

## 2 Conceitos Preliminares das redes de Bragg

Para uma melhor compreensão do trabalho presente é indispensável explicar alguns princípios básicos importantes que foram captados da pesquisa bibliográfica. Este capítulo se concentra de forma resumida em informações objetivas, como algumas propriedades fundamentais das redes de Bragg em fibras ópticas. Adicionalmente, se explica a técnica de demodulação e calibragem para simples sistemas de leitura na qual é o objetivo de análise. E, para finalizar o capítulo, se define a dependência da interrogação de uma rede de Bragg com a perturbação externa da fonte de luz.

### 2.1. Definição e parâmetros das redes de Bragg em fibras ópticas

#### 2.1.1. Redes de Bragg

Uma rede de Bragg consiste em uma modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica. A luz guiada ao longo do núcleo da fibra óptica é refletida por cada plano (região de interface no perfil longitudinal do índice de refração) da rede. Para as frequências que não satisfazem a condição de Bragg, a luz refletida por cada plano subsequente torna-se progressivamente fora de fase e eventualmente se cancela. Quando a condição de Bragg é satisfeita, a parcela da luz refletida por cada plano da rede contribui construtivamente na direção contra propagante, formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede [1]. Como descrito na figura 2.1, a estrutura atua como um filtro de reflexão altamente seletivo de comprimento de onda com o pico de refletividade,  $\lambda_B$ , determinado pela condição combinada de fase da eq. (2.1).

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.1)$$

Onde  $\lambda_B$  é chamado o comprimento de onda de Bragg,  $n_{eff}$  é o índice de refração efetivo no núcleo da fibra para o modo de propagação e  $\Lambda$  é o período espacial do índice de refração.

Quando a rede é iluminada por uma fonte de luz de banda larga, uma faixa estreita ordenada e modulada do espectro de luz, centrada no comprimento de onda de Bragg, é refletida, sendo o restante do espectro transmitido. Desta forma se alteramos o espaçamento periódico da rede, também ocorre uma alteração do índice de refração do modo guiado sofrendo uma deformação na qual se observara como uma variação da posição do comprimento de onda de Bragg.

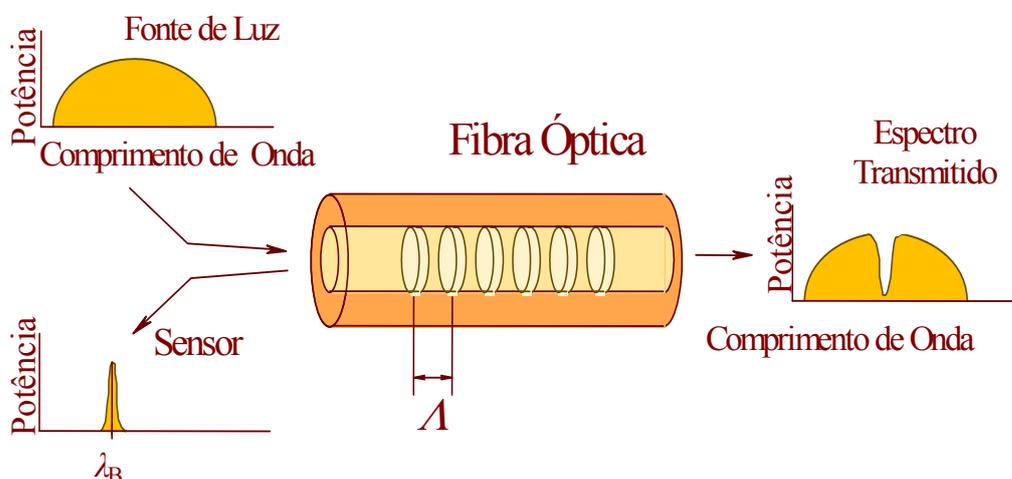


Figura 2.1 Representação de uma rede de Bragg a fibra óptica.

### 2.1.2. Refletividade de rede de Bragg uniforme

A refletividade da rede de Bragg é um parâmetro importante que depende do comprimento da rede e do comprimento de onda que representa a curva gaussiana da rede. A refletividade da rede cresce com o aumento da mudança no índice de refração induzido, e também com o aumento do comprimento da rede.

A reflexão de uma rede de Bragg pode variar de valores próximos a 100% a valores tão baixos quanto necessário, próximos a 0% de refletividade. A seleção de refletividade depende da aplicação como sensor, e, sua dificuldade de fabricação aumenta com o aumento da refletividade.

Usando a teoria de acoplamento modal, se explica em forma quantitativa a eficiência de difração e dependência espectral das redes de Bragg. É uma técnica simples quanto à modelagem das propriedades ópticas dos tipos de redes mais comuns.

Na maioria das fibras consideradas, as alterações de índice de refração induzidas por incidências de luz ultravioleta são aproximadamente uniformes ao longo do núcleo da fibra, e desprezível fora do núcleo. Assumindo-se isso se podem descrever as mudanças do índice de refração pela eq. (2.2).

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{co}}(z) \left[ 1 + s \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z)\right) \right] \quad (2.2)$$

Onde  $\delta n_{eff}(z)$  é o perfil do índice de refração efetivo,  $s$  é a visibilidade da franja, associada à alteração do índice de refração;  $\varphi(z)$  é associado ao *chirp* da rede,  $\delta n_{co}$  equivale a um nível DC da rede, correspondendo à média do índice em um período da rede, ou ao envelope ao longo de toda a rede, e  $z$  é a direção de propagação ao longo do eixo longitudinal da fibra [2].

A eq. (2.2) de modo acoplado descreve a resposta espectral de uma rede de Bragg em fibra óptica. Em uma rede, a interação dominante ocorre próxima ao comprimento de onda onde ocorre a reflexão. Em conclusão, para uma rede uniforme e de comprimento  $L$ , a potência refletida  $R$  pode ser obtida pela eq. (2.3).

$$R = \frac{\sinh^2 \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}}{-\frac{\zeta^{+2}}{\kappa^2} + \cosh^2 \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}} \quad (2.3)$$

Onde:  $\zeta^+ = \delta_d + \zeta - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}$  é o coeficiente de auto-acoplamento a um nível médio

geral,  $\delta_d = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n_{eff} \left[ \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_d} \right]$ , reflete a dessintonia e,  $\lambda_d = 2n_{eff} \Lambda$  é o

comprimento de onda do pico da reflexão projetado para uma alteração do índice de refração infinitesimalmente fraca ( $\delta n_{eff} \rightarrow 0$ ).

Cada elemento das expressões acima é descrito a continuação:

$$\delta_d = \text{Desvio de frequência.}$$

- $\kappa$ = Coeficiente de acoplamento.  
 $\zeta$ = Coeficiente de auto-acoplamento.  
 $\beta$ = Constante de propagação.

Então, obtém-se que a refletividade máxima de uma rede de Bragg é dada pela eq. (2.4).

$$R_{\max} = \tanh^2(\kappa L) \quad (2.4)$$

A banda de passagem para uma rede de Bragg uniforme é definida como a largura entre os primeiros zeros laterais ao máximo de refletividade, e é usualmente definida como FZFW (*Full Zero Full Width*), dada pela eq. (2.5).

$$2\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\pi n_{\text{eff}} L} \sqrt{(\kappa L)^2 + (\pi)^2} \quad (2.5)$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda central. Assim, tem-se a partir da eq. de refletividade (2.5) a eq. (2.6).

$$\frac{\Delta\lambda_o}{\lambda} = \frac{s\overline{\delta n}_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_d}{s\overline{\delta n}_{\text{eff}} L}\right)^2} \quad (2.6)$$

Se essa alteração de índice de refração for fraca,  $\overline{\delta n}_{\text{eff}}$  é muito pequena  $\left(s\overline{\delta n}_{\text{eff}} \ll \frac{\lambda_d}{L}\right)$ ; então, a expressão anterior mostra-se na eq. (2.7).

$$\frac{\Delta\lambda_o}{\lambda} \rightarrow \frac{\lambda_d}{n_{\text{eff}} L} = \frac{2}{N} \quad (2.7)$$

Caso essa alteração de índice seja muito forte, pode-se expressar que  $s\overline{\delta n}_{\text{eff}} \gg \frac{\lambda_d}{L}$ , então a refletividade depende do índice de refração mostrado na eq. (2.8).

$$\frac{\Delta\lambda_o}{\lambda} \rightarrow \frac{s\overline{\delta n_{eff}}}{n_{eff}} \quad (2.8)$$

Sendo este caso independente do comprimento da rede.

### 2.1.3. Sensibilidade da rede de Bragg

A variação do comprimento de onda de Bragg com respeito a seu índice de refração efetiva e, ao período espacial da rede é afetada por dois agentes principais: a deformação mecânica e a temperatura, ambos aplicados ao sensor diretamente.

A partir da eq. (2.1) consegue-se interpretar os parâmetros físicos mediante uma análise de distúrbios aplicados diretamente sobre o núcleo da fibra óptica.

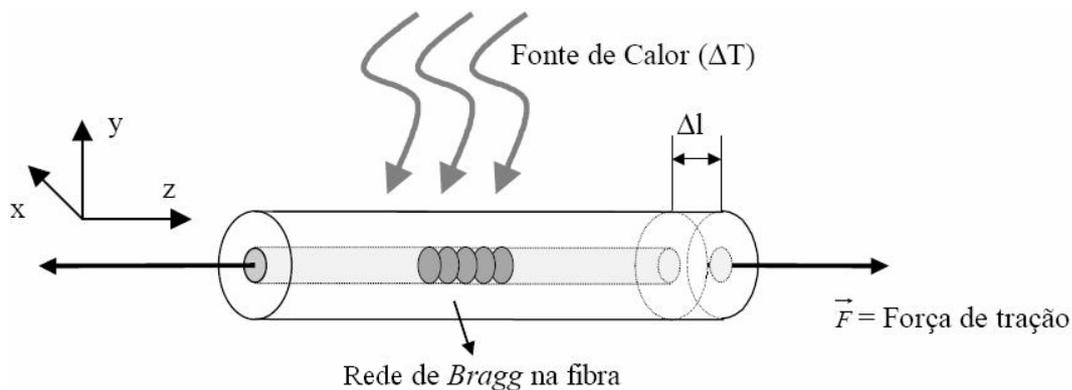


Figura 2.2 Variação do comprimento de onda de Bragg sujeita a uma força de tração e a uma fonte de calor.

Considere a rede de Bragg mostrada na figura 2.2. Uma força  $\vec{F}$  na direção  $+z$  aplicada à rede causa uma variação  $\Delta l$  do comprimento da rede, e uma fonte térmica aplicada à rede causa uma variação  $\Delta T$  da temperatura da mesma. Tanto  $\Delta l$  quanto  $\Delta T$  causam um deslocamento  $\Delta\lambda_{Bragg}$  do pico de refletividade dado pelas eq. (2.9) e (2.10).

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\lambda_{Bragg}} = \left( \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + \left( \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.9)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\lambda_{Bragg}} = S_z(1 - p_e) + (\alpha_\Lambda + \alpha_\beta) \Delta T \quad (2.10)$$

Onde:  $\alpha_\Lambda = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$ ,  $\alpha_\beta = \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$ ,  $S_z$  é a deformação da fibra na direção  $z$ .

Na prática,  $\alpha_\Lambda = 0,55 \times 10^{-6} K^{-1}$  e  $\alpha_\beta = 8,6 \times 10^{-6} K^{-1}$  para fibras de sílica dopadas com germânio. O coeficiente elasto-óptico de deformação é dado por [1, 3],

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (2.11)$$

Onde  $\nu$  é a razão de Poisson da fibra (valor típico de 0,16),  $p_{11}$  e  $p_{12}$  são os coeficientes acusto-ópticos da fibra (para valores típicos de uma fibra dopada com germânio e silício os valores são dados por  $p_{11} = 0,113$ ;  $p_{12} = 0,252$ ; e  $n_{eff} = 1,482$ ). Assim, nas variações de temperatura a sensibilidade é esperada em 14,2pm/°C; e nas variações de deformação se aproxima a 0,74pm/με em uma rede de Bragg centrada em 1550nm [4, 5].

A vantagem do sensoriamento óptico como meio de transporte e como próprio elemento sensor, permite encontrar soluções interessantes e inovadoras para casos onde, os sensores elétricos convencionais não podem ser empregados; pelo que se criaram sistemas de sensores para o estudo de vibrações mecânicas e variações de temperatura, os quais são os mais promissores em virtude de monitoração remota [6].

## 2.2. Técnicas de Leitura

Conhecendo o funcionamento das redes de Bragg, a maioria das análises e problemas se concentra nas técnicas de interrogação para medir deformações ou variações de temperatura a partir das modificações induzidas no espectro óptico de reflexão do sensor. Mantendo eficiência, baixa incerteza, exatidão, velocidade

de medição, custo econômico, etc. [1]. O uso das diferentes técnicas de leitura geralmente se radica na dependência do sistema de interrogação com a aplicação projetada.

Com o objetivo de conseguir medidas reais, são apresentadas nos seguintes itens duas técnicas diferentes de interrogação para sensores a redes de Bragg.

### 2.2.1.

#### **Montagem óptica utilizando Multi-line Wavemeter Optical Channel Analyzer**

Um dos propósitos do presente trabalho é atingir comportamentos de leitura dos sensores em condições dinâmicas ou quase – estáticas, para obter uma maior resolução real do espectro da rede de Bragg. Na procura disto, as diferentes tecnologias de sistemas de leitura usando filtros de interferência apresentam simplicidade de leitura para os sensores de redes de Bragg por sua capacidade de alta resolução destas medidas. A mudança no comprimento de onda da rede de Bragg produz uma mudança na fase óptica que pode ser detectada por uma técnica de varredura interferométrica.

Este interferômetro atua como um analisador de comprimento de onda para a rede de Bragg quando seu caminho óptico é modulado. Neste contexto, uma técnica de leitura simples e direta com baixa razão de medida se conseguiu através de um Analisador de Canais Ópticos (*Wavemeter*).

O analisador utiliza um interferômetro de varredura *Michelson* determinando o comprimento de onda absoluto com uma exatidão de 1,5 pm e com uma faixa de leitura de comprimento de onda de 1270 nm até 1680 nm. A montagem utilizando um *Wavemeter* é mostrada na figura 2.3.

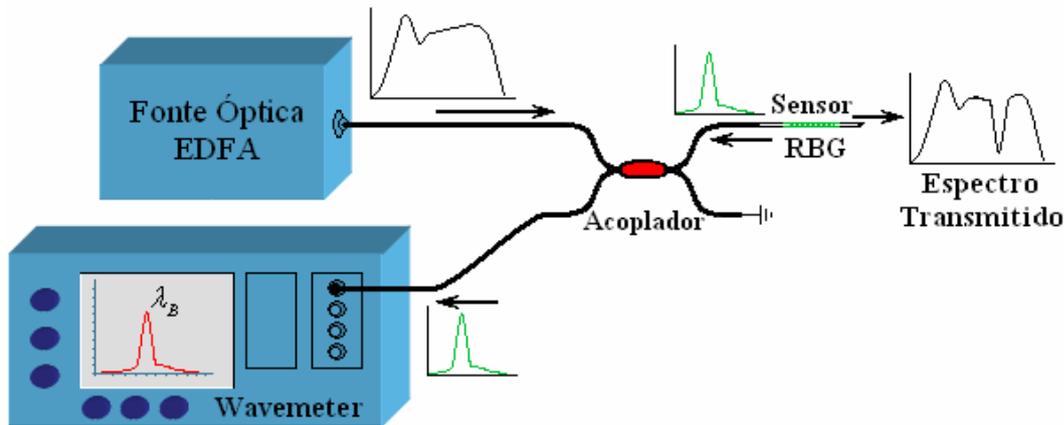


Figura 2.3 Montagem da leitura de um sensor a rede de Bragg com um *Wavemeter*.

Como se ilustra na figura 2.3, a luz emitida pela fonte de luz passa pelo primeiro acoplador incidindo na rede de Bragg e, devido a reflexão do sensor a luz modulada passa novamente pelo acoplador até chegar ao *Wavemeter*, onde é realizada a medição por interferometria. O *Wavemeter* tem uma vantagem sobre muitos equipamentos utilizados comercialmente pela quantidade de canais que captura diferentes picos espectrais de comprimento de onda, mas a resolução é baixa.

Além disso, a simplicidade de montagem, instalação e a rapidez de leitura fazem com que o emprego do *Wavemeter* seja normalmente utilizado em testes de laboratório para calibração de leitura de sensores. A desvantagem é o alto custo e inadequação em áreas de operação remota que limitam sua utilização, embora a técnica de filtragem para localizar a varredura espectral do comprimento de onda do sensor não permite uma visualização adequada de leitura e apresenta um ruído de detecção para sistemas de interrogação com uma grande quantidade de sensores.

Na seguinte figura 2.4, é ilustrado o espectro de um sensor típico de rede de Bragg medido pelo *Wavemeter*.

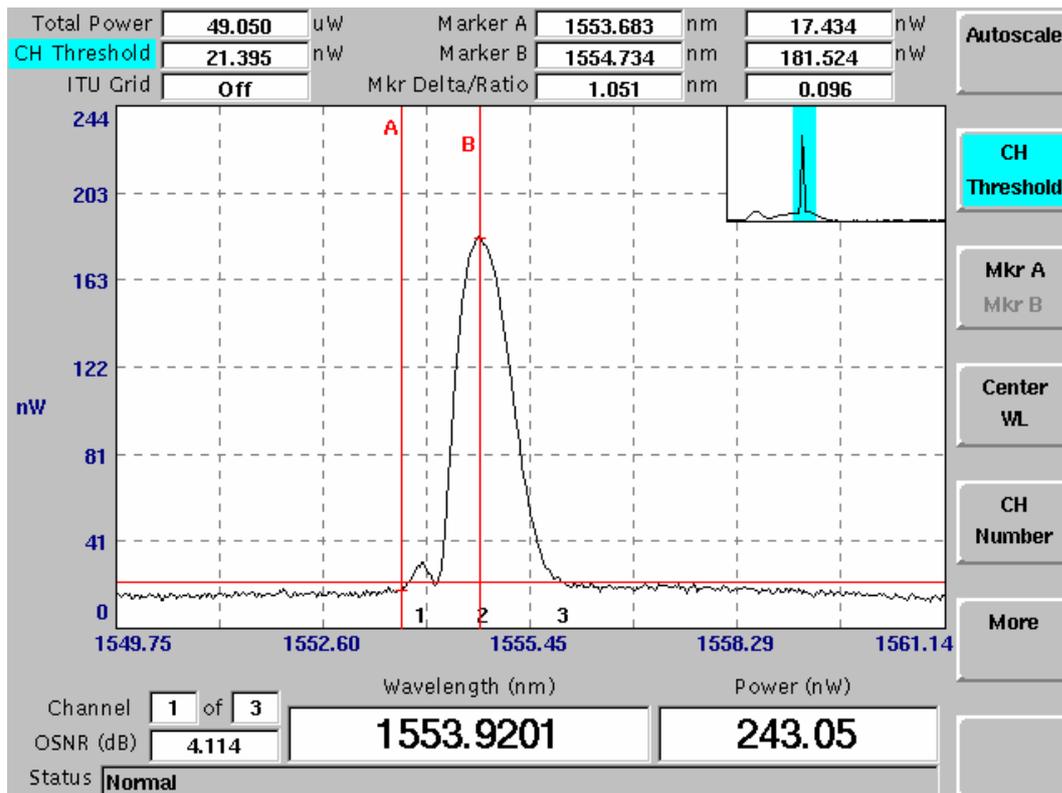


Figura 2.4 Visualização do espectro a rede de Bragg pelo Wavemeter.

### 2.2.2. Técnicas de demodulação

Para nosso estudo é considerado a demodulação óptica, onde a maior parte das técnicas se concentra no uso de filtros de transmissão ajustáveis ou interferométricos. O objetivo principal desta técnica é monitorar a posição espectral de um sensor na variação do comprimento de onda de Bragg. Deve-se em cada caso considerar as bandas de frequência envolvidas, o número de sensores interrogados, a faixa dinâmica de deformação ou temperatura a serem medidas, limitações de espaço, peso e custo do sistema de medição.

Na aplicação de filtros ajustáveis, eles podem variar suas grandezas de tal forma que o seu espectro venha a superpor-se com o espectro da rede de Bragg, conseqüentemente, a convolução terá seu máximo valor, que se interpreta como a posição de leitura do sensor [7], como é mostrado na figura 2.5.

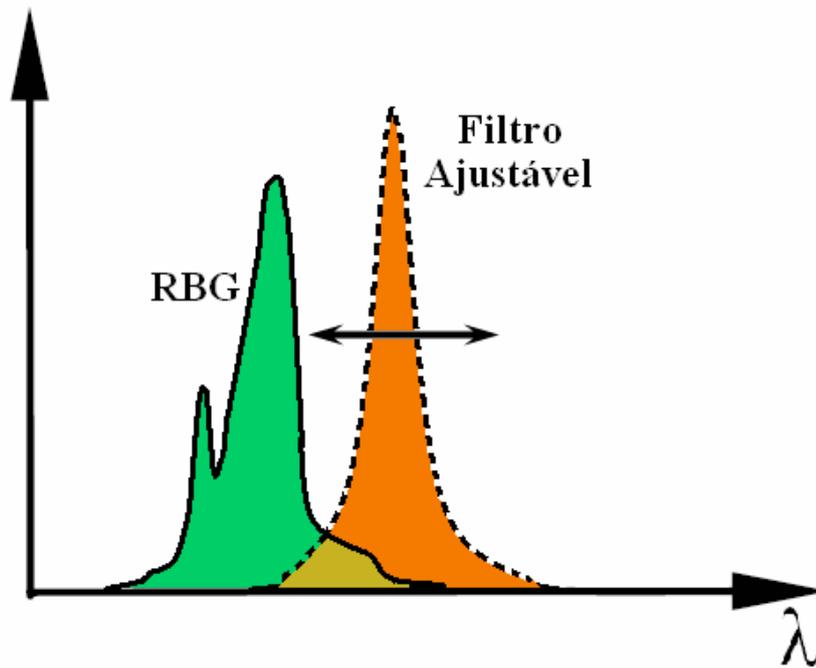


Figura 2.5 Posicionamento por um filtro ajustável ao sensor a rede de Bragg.

### 2.2.3. Técnica de demodulação utilizando um filtro fixo

Sua utilização tem como importante vantagem a possibilidade de aplicação em medidas dinâmicas, mas a eficácia de cada técnica irá depender, dentre outros fatores, das características da fonte utilizada.

A demodulação usando um filtro fixo [8] determina a posição espectral do comprimento de onda de Bragg que é associada ao grau de superposição dos espectros do sensor e do filtro, relacionando assim, a posição do espectro real com a potência óptica lida. Na seguinte figura 2.6 se mostra um sistema de leitura de um sensor a rede de Bragg utilizando a técnica de demodulação com um filtro fixo.

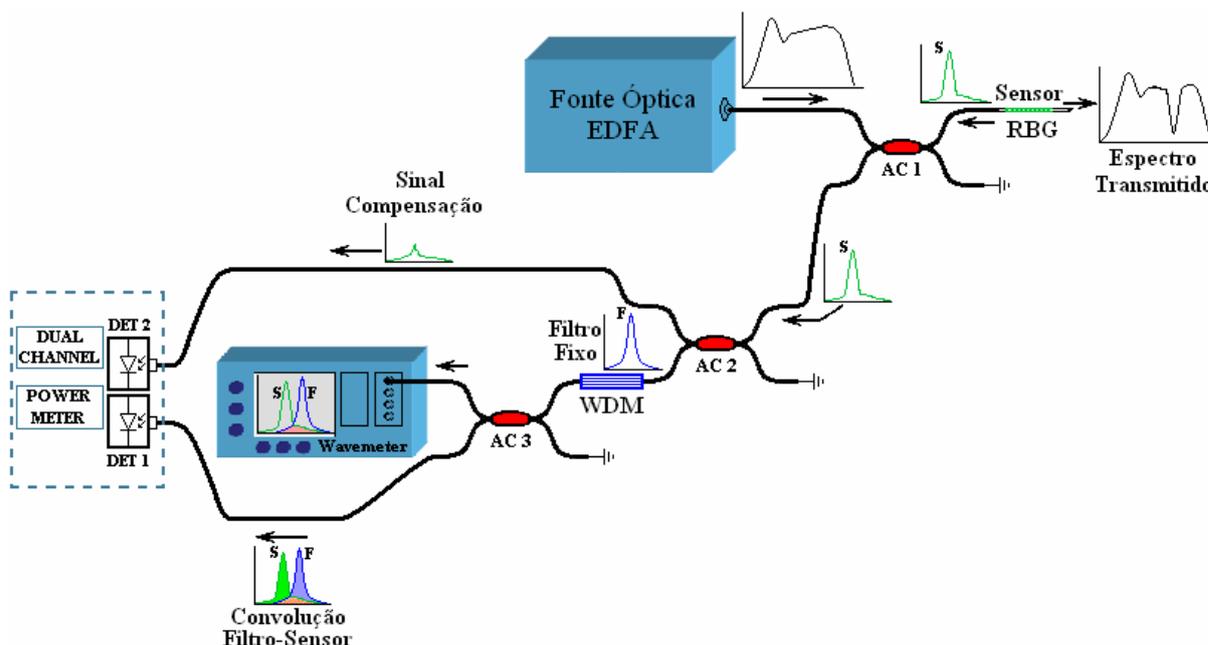


Figura 2.6 Montagem de um sistema óptico de leitura utilizando um filtro fixo.

Da figura 2.6 a fonte óptica emite luz para o cabo da fibra óptica e chega ao primeiro acoplador AC1, onde se incide luz ao sensor a rede de Bragg para que seu respectivo espectro de reflexão volte pelo acoplador AC1 e se incida no segundo acoplador AC2. No acoplador AC2 o espectro refletido da rede passa por um multiplexador de comprimento de onda (*WDM – Wavelength Division Multiplexing*) e, uma pequena faixa espectral de luz é levada diretamente a um fotodetector de compensação (DET2).

Já no multiplexador, um canal com posição espectral do comprimento de onda próximo à posição do comprimento de onda de Bragg faz a interferência espectral como se fosse um filtro fixo intersectando ao espectro do sensor.

Uma vez filtrado o espectro do sensor com o multiplexador a superposição de espectros passa pelo terceiro acoplador (AC3). Este AC3 é necessário para fazer a medição direta com o *Wavemeter* e compará-la com a medição do primeiro fotodetector (DET1) no Medidor de Potência Óptica de Dois Canais.

O segundo fotodetector (DET2) de referência é necessário para compensar possíveis variações de potência na fonte óptica ou devido a perdas de intensidade no sistema óptico.

Esta superposição espectral é conhecida como a Convolução da quantidade de luz do espectro refletido do sensor com a quantidade de luz passante do filtro.

A convolução dos espectros do sensor e do filtro fixo é detectada e interpretada como intensidade óptica proporcional ao comprimento de onda refletido pelo sensor. De modo que os valores obtidos pelo primeiro fotodetector (DET1) devem ser divididos pelos valores obtidos pelo segundo fotodetector de referência (DET2). Em consequência é possível encontrar uma curva de calibração das intensidades pertencentes aos fotodetectores em relação às deformações impostas no comprimento de onda do sensor submetido.

Para maior esclarecimento na figura 2.7 é ilustrado o espectro do sensor e do filtro, onde a região sombreada corresponde à área de interseção (convolução) entre os espectros. Esta região de convolução está associada ao sinal captado pelo primeiro fotodetector que contém a informação direta do comprimento de onda de Bragg e sua variação de leitura quando sofre uma deformação.

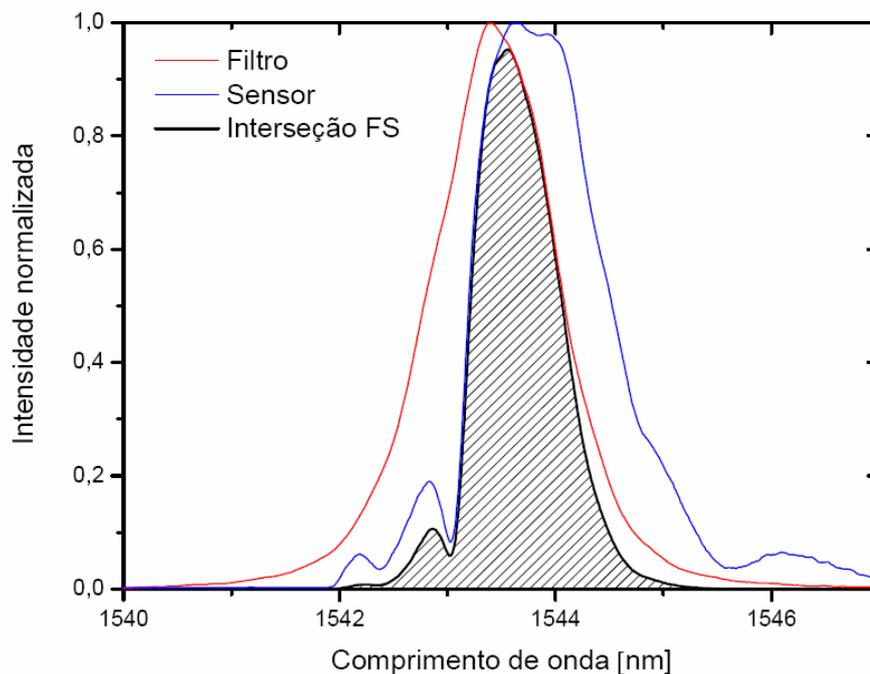


Figura 2.7 Convolução entre os espectros sensor – filtro fixo.

Para definir o comportamento do sistema de leitura compensando as perdas das intensidades dos dispositivos que influenciam a posição do sensor se ilustra a

figura 2.8 onde a razão das intensidades dos fotodetectores DET1 e DET2 desenham uma curva relacionando a intensidade óptica com o comprimento de onda do sensor.

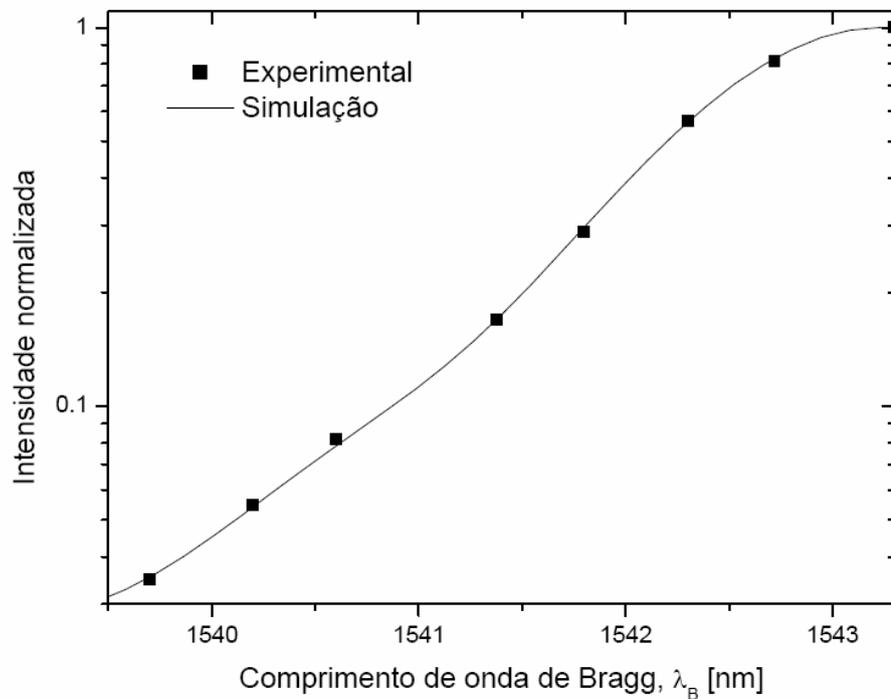


Figura 2.8 Razão das intensidades dos fotodetectores.

A figura 2.8 é uma comparação de resultados experimentais com a simulação numérica. Cabe-se ressaltar que os resultados teóricos e experimentais concordam muito bem.

#### 2.2.4. Técnica de demodulação utilizando dois filtros fixos

Este item aborda a técnica de dois filtros fixos que é um aperfeiçoamento do sistema baseado em um filtro fixo, visto anteriormente. O objetivo principal é conseguir um maior intervalo de medição do sensor com baixas incertezas na leitura [9].

A montagem óptica na figura 2.9 representa o princípio de funcionamento similar ao sistema de leitura utilizando um filtro fixo (figura 2.6). Mas, desta vez o sistema utiliza dois filtros fixos.

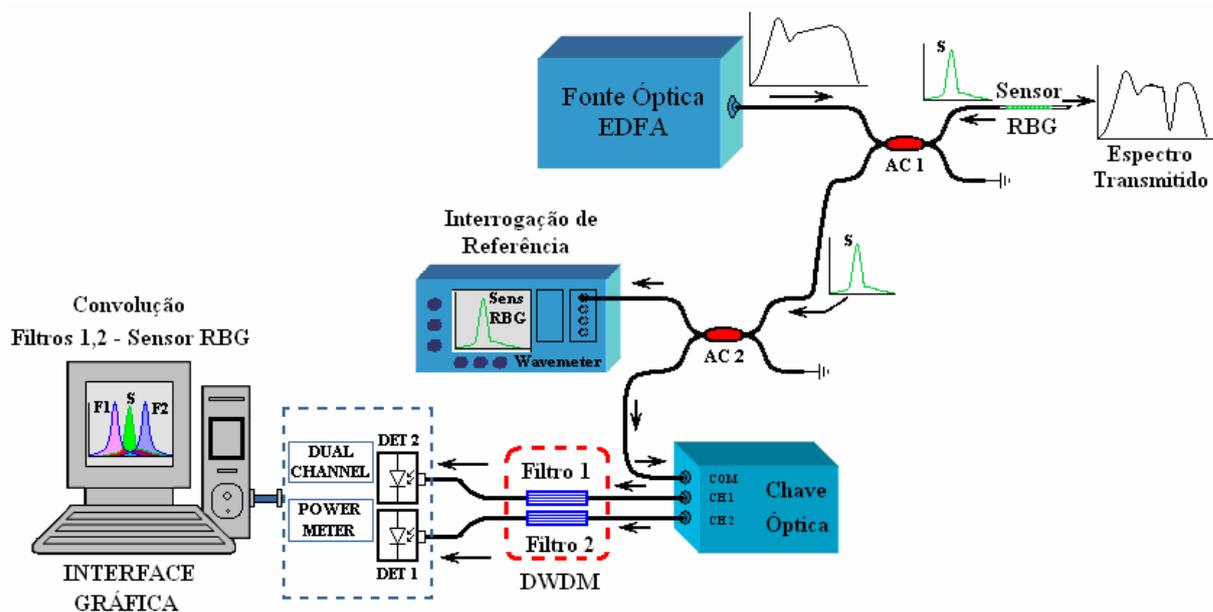


Figura 2.9 Montagem de um sistema óptico de leitura utilizando dois filtros fixos.

Na figura 2.9 o sensor é iluminado por uma fonte de luz, logo o espectro de reflexão passa pelo acoplador AC2 e simultaneamente uma das trajetórias da luz será medida diretamente pelo *Wavemeter*. Na segunda trajetória, a transmissão do espectro refletido do sensor é controlada por uma chave óptica antes de ser interferida por dois filtros fixos de transmissão de um demultiplexador *DWDM* – *Dense Wavelength Division Multiplexing*.

A superposição espectral de interferência no demultiplexador *DWDM* indicara a leitura nos fotodetectores 1 e 2 do medidor de potência de dois canais. As leituras do medidor mostram as convoluções dos espectros dos filtros fixos em relação ao espectro do sensor. O comprimento de onda de reflexão do sensor é centralizado na intersecção das curvas espectrais dos filtros, permitindo assim uma varredura do sensor nas duas direções.

A importância desta convolução espectral é a resposta da razão entre as potências medidas nos fotodetectores 1 e 2. Esta curva de razão mostrada na Figura 2.10 é contingente a qualquer variação de intensidade no sistema, sendo sensível apenas a variações espectrais do sensor, tornando o sistema suficientemente auto referenciado.

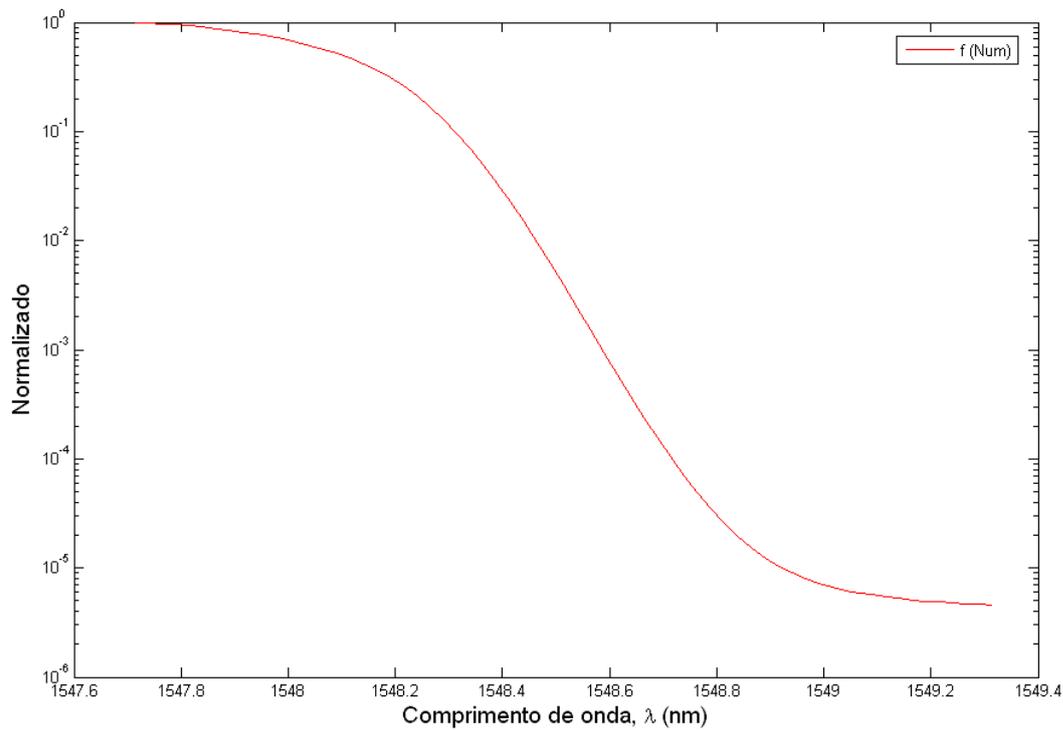


Figura 2.10 Curva de calibração para um sistema de dois filtros fixos.

A montagem do sistema óptico com dois filtros fixos, permite conhecer a faixa dinâmica de leitura dos sensores mantendo uma baixa incerteza nas medidas.

Porém uma perturbação na fonte de luz como mostrado na figura 2.11 pode acrescentar um aumento nas incertezas e ocasionar um erro de leitura. A situação torna-se mais grave quando é considerado um sistema de multiplexação de sensores em uma única fibra.

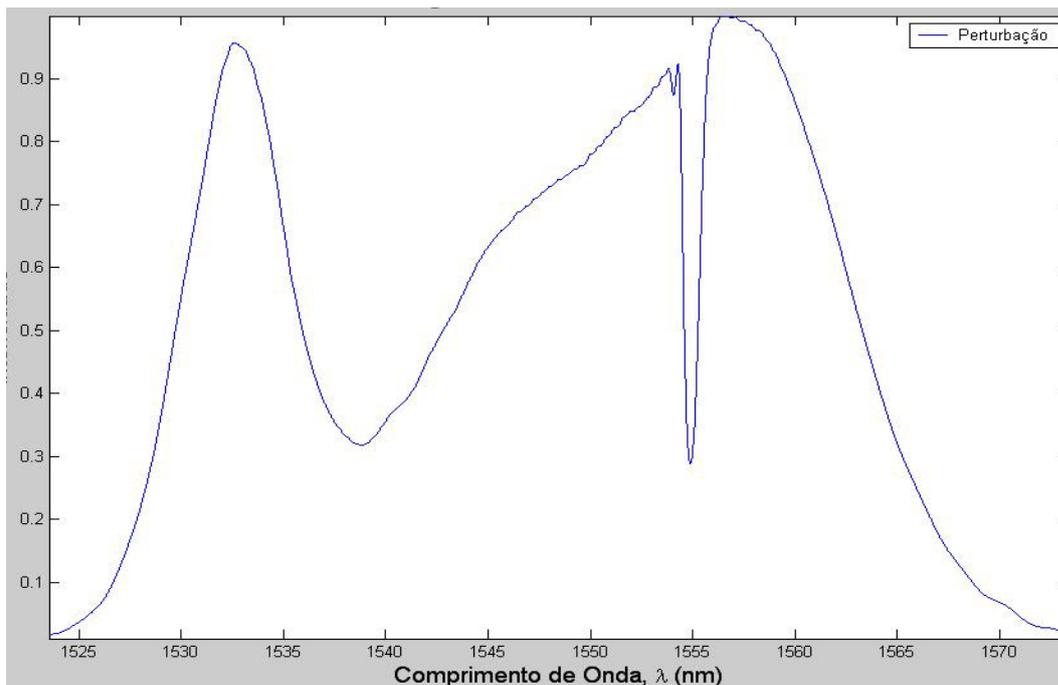


Figura 2.11 Gráfica experimental de perturbação na fonte de luz.

Esta perturbação da fonte mostrada na figura 2.11 pode ser provocada pela interferência de uma grande quantidade de sensores medidos em um mesmo comprimento de onda. Corrigir essa perturbação é o nosso enfoque de trabalho, demonstrando que a técnica facilita, economiza e minimiza parâmetros de interrogação.

### 2.2.5. Análise da técnica utilizando dois filtros fixos

A técnica com dois filtros fixos é uma solução vantajosa por sua leitura auto-referenciada em diferentes sistemas de sensoriamento aplicados para medir vibrações mecânicas e variações de temperatura. Onde utilizam como elemento sensor à rede de Bragg em uma fibra óptica, o qual é promissor principalmente por sua monitoração remota em um sistema de controle que faça as medições e calibração dos parâmetros físicos [10].

Para representar a varredura do sensor na superposição dos dois filtros fixos por métodos matemáticos, utilizou-se uma simulação numérica que foi caracterizada por sua facilidade de interpretação programável e desenvolvimento de protótipos com funções pré-definidas.

O desenvolvimento de um algoritmo de simulação numérica nos possibilita resolver qualquer problema, desde que um modelo matemático seja bem representativo. Se for possível expressar um problema em notação matemática fica fácil solucioná-lo por meio de cálculos computacionais eficientes e confiáveis.

#### **2.2.6.**

#### **Detalhamento de simulação para a técnica com dois filtros fixos**

A simulação desenvolvida fundamenta-se inicialmente em consolidar parâmetros importantes, tais como: a posição do pico espectral do comprimento de onda e a largura de banda a meia altura do sensor e dos dois filtros fixos. E em conjunto com a densidade de potência espectral total, que estabelecerão a faixa dinâmica de cada sensor e a incerteza na medida do sistema de leitura.

Uma forma matemática de se estimar o sinal lido pelo sistema de dois filtros fixos é trabalhar com hipóteses de aproximação, ou seja, os espectros do sensor e dos dois filtros podem ser modelados por curvas gaussianas centralizados pela largura de banda à meia altura (*FWHM – Full Width at Half Maximum*). Os quais são aproximados com seus respectivos ruídos ocasionados pelos fotodetectores associados à eletrônica. Cada resultado é comparado e validado com resultados experimentais [11].

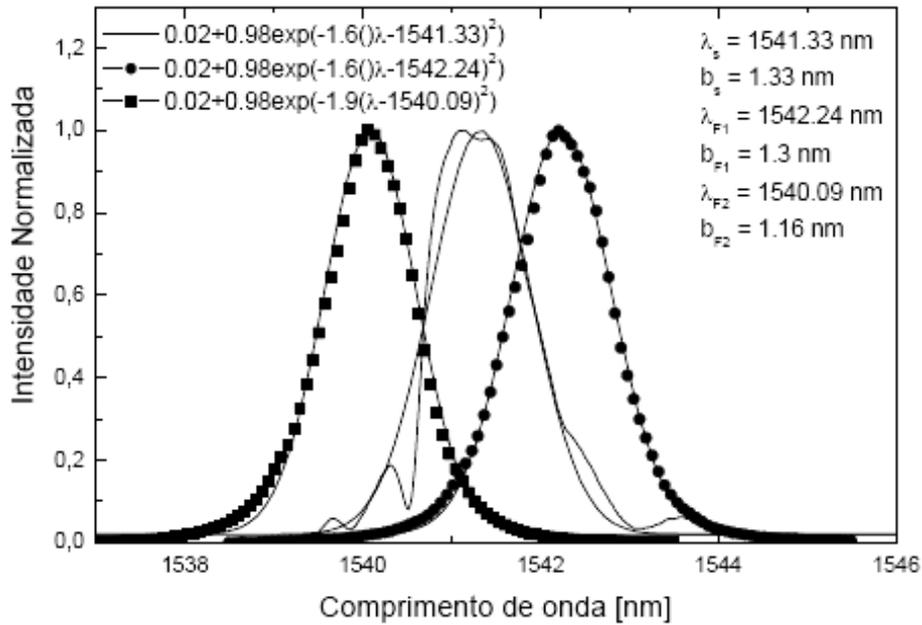


Figura 2.12 Espectro de transmissão dos dois filtros fixos e o sensor [11].

Na figura 2.12, os espectros dos filtros fixos e do sensor são ajustados por gaussianas considerando uma constante chamada ‘*offset*’ (ruído nos fotodetectores). A tensão lida no fotodetector associada à potência óptica pode ser considerada como a convolução entre o sensor e o filtro. Para compensar qualquer possível variação na potencia, foi considerada a razão entre as intensidades ópticas lidas nos fotodetectores 1 e 2, mencionada anteriormente na montagem do sistema óptico com dois filtros fixos da figura 2.9.

A eq. (2.12) justifica uma relação de calibração para o sistema óptico com dois filtros fixos:

$$f = \frac{I_1}{I_2} \quad (2.12)$$

Onde,  $f$ : Razão entre intensidades ópticas.

$I_1$ : Intensidade óptica no fotodetector 1.

$I_2$ : Intensidade óptica no fotodetector 2.

A curva de razão,  $f$ , entre as intensidades ópticas nos fotodetectores 1 e 2, mostrada na figura 2.13 calculada e medida como uma função da posição do pico do sensor pode ser obtida dos dados ilustrados na figura 2.12.

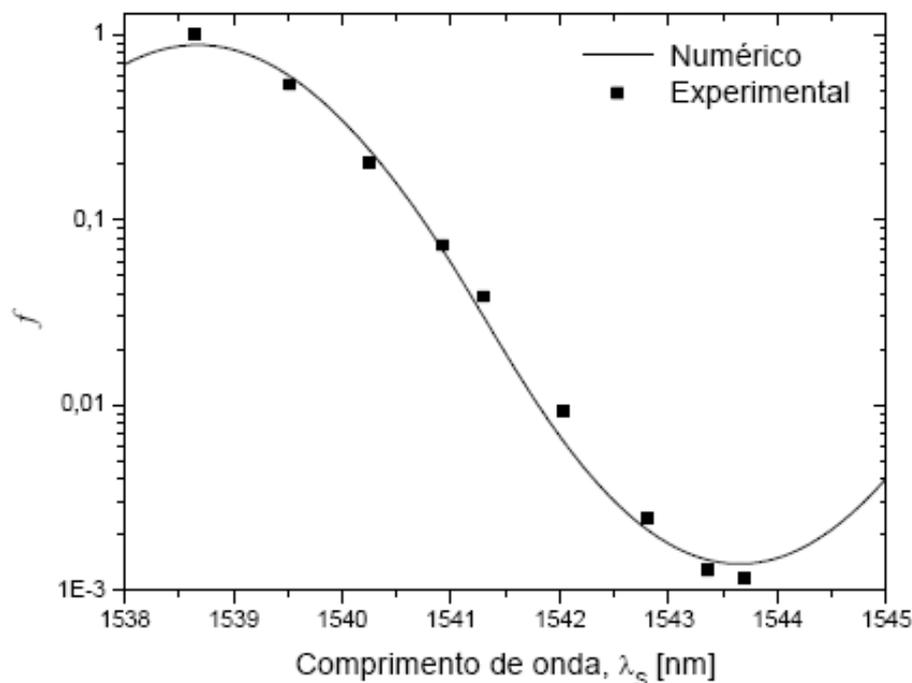


Figura 2.13 Resultado numérico e experimental para uma função  $f$  em relação à posição espectral do sensor.

Na figura 2.13 os resultados teóricos foram comparados com dados experimentais e apresentam certas divergências, mas de forma geral, pode-se concluir que a teoria é válida.

Uma vez a teoria validada e consolidada, as equações constitutivas que representam o comportamento do sensor quando é interrogado pelos dois filtros fixos pode-se continuar a análise de multiplexação de vários sensores com o fim de desenvolver a simulação dos modelos numéricos e, posteriormente, calibrar a técnica de demodulação com dois filtros fixos.

### 2.2.7.

#### **Análise da multiplexação dos sensores a rede de Bragg**

Uma das vantagens em usar sensores a redes de Bragg em fibras ópticas é a capacidade de multiplexação. Várias técnicas têm sido propostas com a finalidade de aumentar o número de sensores a serem interrogados [1]. Entre as técnicas, duas merecem destaque, uma é baseada na multiplexação no domínio do tempo

(*TDM – Time Domain Multiplexing*), enquanto a outra na multiplexação no domínio de comprimento de onda (*WDM – Wavelength Domain Multiplexing*) [12, 13]. Nos últimos anos alguns trabalhos foram desenvolvidos combinando as duas técnicas TDM/WDM, mostrando sua maior eficácia [14, 15].

Usando a técnica TDM/WDM é possível interrogar dezenas de sensores com o mesmo comprimento de onda. A limitação do número de sensores a serem interrogados está associada à intensidade de luz refletida pelas redes de Bragg e ao erro observado na medição do comprimento de onda devido à superposição espectral dos sensores.

Para obter esta informação basta incidir sobre a rede uma fonte de luz e observar a sua reflexão (ou transmissão). 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.

O princípio básico da multiplexação de sensores em uma única fibra óptica pode ser visto na figura 2.14, onde uma fonte de luz de banda larga  $F(\lambda)$  ilumina um conjunto de sensores, e suas reflexões são 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,  $\lambda_b$ , e com refletividade  $r_i$ . Eles são posicionados ao longo da fibra óptica com certa distância entre eles, equivalentes a um intervalo de tempo  $\tau_i$ . 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.

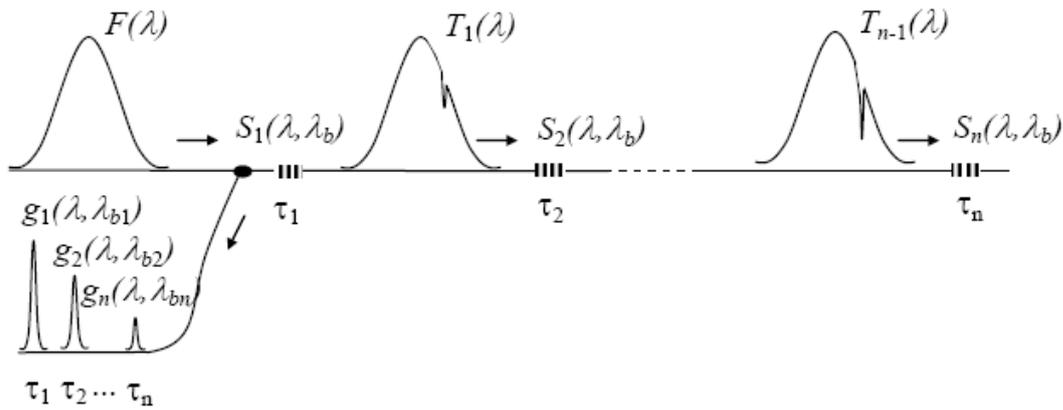


Figura 2.14 Multiplexação em uma única fibra óptica de sensores com espectros idênticos.

Matematicamente, o espectro refletido do primeiro sensor é dado simplesmente pela seguinte eq. (2.13):

$$g_1(\lambda, \lambda_{b1}) = r_1 S_1(\lambda, \lambda_b) F(\lambda) \quad (2.13)$$

Se for analisado o segundo sensor, considerando que o espectro da fonte de luz será deformado 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 pelas eq. (2.14) e (2.15).

$$g_2 = g_2^0 - r_1 S_1 g_2^0 = g_2^0 (1 - r_1 S_1) \quad (2.14)$$

$$g_2^0 = r_2 S_2 T_1 \quad (2.15)$$

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:

$$T_1 = F - g_1 = F - r_1 S_1 F = F(1 - r_1 S_1) \quad (2.16)$$

Substituindo (2.16) em (2.15), e conseqüentemente, (2.15) em (2.14), se obtém o espectro refletido do segundo sensor com a influência do primeiro,

$$g_2 = r_2 S_2 F(1 - r_1 S_1)^2 \quad (2.17)$$

No caso crítico, quando vários sensores se encontram na mesma posição espectral, dois efeitos devem ser analisados. O primeiro é o deslocamento da intensidade de luz incidente no sensor  $n$ . O segundo, e mais importante, gera-se a partir da convolução do espectro de luz incidente com o espectro do sensor  $n$ . É dizer quando o espectro da luz passa por uma grande quantidade de sensores, seu espectro é deformado devido à superposição dos  $(n-1)$  sensores lidos. Isto gera um efeito de desvio no comprimento de onda de Bragg do sensor  $n$ .

Mostra-se que para o caso em que o espectro da fonte passa 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.

Na figura 2.15, apresentam-se resultados de três comportamentos diferentes de deslocamento na intensidade transmitida da fonte de luz. Estes foram tomados da simulação matemática [11, 16] onde foram analisados os seguintes parâmetros:

- Espectro transmitido variando o número de sensores, mantendo a refletividade constante.
- Espectro transmitido variando a refletividade, mantendo o número de sensores iguais.
- Espectro transmitido variando aleatoriamente a refletividade e o comprimento de onda dos sensores.

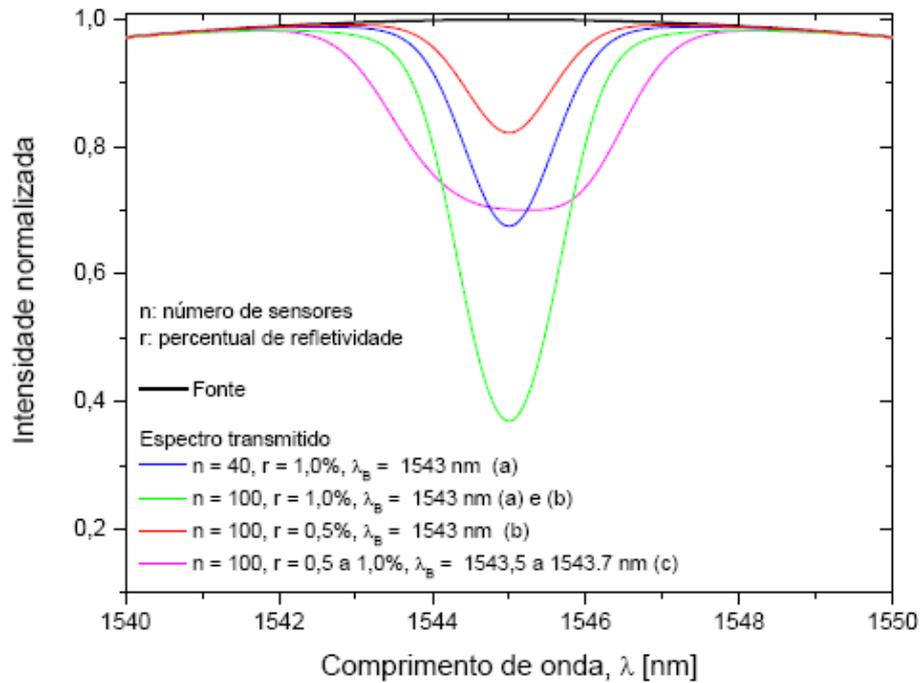


Figura 2.15 Deslocamento na intensidade transmitida da fonte de luz variando o número de sensores, o percentual de refletividade e a quantidade de sensores.

Na figura 2.15 pode-se concluir que o maior deslocamento de intensidade de luz ocorre quando se interroga uma grande quantidade de sensores, o que influencia uma deformação no espectro de comprimento de onda do sensor analisado.

Define-se o comprimento de onda de Bragg verdadeiro,  $\lambda_{BV}$ , 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 de Bragg indicado,  $\lambda_{BI}$ . Em consequência o desvio é definido pela eq. (2.18).

$$Desvio = \lambda_{BV} - \lambda_{BI} \quad (2.18)$$

Para análise do desvio se considera o espectro verdadeiro do sensor centrado em  $\lambda_{BV}$ , e o espectro indicado pelo sensor desviado centrado em  $\lambda_{BI}$ .