através de simulações, a influência da variação da modulação residual no comprimento de onda de Bragg gerada pela variação da temperatura. O desvio no comprimento de onda será investigado através de dois métodos. O primeiro método baseia-se na posição de pico espectral (intensidade máxima), e o outro proposto, baseado no método de filtros fixos. Esses métodos de medidas serão confrontados a fim de mostrar a capacidade do método proposto. A confiabilidade dos resultados simulados é sustentada pelos resultados já obtidos e discutidos neste trabalho nos capítulos anteriores.

5.3.1.

Modelo teórico

Para analisar o espectro refletido de uma rede de Bragg cuja fonte de luz, com modulação residual, sofre influência da temperatura serão feitas simulações numéricas baseadas na teoria e nos dados obtidos a partir dos fabricantes da fonte. O espectro da fonte de luz com modulação residual, considerando um perfil gaussiano, pode ser dada por

$$I_{SLED} = y_{SLED} + I_o \exp\left[-\alpha_{SLED} (\lambda - \lambda_{SLED})^2\right] \quad (5.10)$$

$$I_o = 1 - \left[y_{SLED} + \frac{I_r}{2} \left(1 + \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda_r} \lambda + \phi \right) \right) \right] \quad (5.11)$$

$$\alpha_{SLED} = \frac{4 \ln 2}{b_{SLED}^2}$$

onde I_o é a amplitude da fonte de luz com modulação residual; I_r é a amplitude da modulação; y_{SLED} é o *offset* (representa o ruído nos fotodetectores); λ_{SLED} é o comprimento de onda da fonte; λ_r é o período espectral da modulação residual; b_{SLED} é a largura de banda a meia altura, FWHM (*Full Width Half Maximum*), da fonte; ϕ é a fase que está associada à temperatura.

A partir das equações apresentadas é possível representar o espectro da fonte modulado. A variação da modulação residual será representada pela mudança de fase ϕ que está associada à variação da temperatura.

O espectro do sensor que será investigado pode ser definido com um perfil gaussiano que melhor represente os resultados obtidos experimentalmente, e pode ser dado por

$$S = y_s + S_o \exp\left[-\alpha_s (\lambda - \lambda_s)^2\right] \quad (5.12)$$

$$\alpha_s = \frac{4 \ln 2}{b_s^2}$$

onde S_o é a amplitude do sensor ; λ_s é o comprimento de onda do sensor; b_s é a FWHM do sensor; y_s é o *offset*

Pela teoria já discutida nos capítulos anteriores é sabido que, quando uma fonte de luz incide sobre um sensor seu espectro refletido pode ser expresso por

$$Sr = I_{SLED} \cdot S \quad (5.13)$$

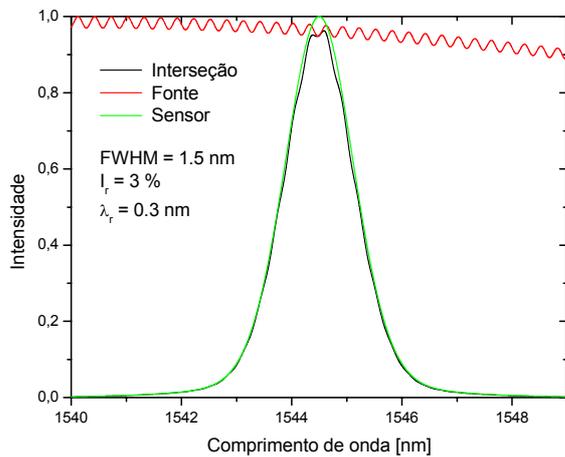
De posse das equações (5.10) (5.12) e (5.13) podem ser simulados casos que representam os resultados reais esperados, de forma a avaliar a influência da

variação da modulação a partir da mudança de fase com relação ao desvio observado no comprimento de onda de Bragg lido.

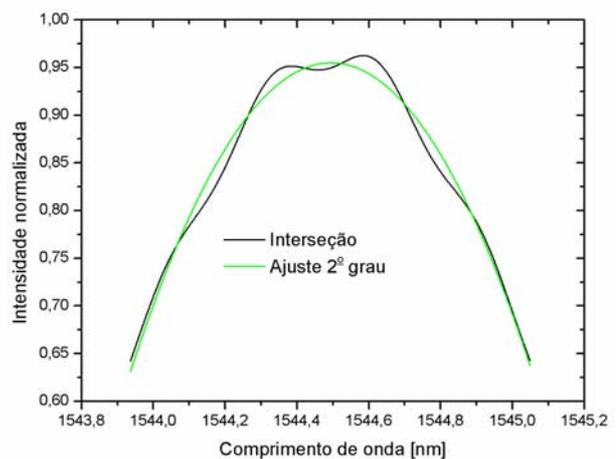
5.3.2. Resultados e discussão

Para representar a fonte de luz com modulação residual baseada na teoria apresentada no item anterior, foram consideradas as informações contidas nos manuais (*data Sheet*) da *Opto Speed e Superlum Diodes Ltd.* Como exemplo é tomado um SLED centrado em 1530 nm com FWHM de 50 nm que tem uma amplitude da modulação residual, I_r , tipicamente de 1% podendo chegar a 3% e o período espectral da modulação, λ_r , da ordem de 0.3 nm.

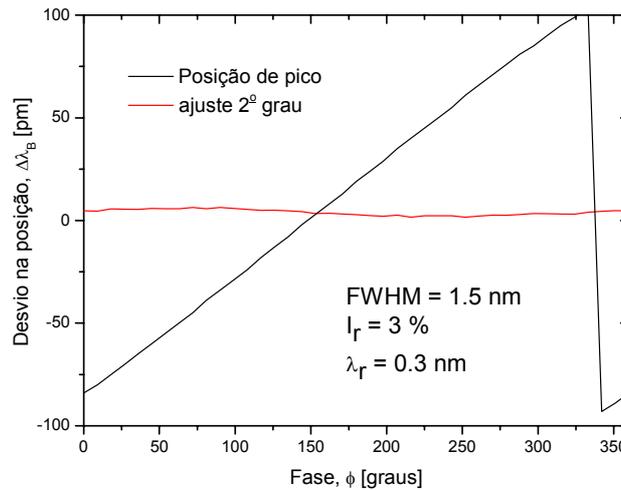
A figura 5.19 (a) ilustra os espectros da fonte com modulação residual, do sensor e do espectro refletido pelo sensor ao ser lido com o auxílio da fonte (interseção fonte-sensor). Estes resultados foram obtidos a partir das equações apresentadas na seção anterior. A interseção fonte-sensor, espectro refletido, foi ajustada usando um polinômio de segunda ordem, figura 5.19 (b), considerando somente os valores maiores que 2/3 da altura máxima do espectro.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.19 - Análise do método baseado em posição de pico. (a) Espectros da fonte com modulação, do sensor e da interseção entre eles; (b) espectro da interseção fonte-sensor e o ajuste polinomial; (c) Desvio na posição de pico com e sem ajuste.

O desvio é definido como sendo a diferença entre a posição verdadeira do sensor e a posição indicada pelo espectro refletido do sensor, com a influência da fonte. O desvio observado no comprimento de onda de Bragg quando o sensor é mantido fixo em 1545 nm e a fase da modulação residual da fonte varia de 0 a 360 graus é apresentado na figura 5.19 (c), em adição são ilustrados os valores com ajuste. Para estas simulações foram considerados os seguintes valores: amplitude da modulação da fonte de 3%, FWHM do sensor de 1.5 nm e comprimento de onda da modulação de 0.3 nm.

Os resultados apresentados nas figuras 5.19 (b) e 5.19 (c), representam as medidas obtidas com o método baseado na posição espectral. Pode-se observar que o desvio máximo na posição, causado pela modulação da fonte, é da ordem de 90 pm, um valor considerável dependendo da aplicação. Este valor pode ser diminuído para 5 pm se for feito um ajuste no espectro, mas com isso o processo de leitura torna-se mais lento.

Uma forma alternativa de obter os resultados é usar a técnica de demodulação baseada em dois filtros fixos. Esta técnica já foi amplamente discutida nos capítulos anteriores, onde foram mostradas suas vantagens e limitações. Agora ao invés de trabalhar diretamente com o espectro refletido do sensor, será considerada a área da curva de interseção entre o espectro refletido do

sensor e os filtros fixos. Esta área de interseção é definida como a convolução em um ponto. A motivação em usar esta técnica é avaliar se a modulação da fonte exerce grandes influências nos resultados como visto na técnica baseada na posição espectral.

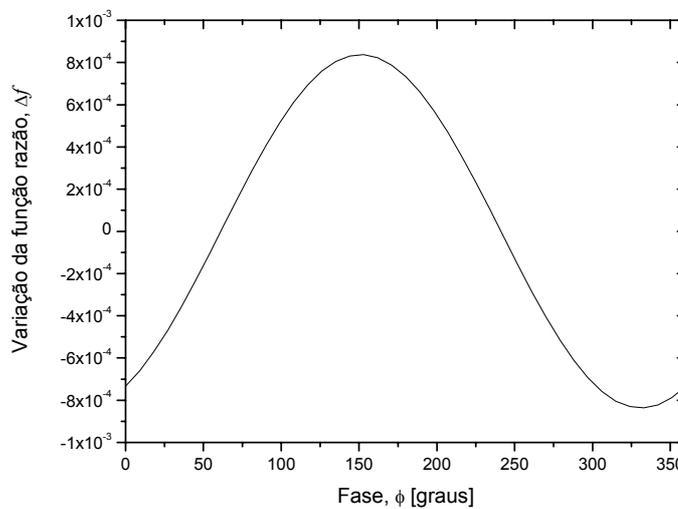
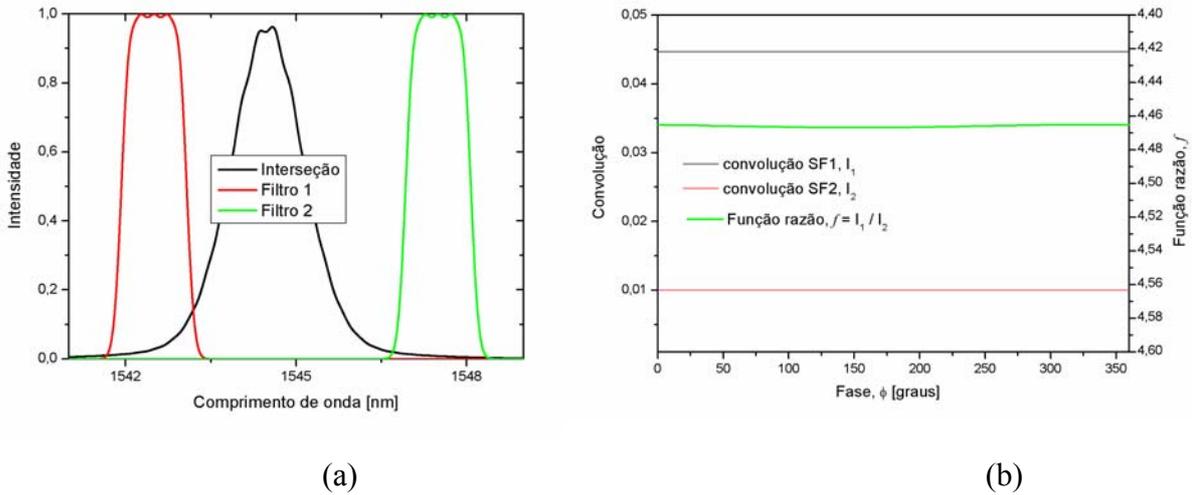


Figura 5.20 - Análise baseada no método de dois filtros fixos: (a) Espectros dos filtros e da interseção fonte-sensor; (b) Convoluções e razão entre elas; (c) Variação da função razão

Os resultados obtidos baseados na técnica de filtros fixos são tomados, considerando os mesmos valores que foram usados no caso da técnica baseada na posição espectral. Os espectros da interseção fonte-sensor, e dos filtros são apresentados na figura 5.20 (a). Os espectros dos dois filtros de transmissão são

simulações baseadas nos espectros reais dos filtros que compõe o DWDM com FWHM de 1.2 nm, posicionados em 1542.5 e 1547.5 nm e o sensor está centrado em 1544.5 nm. Na figura 5.20 (b) são ilustrados as convoluções pontuais do espectro da interseção fonte-sensor com os filtros, I_1 e I_2 . É apresentada também a razão entre estas convoluções, que é o valor de interesse. A variação da razão entre as convoluções relativas a cada filtro, em função da mudança de fase da modulação da fonte, é apresentada na figura 5.20 (c). Pelos resultados, a variação da função razão f é da ordem de um milésimo do valor da razão, mostrando ser pouco sensível às flutuações.

Para uma análise mais completa são consideradas as influências causadas pela modulação, quando são usados sensores com diferentes larguras espectrais e também a relação que existe com diferentes amplitudes da modulação no espectro da fonte.

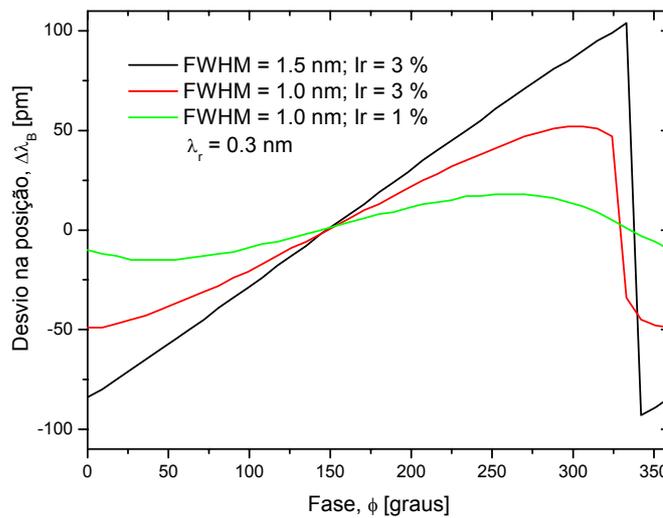


Figura 5.21 - Desvio na posição de pico considerando o método baseado na posição espectral, para dois diferentes casos: variação do FWHM do sensor e da amplitude da modulação da fonte

Na figura 5.21 é apresentado o desvio no comprimento de onda para casos diferentes, onde se varia o FWHM do sensor e a amplitude da modulação da fonte. Em todos os casos a fase da modulação da fonte é variada de 0 a 360 graus, mantendo o sensor fixo. São considerados FWHM do sensor e amplitude da modulação da fonte da ordem de 1.5 nm e 3 %, 1.0 nm e 3 %, 1.0 nm e 1 %, respectivamente. Pode-se observar a partir desta figura a influência dos valores a serem tomados. Quanto maior a FWHM do sensor e a amplitude da modulação, maior será o desvio na posição.

De forma similar, considerando os mesmos valores de FWHM do sensor e da amplitude da modulação da fonte tomados na técnica baseada na posição espectral, são feitas simulações para o método de filtros fixos. Os resultados são ilustrados nas figuras 5.22 (a) e 5.22 (b).

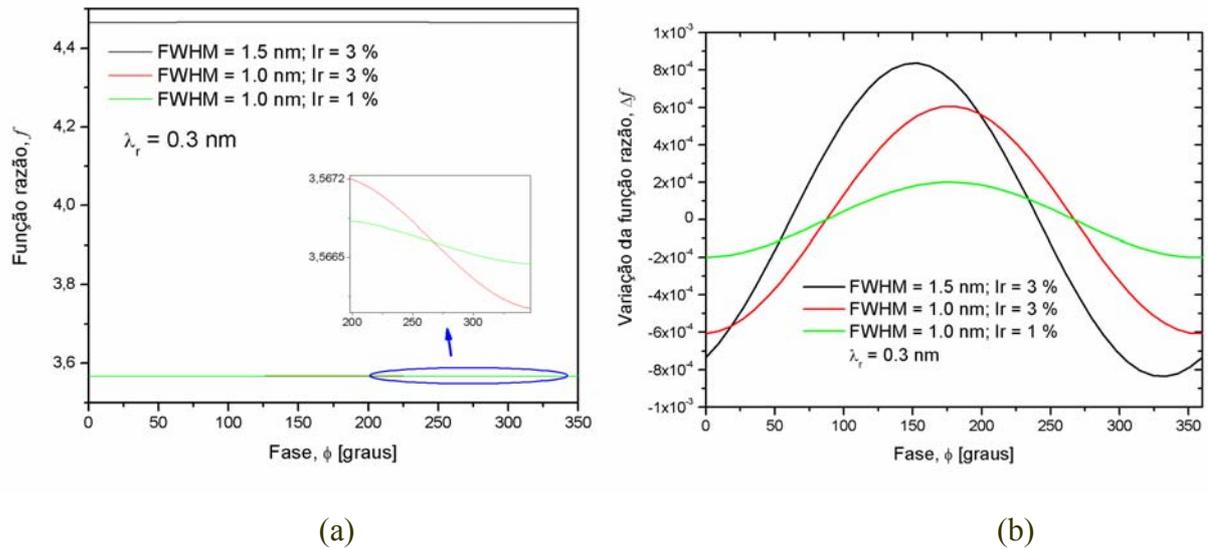


Figura 5.22 - Método de dois filtros fixos. (a) função razão; (b) variação da função razão. Para dois diferentes casos: variação do FWHM do sensor e da amplitude da modulação da fonte

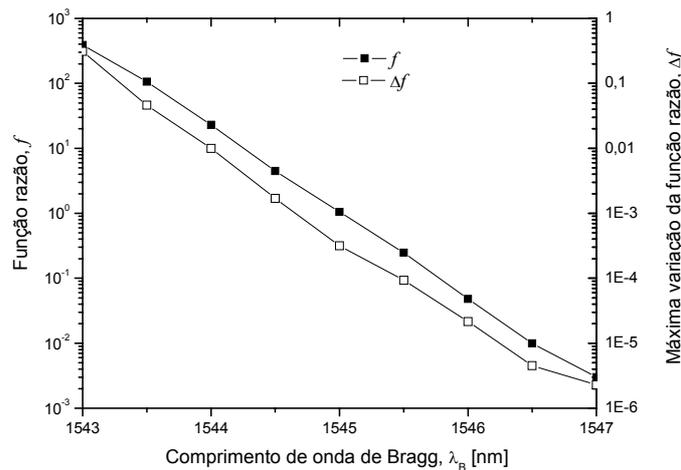
Na figura 5.22 (a), o quadro corresponde a região dentro da elipse. Considerando estes resultados podemos obter a variação da razão apresentada na figura 5.22 (b). Conseqüentemente pode-se concluir que com o método baseado em filtros fixos observa-se também que a variação é maior se for tomado valores de FWHM e amplitude da modulação maiores.

Até aqui a forma de verificar a influência da mudança de fase usando o método de filtros fixos, foi através da variação da função razão f . Entretanto para confrontar os resultados obtidos a partir do conceito da técnica baseada na posição espectral e de filtros fixos faz-se necessário obter valores com mesma unidade de grandeza.

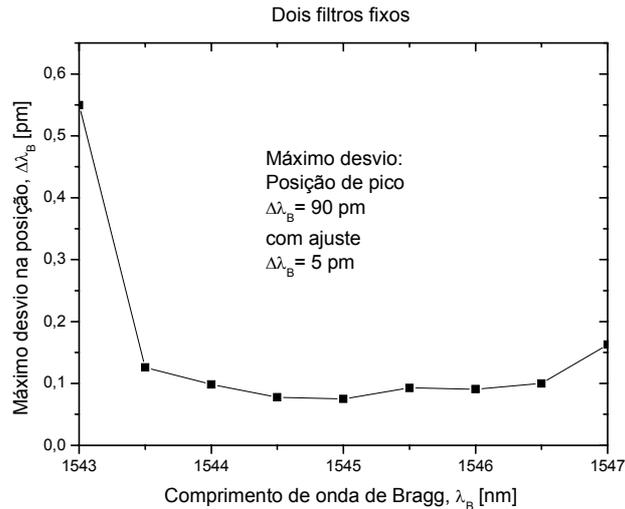
No método baseado na posição espectral o valor do desvio na posição é obtido diretamente, medindo a posição do comprimento de onda de Bragg, mas no caso do método baseado em filtros fixos para obter o valor de desvio na posição é necessário converter a variação da função razão em variação de comprimento de onda. A expressão que relaciona estes dois parâmetros é dada por

$$\Delta\lambda_B = \Delta f \cdot \left[\frac{df}{d\lambda_B} \right]^{-1} \quad (5.14)$$

Para obter o desvio na posição é essencial construir a curva de calibração que caracteriza a razão f em função do comprimento de onda de Bragg. Na simulação, para cada posição do sensor era variada a fase da modulação da fonte, sendo tomado o valor médio da razão f e sua máxima variação. Estes valores podem ser visto na figura 5.23 (a). Usando a equação (5.14) é possível avaliar o desvio na posição convertendo a variação da função razão f em variação de comprimento de onda, figura 5.23 (b). Estes resultados foram obtidos considerando o pior caso, onde a modulação da fonte era de 3% com comprimento de onda de 0.3 nm e o sensor com FWHM de 1.5 nm. Os filtros foram selecionados nas posições fixas de 1542.5 e 1547.5 nm, enquanto o sensor era variado de 1543 a 1547 nm.



(a)



(b)

Figura 5.23 - (a) função razão f e máxima variação da função razão ; (b) Máximo desvio da posição. Para diferentes posições do sensor

Usando a técnica baseada na posição de pico espectral observa-se que o desvio no comprimento de onda do sensor, provocado pela variação da modulação da fonte, em média permanece com o mesmo valor quando o sensor é variado. Entretanto, isto não ocorre com a técnica baseada em filtros fixos. Na figura 5.23 (b) são confrontadas as duas técnicas através do máximo desvio na posição. Na técnica baseada na posição de pico espectral o valor obtido é da ordem de 90 pm, mas com um ajuste polinomial pode chegar a 5 pm, porém o processo de leitura torna-se lento. Já com a técnica de filtros fixos o valor máximo é 0.6 pm em uma faixa dinâmica de 4 nm, sua limitação está na posição dos filtros. O desvio será maior quando o sensor se encontrar próximo dos filtros. A pouca influência da modulação da fonte em relação ao valor do comprimento de onda do sensor, quando é usada a técnica de filtros fixos, está associada a pouca variação da área de intersecção entre os espectros do sensor e dos filtros. Lembrando que os valores de potência medidos nos fotodetectores estão relacionados com o grau de intersecção dos espectros.