

2 Sensores a fibra óptica

Os sensores baseados em fibras ópticas, ou sensores a fibra óptica, aparecem hoje em dia em diferentes aplicações na engenharia, muito devido aos avanços científicos/tecnológicos obtidos na década de 1960, nas áreas de desenvolvimento de lasers e fabricação de fibras ópticas com altas taxas de transmissão (GRATTAN & SUN, 2000). Essa tecnologia, a qual foi desenvolvida para atender a necessidades no campo de telecomunicações, logo começou a ser empregada para o desenvolvimento de sensores. Alguns anos após o desenvolvimento de fibras ópticas (FO) de alto desempenho, Menadier et al realizaram a primeira investida para patentear um sistema que as utilizava como elemento sensor (MENADIER, 1967). No início da década de 1970, esses primeiros esforços no desenvolvimento de sensores a fibra ótica (SFO) incentivaram muitos grupos de pesquisadores a trabalhar para aperfeiçoar essa nova tecnologia, a qual atualmente apresenta muitas vantagens sobre os sensores eletromecânicos convencionais.

O seu emprego tem sido observado em muitas situações, por meio de diferentes técnicas e para os mais variados fins. Isso acontece, uma vez que são capazes de inferir valores sobre as mais variáveis propriedades físicas, tais como intensidade luminosa, deslocamento, temperatura, pressão, rotação, som, deformação, campo magnético, radiação, fluxo, análise química, vibração, entre outros (KROHN, 2000).

No decorrer deste capítulo 2, será descrito o comportamento das fibras ópticas e as suas aplicações para sensoriamento, assim como as principais características dos SFO, dando ênfase no sensor de rede de Bragg (FBG - *Fiber Bragg Gratings*).

2.1 Fundamentos

Um elemento sensor pode ser caracterizado como qualquer dispositivo que possui a capacidade de responder a estímulos físicos/químicos, de uma forma específica, indicando variações nas suas condições iniciais. Eles são importantes pois permitem

Sensores a fibra óptica

quantificar os fenômenos físicos de interesse, para geração de informações e conhecimento.

De uma forma geral, os sensores podem ser classificados, ou agrupados, de acordo com os seguintes critérios (GONÇALVES, 2010):

- Sinal que geram (analógicos, digitais)
- Tipo de valor que proporcionam (valor de medida ou de mudança de estado)
- Nível de integração (discretos, integrados ou inteligentes)
- Tipo de saída (saídas lineares ou não lineares)
- Modo de operação (por deflexão ou por comparação)
- Tipo de variável a medir, (temperatura, pressão, luminosidade, entre outros)
- Tipo de elemento transdutor (mecânicos, térmicos, magnéticos, elétricos, químicos, radioativos ou ópticos)

O tipo de sensor de interesse para esta tese são os sensores ópticos, mas especificamente os sensores a fibra óptica.

Quando se fala em SFO fica implícita a utilização de FOs como meio utilizado para inferir informações acerca do ambiente ao seu redor. Desta forma, é importante descrever brevemente as suas principais características.

Uma FO é um filamento de sílica ou de polímero, com formato cilíndrico, capaz de conduzir luz. Sua constituição interna é formada por duas camadas de índice de refração distintas (KROHN, 2000). A camada mais interna é chamada de núcleo e apresenta índice de refração ligeiramente superior ao índice de refração da camada que o envolve, denominada de casca (Figura 3).

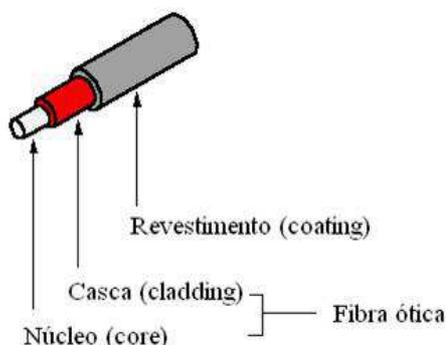


Figura 3 – Ilustração de uma fibra óptica.

Essa diferença nos índices de refração entre a casca e o núcleo pode se apresentar de três formas. Uma única variação abrupta da casca para o núcleo (Figura 4a), várias variações de forma abruptas/degrau (Figura 4b) ou gradual (Figura 4c). A primeira configuração representa as fibras monomodo, enquanto as demais representam fibras multimodo. Estas últimas configurações permitem uma maior banda de transmissão de informação, porem são mais suscetíveis a efeitos de dispersão óptica.

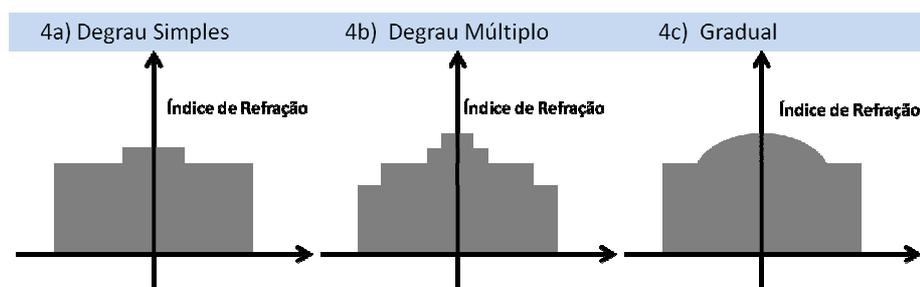


Figura 4 – Diferentes padrões de índices de refração em FO.

Com relação à transmissão da luz por uma FO, dois modelos teóricos são propostos na literatura. O modelo modal e o modelo de feixes.

No primeiro, a luz é descrita por ondas eletromagnéticas, e cada conjunto guiado pela fibra é denominada de modo. Dessa forma, as fibras monomodo permitem somente um modo de transmissão enquanto as multimodo permitem mais de um modo de transmissão. Para uma dada FO, existe um número finito de modos permitidos.

Já no modelo de feixes, a luz é encarada como constituída por raios luminosos e o seu comportamento é descrito pela óptica geométrica. Esse modelo fornece uma maneira clara de se entender a propagação da luz pela fibra, devido ao fenômeno de reflexão total, sendo o utilizado nesta tese.

O fenômeno de reflexão total da luz pode ser entendido como uma particularidade da refração luminosa. Este fenômeno físico ocorre quando luz passa de um meio homogêneo e isotrópico para outro, e ao fazer isso apresenta distorções na sua velocidade e direção de propagação. Matematicamente a refração é representada pela Lei de Snell, descrita como

$$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r'), \quad (2,1)$$

onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios 1 e 2 respectivamente, assim como i e r' são os ângulos de incidência e refração.

No caso de um feixe de luz experimentar uma redução de índice de refração à medida que passa de um meio ao outro, o ângulo de refração tende a aumentar. Esse aumento é tanto maior quanto maior for o ângulo de incidência. Essa situação pode evoluir até um limite no qual a luz refratada é desviada 90° com a vertical entre a superfície de separação entre os meios, como ilustrado na Figura 5.

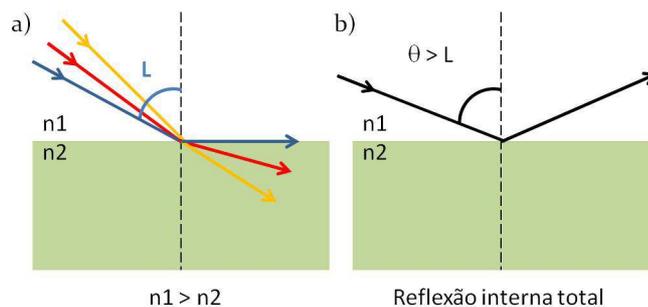


Figura 5 - Fenômeno da reflexão interna total da luz

Tal ângulo de incidência da luz é conhecido como ângulo limite (L), e pode ser determinado pela equação 2,2. Qualquer raio de luz que incida sobre a superfície de separação dos dois meios com ângulos superiores ao ângulo limite é totalmente refletido (figura 5b), o que possibilita que se guiem ondas de luz no interior de fibras ópticas.

$$\text{Sen}(L) = \frac{n_2}{n_1} \quad (2,2)$$

Dessa forma, por meio da reflexão total da luz, um raio que incide sobre uma FO com um ângulo θ_0 será refratado com um ângulo θ ao passar do ar para o núcleo, e em seguida guiado ao longo do núcleo da fibra, como mostrado na figura 6.

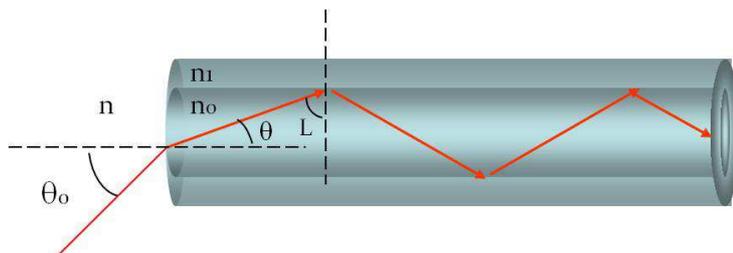


Figura 6 - Trajeto percorrido por um raio de luz em uma fibra óptica.

Algumas das propriedades de transmissão em fibras podem ser exploradas pelos sensores a fibra óptica. Dentre essas propriedades estão a dispersão e a atenuação óptica.

De uma forma geral, a atenuação é dada pela razão entre a intensidade luminosa incidente e transmitida. É uma relação logarítmica descrita normalmente em decibéis (dB) por unidade de comprimento.

Matematicamente a atenuação de luz (A) pode ser descrita por

$$A = -\frac{10\log(P/P_0)}{d}, \quad (2,3)$$

onde d é a distância percorrida pela luz (no caso, comprimento da fibra), P e P_0 são as potências luminosas inicial e final. O sinal negativo aparece devido a uma convenção.

A atenuação pode aparecer em função dos seguintes fenômenos:

- Absorção.
- espalhamento .
- perdas por curvatura.

Mesmo a fibra óptica sendo quase totalmente transparente, parte da luz que trafega por ela é absorvida. Essa é chamada de absorção intrínseca e está relacionada com os níveis de energia do material em escala atômica. Dessa forma, quando a luz se depara com um átomo que compõe a fibra óptica, o mesmo absorve o fóton de luz (dependendo da sua frequência, ou energia).

A presença de impurezas na fibra também pode aumentar a quantidade de luz absorvida, e nesse caso tem-se a absorção extrínseca. Entre as impurezas que podem contaminar as fibras estão alguns íons metálicos (cromo, ferro, etc.) e hidroxila $(OH)^{-1}$ (KROHN, 2000; OLIVEIRA, 2009). Essa característica permite o desenvolvimento de sensores à fibra óptica destinados a análises químicas.

Com relação ao espalhamento óptico, ele pode ser linear ou não linear, e ocorre devido à interação entre a propagação da luz e a fibra óptica. É constituído por diferentes componentes espectrais e seus padrões são classificados como Rayleigh, Raman e Brillouin

O espalhamento Rayleigh é o mais intenso e tem o mesmo comprimento de onda que o pulso de luz inicial. O espalhamento Raman tem sua origem devido à interação entre os fótons do pulso de luz e os átomos da fibra óptica. Tal interação provoca a produção de novos fótons com energia mais baixa (Anti-Stokes) ou mais alta que os originais (Stokes). Já no espalhamento Brillouin alguns fótons incidentes são aniquilados gerando fônons (*quanta* de vibração).

Os fenômenos de espalhamento são bastante utilizados em sensores de fibra óptica distribuídos e uma discussão a respeito dos princípios físicos acerca de diferentes técnicas utilizadas pode ser observado em Guemes (Guermes *et al*, 2010)

Já a atenuação causada por curvatura acontece quando dobras na fibra reduzem o ângulo com o qual a luz incide sobre as paredes do núcleo até o ponto de não ser maior que o ângulo limite, assim deixando de haver reflexão total e havendo refração para a casca, como mostrado na figura 7.

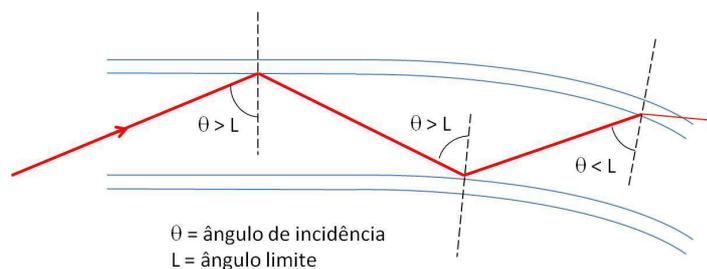


Figura 7- Atenuação óptica causada por curvatura na fibra.

Os fenômenos de dispersão provocam um alargamento temporal dos pulsos de luz, à medida que os mesmos propagam-se pela fibra óptica. Os tipos de dispersão mais importantes são: dispersão modal, dispersão de modo de polarização e dispersão cromática. A dispersão modal ocorre em função da diferença nos caminhos ópticos percorridos pelos diferentes modos.

Já a dispersão por modo de polarização se dá em função da diferença de velocidade de propagação da onda de luz nos seus eixos ortogonais. Essa diferença de velocidade ocorre pela quebra de simetria circular na fibra óptica.

Por último, a dispersão cromática ocorre em função da variação de velocidade de propagação de ondas de comprimento de onda diferentes.

2.2 Classificação dos Sensores a Fibra Óptica

Os sensores a fibra óptica apresentam algumas vantagens com relação aos sensores eletromecânicos convencionais.

As principais vantagens no seu uso estão relacionadas com a capacidade (podem transmitir informações com muito menos perdas que em relação aos cabos metálicos, e com bandas de transmissão muito maiores), peso (são muito mais finas e leves do que cabos convencionais, significando menos peso e espaço ocupado), segurança (são mais seguras quanto a invasões e podem conviver com ambientes potencialmente perigosos, como ambientes com materiais inflamáveis, sem que haja risco de ignição), imunidade eletromagnética e poder de distribuição (a fibra toda funciona como elemento sensor) e multiplexação (em uma mesma fibra podem ser colocados vários sensores em diferentes posições).

Como são diversos os tipos de sensores a fibra óptica, existem algumas formas de agrupá-los. A seguir são apresentadas algumas das classificações existentes, onde cada uma analisa determinada característica.

2.2.1 Local de Interrogação

Os sensores podem ser classificados quanto ao local onde a interrogação é realizada. Dessa forma existem duas classes: Sensores Extrínsecos e Sensores Intrínsecos.

- Extrínsecos

Os sensores desta classe não utilizam a FO como elemento sensor mas somente como transmissor, realizando o transporte do sinal óptico para o local de sensoriamento.

O processo de sensoriamento é realizado seguindo o esquema da figura 8. A luz é guiada pela fibra até chegar à região em que se deseja realizar o sensoriamento. Neste ponto a luz é desacoplada da fibra para o sensor e modulada. Em seguida a luz é novamente acoplada à fibra e guiada até onde será então processada.

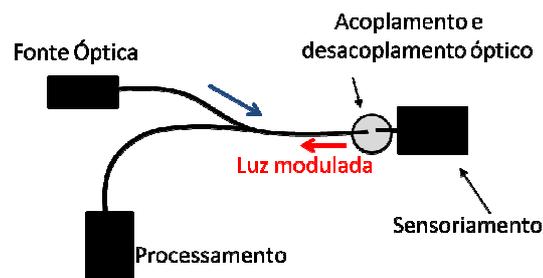


Figura 8- Esquema de sensoriamento de um sensor extrínseco.

Fica evidente que esse tipo de instrumentação é muito suscetível a perdas ópticas devido ao desacoplamento e em seguida acoplamento da luz (KERSEY,1996).

- Intrínsecos

Nesse caso, a fibra óptica funciona como elemento sensor, e não há a necessidade de interromper o feixe de luz. Dessa forma, as perdas ópticas devido às conexões entre fibra e sensor são eliminadas.

Uma vez que a FO é o próprio elemento sensor, este percebe o ambiente medido por meio de interações da luz com o mensurando, que podem se dar da forma de atraso óptico, perda óptica e propriedades espectrais (CULSHAW & KERSEY, 2008).

Exemplos dessa classe de sensores que utilizam a alteração da luz na FO para realizar o sensoriamento são os sensores baseados em microcurvatura e os sensores FBGs. A figura 9 representa o esquema de sensoriamento de um sensor intrínseco.

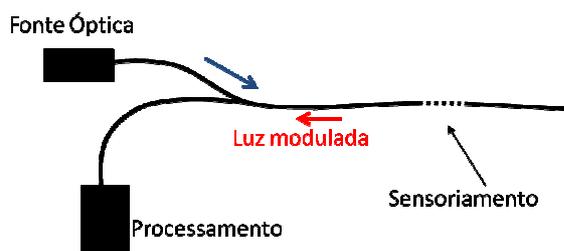


Figura 9- Esquema de sensoriamento de um sensor intrínseco.

2.2.2 Configuração de Sensoriamento

É comum a classificação dos SFO tendo por base a sua configuração de sensoriamento. Os sensores neste caso são agrupados em três categorias: Sensores pontuais, sensores multiponto e sensores distribuídos.

- Sensor Pontual

Um sensor pontual é, como o nome sugere, um sensor definido em um determinado ponto, ou localidade, da fibra óptica. Na figura 9, o sensor representado é um sensor do tipo pontual, pois somente na região marcada é que ocorre a interrogação do meio.

- Sensor Multiponto

Os sensores multiponto são muito semelhantes aos pontuais, com a diferença de que existem vários deles em uma mesma fibra (figura 10). De fato a maioria dos sensores pontuais podem funcionar como sensor multiponto em uma mesma fibra óptica. A interpretação do sinal obtido e a conseqüente relação com os sensores na fibra serão abordados mais adiante.

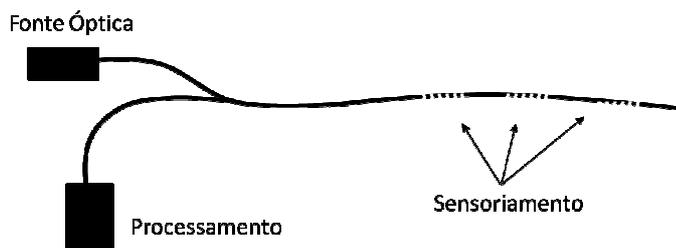


Figura 10- Representação de um sensor multiponto em uma mesma fibra óptica (multiplexação).

- Sensor Distribuído

Os sensores distribuídos são diferentes dos pontuais e multiponto. Para eles a fibra inteira funciona como um elemento sensor, ou seja, há infinitos elementos sensores posicionados sobre a FO. Esse tipo de sensoriamento contínuo mede parâmetros como dispersão e atenuação óptica em toda a extensão da fibra (KERSEY, 1996). Este tipo de sensor é também utilizado para detectar rupturas na FO.

2.2.3 Interrogação do Sinal

Os sensores à fibra óptica podem ser classificados (quanto à interrogação do sinal) em três categorias básicas: Sensores de modulação de intensidade, sensores de modulação de fase e sensores de modulação de frequência (UDD, 1991; KROHN, 2000; LÓPEZ-HIGUERRA, 2002).

- Sensores de Modulação de Intensidade.

Os sensores de modulação de intensidade luminosa constituíram a primeira geração de sensores a fibra óptica a serem implementados. São conceitualmente simples, seguros e fáceis de reproduzir. Geralmente estão associados com o deslocamento ou outra perturbação física na fibra óptica, que causa uma variação na intensidade luminosa transmitida. Dessa forma, esse tipo de sensor é capaz de detectar variações na quantidade de luz em função das variações no ambiente estudado, como ilustrado na figura 11.

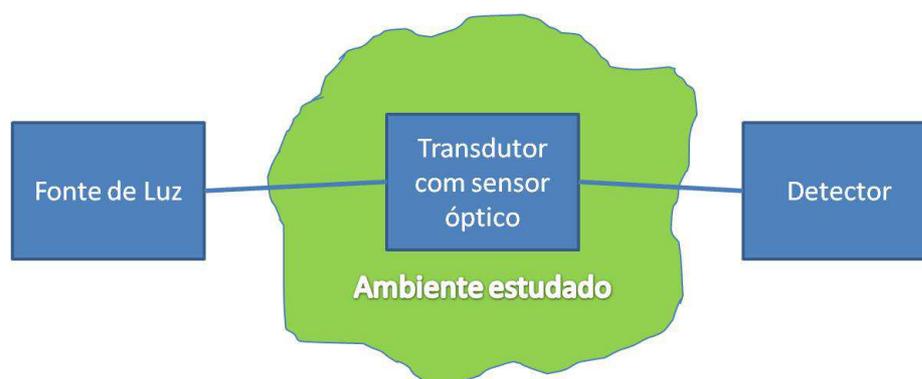


Figura 11 - Esquema de um circuito óptico de inferência com sensores de modulação de intensidade.

Tal alteração na intensidade luminosa experimentada tem origem em fenômenos diversos tais como espalhamento, absorção óptica e fluorescência.

Por estarem sujeitos a grandes perdas de intensidade luminosa, em geral esses sensores necessitam mais luz do que os sensores de modulação de fase. Dessa forma, as fibras ópticas empregadas nesse tipo de sensoriamento possuem grandes núcleos e são geralmente multimodo.

Sensores a fibra óptica

- Sensores de Modulação de Fase.

Esse tipo de sensor tem como princípio de funcionamento a comparação da fase da radiação luminosa transmitida por uma fibra óptica de referência com outra influenciada pelas grandezas que se deseja inferir, figura 12.

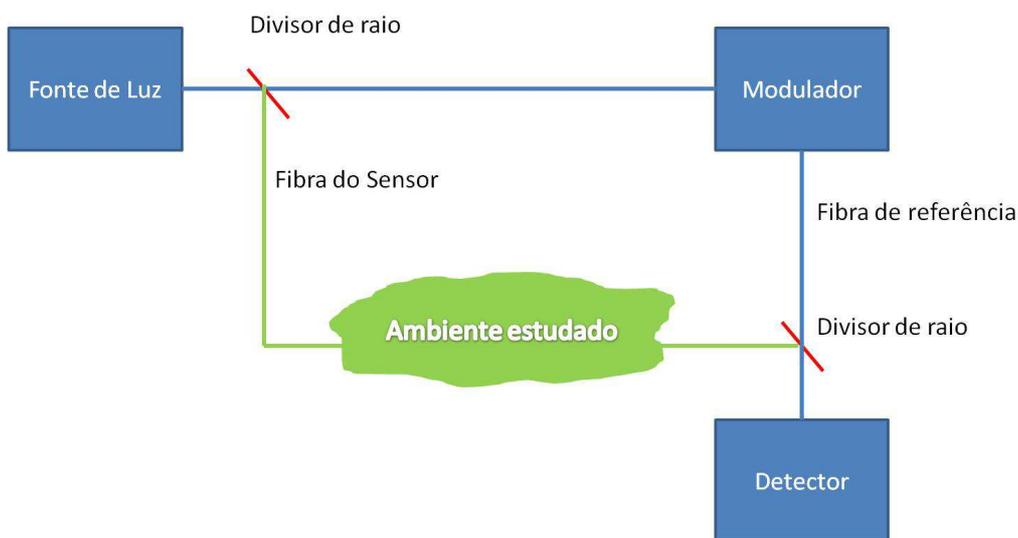


Figura 12 - Esquema de um circuito óptico de interferência com sensores de modulação de fase.

As fibras ópticas empregadas nesses sensores são geralmente monomodo. Por serem de alto custo e sensibilidade são muito empregadas pelas forças armadas.

- Sensores de Modulação de Frequência.

Os sensores classificados na categoria de modulação de frequência são sensíveis a mudanças de algumas grandezas físicas como temperatura e deslocamentos ou até mesmo à presença de elementos químicos junto às fibras ópticas. Alterações nessas grandezas físicas modificam a frequência da luz retro-espalhada, ou refletida (como no caso dos sensores de rede de Bragg). Essa variação pode então ser detectada e traduzida.

Na figura 13 pode-se observar um esquema experimental de uma medição com sensores de modulação em frequência.

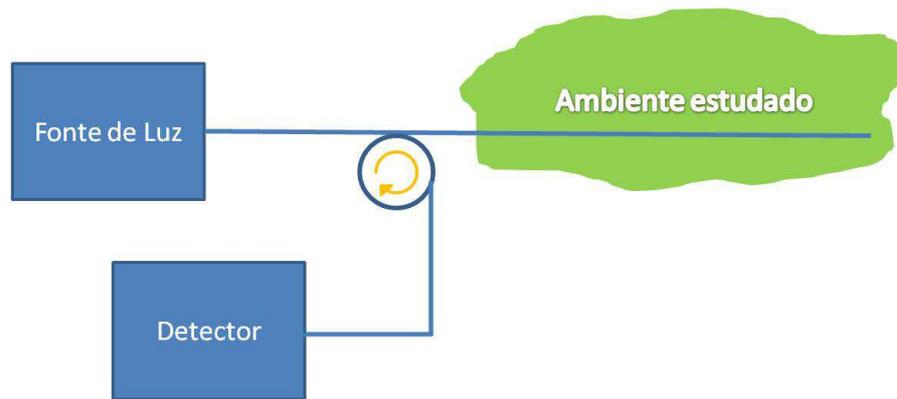


Figura 13 - Esquema de um circuito óptico de interferência com sensores de modulação de frequência.

2.2.4 Técnicas de endereçamento

A fim de se analisarem os dados obtidos através dos sensores à fibra óptica, algumas técnicas utilizadas em sistemas de comunicação óptica são comumente empregadas. Dentre as principais técnicas destacam-se:

- TDM (Time Division Multiplexing),
- FDM (Frequency Division Multiplexing),
- WDM (Wavelength Division Multiplexing),
- SDM (Spatial Division Multiplexing)

No endereçamento por tempo (TDM), ou endereçamento temporal, toda a informação relativa ao estado do sensor é associada ao tempo de transmissão do sensor ao detector. Cada sensor deve possuir uma janela de tempo de modo a não interferir nos dados de outros sensores. O sinal é codificado para cada sensor de forma que a alteração nesse código (geralmente uma sequência de pulsos) indique as alterações no ambiente estudado.

Apresenta a vantagem de necessitar uma eletrônica simples porém rápida, possibilita a multiplexação de um grande número de sensores em uma mesma fibra óptica e só exige um detector e uma fonte óptica. Entretanto, essa técnica exige longos cabos de fibra óptica.

O endereçamento por frequência ou FDM exige somente um detector e uma fonte óptica, assim como uma simples decodificação das informações quando o número de sensores não é muito elevado. A técnica aloca toda a informação relativa ao estado do sensor em uma janela no domínio de frequência.

No endereçamento por comprimento de onda (WDM) a informação referente ao estado do sensor é determinada por um comprimento de onda específico do espectro de radiação da fonte óptica. Apresenta como vantagens uma eletrônica de baixa velocidade (não exige processamento rápido) e baixas perdas ópticas. Entretanto exige múltiplas fontes e detectores ópticos.

No endereçamento espacial (SDM) toda a informação relativa ao sensor é conseguida por meio da utilização de uma fibra para cada sensor. Essa técnica é apresentada como de baixa tecnologia, mas apresenta a vantagem de ter um conceito simples, exigindo entretanto múltiplos detectores e cabos e conectores de alto custo. Não é uma técnica elegante, mas é simples e pode ser combinada com outras técnicas como TDM ou WDM.

2.3

Sensores de Redes de Bragg (FBG)

Sensores FBG são sensores a fibra óptica modulados por frequência (ou comprimento de onda). O parâmetro que ele sente (como exemplo temperatura ou deformação) é uma função direta de variações no sinal obtido, o qual está intimamente associado à condição de ressonância de Bragg. Possuem como característica responder de forma independente da intensidade de radiação utilizada na fonte óptica, só variando em função de perturbações no ambiente a ser interrogado (KROHN, 2000). Dessa forma, não existem influências nas flutuações decorrentes de perdas ópticas na fibra ou até mesmo decorrentes da fonte óptica utilizada (GRANTTAN & SUN, 2000).

São muito úteis no monitoramento de estruturas por apresentarem boa sensibilidade e permitirem a análise de situações em que se deseja inferir mais de um ponto no espaço, uma vez que podem ser usados de forma multiplexada (KERSEY, 1996 ; OTHONOS & KALLI, 1999).

A seguir são apresentados alguns dos principais trabalhos realizados no transcurso do desenvolvimento dessa tecnologia.

2.3.1 Caracterização Histórica

No ano de 1978, o trabalho desenvolvido por Hill e colaboradores no Centro de Pesquisa de Comunicação do Canadá (*Canadian Communication Research Center*) verificou que, quando uma fibra óptica, de núcleo dopado com Germânio, era irradiada com um laser de Argônio a 488nm, parte da luz guiada no interior da fibra sofria reflexão (HILL *et al*, 1978). Embora essa atenuação do sinal transmitido fosse inicialmente relacionada à reflexão de Fresnel em uma das extremidades da fibra, logo ficou entendido que se tratava, na realidade, de uma descontinuidade óptica, não linear, caracterizada por uma modulação no índice de refração no seu núcleo. Esse fenômeno ficou conhecido como fotossensibilidade óptica e, embora reconhecido como potencialmente importante para futuras aplicações, como no desenvolvimento de sensores, foi deixado de lado por quase uma década. Tal fato se deu pela fraca modulação do índice de refração conseguida e porque se acreditava que a fotossensibilidade era restrita àquela "fibra especial" utilizada no Centro de Pesquisa de Comunicação do Canadá (KASHYAP, 1999; OLIVEIRA, 2011).

Quase uma década após a publicação de Hill, Ulf Österberg & Walter Margulis demonstraram que uma fibra de sílica dopada com Germânio, quando exposta à radiação infravermelha, por longos períodos de tempo, também apresentava a formação de grades de reflexão (ÖSTERBERG & MARGULIS, 1986; FARRIER *et al*; STOLEN & TOM, 1987).

Outra contribuição importante foi dada em 1978 por Stones que concluiu que virtualmente qualquer FO com seu núcleo dopado com Germânio apresenta fotossensibilidade quando submetida à radiação de um laser de Argônio (STONES, 1987).

Entretanto foi o trabalho desenvolvido por Gerry Meltz e colaboradores (MELTZ *et al*, 1989) que abriu as portas para o desenvolvimento das Redes de Bragg como são conhecidas atualmente. Meltz demonstrou a possibilidade de formar grades de reflexão (RB - Redes de Bragg) por meio de técnicas holográficas. Seu trabalho possibilitou o desenvolvimento de RB para radiações na região do espectro visível, por meio da exposição de uma FO à radiação ultravioleta e uso de interferômetros. Tal descoberta

permitiu a inscrição de redes de Bragg para comprimentos de onda de maior utilidade em engenharia, como 1500 nm (KASHUAP *et al*, 1990).

Após o trabalho de Meltz, aperfeiçoamentos nas técnicas de fabricação das RB foram desenvolvidos. Lemaire e colaboradores mostraram que mesmo em uma FO padrão para telecomunicações podiam ser formadas RB (LEMAIRE *et al*, 1993).

Outros pesquisadores ao redor do mundo demonstraram diferentes formas de fabricação de RB por meio de técnicas interferométricas, máscaras de fase, laser de femtossegundo e fabricação ponto a ponto (VASIL'EV *et al*, 2005).

Atualmente o uso de RB em fibras ópticas para propósitos de sensoriamento (especialmente no que diz respeito ao monitoramento da integridade estrutural) está em evidência.

Sensores FBG possuem vastas áreas de aplicabilidade, podendo ser utilizados como sensores químicos, de pressão, vibração, acelerômetros, etc. e diversas pesquisas têm sido realizadas. Betz e colaboradores trabalharam com sensores FBGs (posicionados de forma a formarem uma roseta) embebidos em uma estrutura a ser monitorada. O método consistia na comparação da assinatura acústica da estrutura em estudo com outra de referência, procurando por reflexões das ondas Lamb em decorrência dos danos estruturais. A localização dos danos era realizada por meio da interpretação dos resultados por algoritmos genéticos (BETZ *et al*, 2007).

2.3.2

Princípios Básicos de Sensores FBGs

Os sensores FBG são formados por redes de Bragg (RB) inscritas no núcleo de fibras ópticas. Tais RB podem ser descritas por uma modulação no índice de refração no núcleo de uma FO, e apresentam período espacial dado por Λ .

O desenho da figura 14 exemplifica o formato de um sensor FBG.

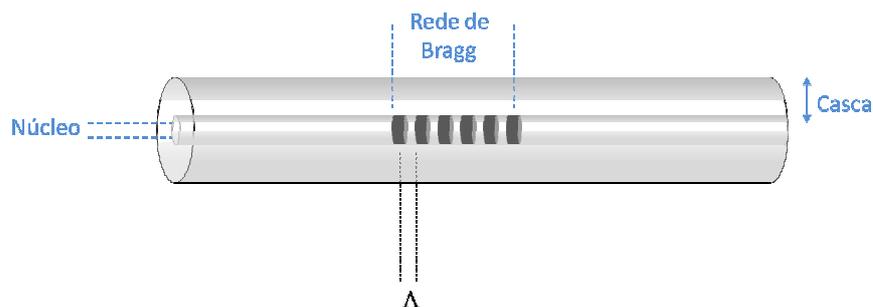


Figura 14 - Esquemático de uma rede de Bragg impressa em uma fibra.

O princípio de funcionamento dos sensores FBG se baseia no fenômeno da reflexão de Fresnel, o qual dita que um raio de luz sofre reflexão ao atravessar de um meio a outro com índice de refração diferente (HALLIDAY *et al*, 2004). Assim, a luz, ao atingir as variações de índice de refração no núcleo da fibra, sofre sucessivas reflexões. Todas as reflexões que não obedecem à condição de Bragg aparecem fora de fase e acabam por se cancelar. Entretanto, alguns comprimentos de onda (comprimento de onda de Bragg, λ_B), os quais satisfazem à condição de Bragg, sofrem interferência construtiva. Esta parcela da luz é então refletida e se desloca no sentido oposto ao inicial. Dessa forma, a rede de Bragg funciona como um filtro seletivo, que permite a passagem de radiação em todos os comprimentos de onda exceto o comprimento de onda de Bragg.

Na figura 15a, está ilustrado o espectro da luz fornecida por uma fonte óptica a uma FO com um sensor FBG. Pode-se ver que a luz é filtrada ao atingir a RG, deixando passar somente a parcela com comprimentos de onda que não satisfazem a condição de Bragg (figura 15b).

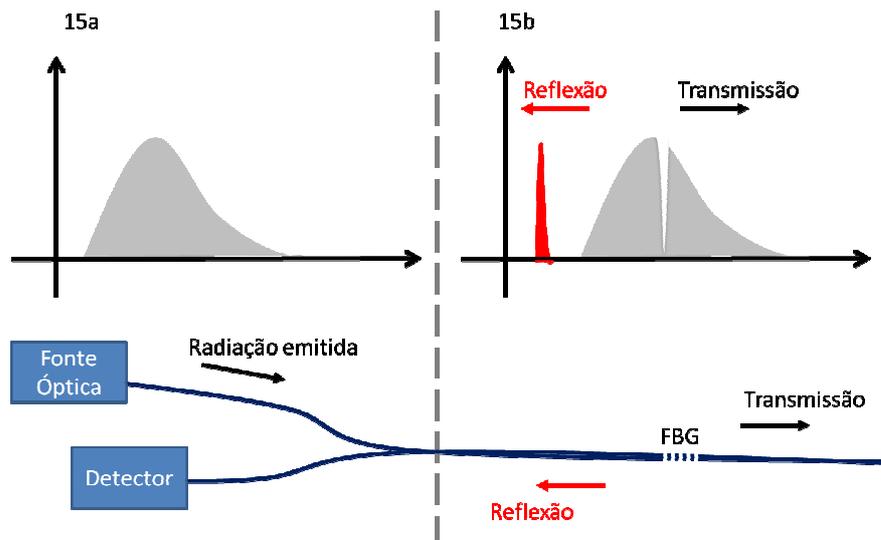


Figura 15 - Esquemático de uma rede de Bragg impressa em uma fibra.

Uma vez que o comprimento de onda de Bragg se relaciona com o índice de refração efetivo do núcleo da FO (n_{eff}) e com o período espacial da RB (Λ) por meio da equação 2,4 (WU *et al*, 2004; LEIDERMAN *et al*, 2010), a operação de um sensor FBG consiste em monitorar o desvio no comprimento de onda refletido pela rede de Bragg em função de variações de Λ .

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda \quad (2,4)$$

Em outras palavras, toda deformação longitudinal na FO, que provoque um aumento ou redução no período espacial da RB, provoca uma alteração no comprimento de onda que é refletido. É importante salientar que, além das deformações longitudinais, outros fenômenos (efeito fotoelástico devido a variações radiais na fibra e dependência do índice de refração com a temperatura) alteram o valor do índice de refração efetivo do núcleo da fibra. Estes, por sua vez, também alteram o comprimento de onda de Bragg.

2.3.3

Descrição Matemática $\Delta\lambda_B$ com a temperatura e tração.

Como já foi comentado anteriormente, variações tanto em temperatura quanto em tração sobre a FO provocam alterações no comprimento de onda que é refletido pela

Sensores a fibra óptica

FBG. Entretanto é necessário estabelecer matematicamente essa relação, a fim de se poder quantificar os resultados obtidos experimentalmente ; (KROHN, 2000; OLIVEIRA, 2011).

Dessa forma, a equação que descreve essa variação de λ_B é dada por

$$\Delta\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda \left\{ \left[\left(1 - \frac{n_{eff}^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \varepsilon \right] + \left[\alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \right] \Delta T \right\}, \quad (2,5)$$

onde:

P_{11} e P_{12} - Coeficientes ópticos de tensão

α - Coeficiente de Expansão Térmica

ε - Tensão aplicada

ΔT - Variação de Temperatura

ν - Coeficiente de Poisson

Entretanto, a equação 2,5 pode ser simplificada (DE LA CRUZ, 2007) considerando que:

$$\left(\frac{n_{eff}^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \approx 0,22 \quad (2,6)$$

Logo, substituindo a equação 2,6 na equação 2,5, tem-se:

$$\Delta\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda \left\{ [(1 - 0,22)\varepsilon] + \left[\alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \right] \Delta T \right\} \quad (2,7)$$

O primeiro termo da esquerda da equação 2,7 representa a influência da tração na FO sobre $\Delta\lambda_b$, e o segundo termo representa a influência da temperatura.

Analisando cada termo da equação 2,7 em separado chega-se a:

$$\Delta\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda [(1 - 0,22)\varepsilon] \quad (2,8)$$

$$\Delta\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda \left[\alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \right] \Delta T \quad (2,9)$$

Substituindo a equação 2,4 nas equações 2,8 e 2,9, rearrumando os termos e considerando que $\xi = \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT}$, chega-se a:

$$\Delta\lambda_b/\lambda_b = 0,78\varepsilon \quad (2.10)$$

$$\Delta\lambda_b/\lambda_b = [\alpha + \xi]\Delta T \quad (2.11)$$

As equações 2.10 e 2.11 representam as contribuições para a variação do comprimento de onda de Bragg devidos à tração e à temperatura respectivamente. Nos casos estudados a temperatura foi mantida constante, logo somente a contribuição devido à tração foi considerada.

2.3.4 Sensibilidade

Para uma melhor avaliação de que tipo de sensor utilizar em dada ensaio ou monitoramento estrutural, é necessário conhecer a sensibilidade dos mesmos. Dessa forma, é importante determinar a sensibilidade dos sensores FBG, os quais serão utilizados no decorrer desta tese.

Como foi demonstrado anteriormente, a grandeza que é observada no uso dos sensores FBG é o comprimento de onda de Bragg. Foi visto que λ_b varia em função tanto da temperatura quanto da tração. Como o interesse neste trabalho está relacionado com as deformações sentidas pelos sensores FBG, serão mostradas as sensibilidades para os dois casos separados.

- Sensibilidade com relação à temperatura.

Sendo o coeficiente termo-óptico da sílica dado por $\xi = \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT}$, e sabendo que $\xi \approx 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e que $\alpha = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (DE LA CRUZ, 2007, YIN et al, 2008), pode-se reescrever a equação 2.11 como:

$$\Delta\lambda_b/\Delta T = 9,1 \cdot 10^{-6} \lambda_b \quad (2.12)$$

Logo, para uma variação de temperatura igual a 1°C , a sensibilidade em torno da região espectral de 1550 nm é aproximadamente igual a 0,0141 nm, ou 14,1 pm, o que resulta em uma sensibilidade devido à temperatura fica estimada por 14,1 pm/ $^\circ\text{C}$.

- Sensibilidade com relação à Tração.

No caso da tração, a sensibilidade dos sensores FBG pode ser obtida com uma análise da equação 2.10

Dessa forma, para uma faixa espectral de 1550 nm e uma variação de deformação igual a $1 \mu\epsilon$ a sensibilidade de um sensor FBG é estimada por $\Delta\lambda_b/\epsilon = 1,550 \times 0,78 \approx 1,2 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

2.3.5

Gravação de Redes de Bragg em fibras ópticas

No início dessa discussão sobre sensores FBG, foi dito que os mesmos são formados por modulações no índice de refração do núcleo das FO. Neste item abordar-se-ão rapidamente algumas das técnicas utilizadas para a formação (ou crescimento) das redes de Bragg.

2.3.5.1

Modulações de índice de refração

Nem todos os sensores FBG são formados com modulações no índice de refração homogêneas. De fato, o padrão em que estas modulações são formadas determina a aplicação do sensor.

Existem 3 padrões em que as modulações são empregadas: homogênea, *Apodization* e *Chirp* (KROHN, 2000).

No padrão homogêneo, o espaçamento entre cada modulação, assim como as variações dos índices de refração são constantes, como representado pela figura 16a. Esse tipo de padrão é mais comumente utilizado e é o que foi utilizado nos ensaios experimentais desta para esta tese.

O padrão conhecido como *Apodization* apresenta uma variação na amplitude da variação do índice de refração. Este padrão pode ser observado na figura 16b.

Já o padrão denominado *Chirp* apresenta uma não uniformidade nos intervalos entre as variações dos índices de refração, entretanto as amplitudes são mantidas constantes. Este padrão é representado na figura 16c.

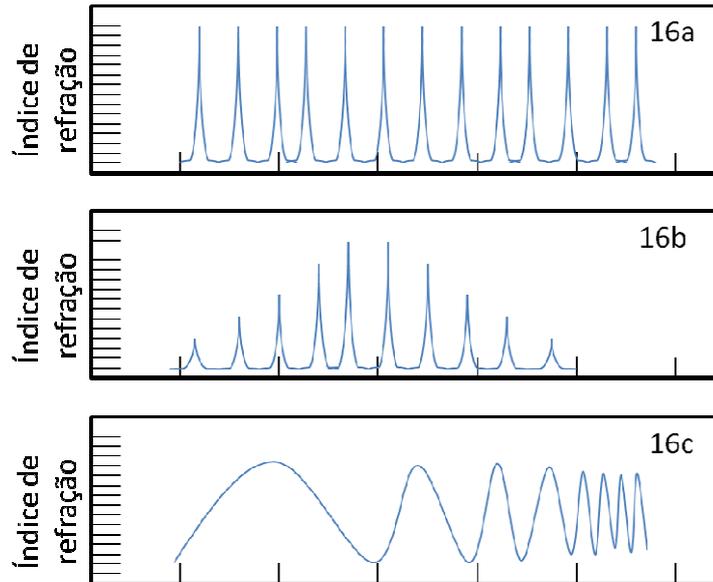


Figura 16 - Padrões de modulação existentes em sensores FGB. a) padrão homogêneo, b) *apodization* c) *Chirp*.

Outra conceito em que as redes de Bragg podem aparecer nos sensores FBG é o chamado Redes de período longo (RLP). Este conceito é semelhante ao homogêneo, com a diferença de que neste caso o espaçamento entre as variações de índice de refração são da ordem de 10 vezes superiores. O interessante deste conceito é que ele permite que a luz que viaja pelo núcleo da FO seja acoplada na sua casca por meio da condição descrita pela equação 2,13.

$$n_{\text{núcleo}} - n_{\text{casca}} = \lambda/\Lambda \quad (2,13)$$

Esse tipo de configuração é muito utilizado, quando se desejam analisar variáveis químicas.

Uma vez determinado o padrão de rede de Bragg que melhor se adapta ao problema proposto deve-se entender as diferentes formas de criá-los.

A gravação das redes de Bragg pode ser classificada de duas formas distintas: Gravação interna ou gravação externa. Devido ao fato da gravação das redes pelo método interno não ser muito utilizado, neste trabalho só serão abordados os métodos de gravação externa.

2.3.5.2

Crescimento de rede de Bragg por Interferometria

Esta técnica de crescimento (ou gravação) de rede de Bragg consiste em passar um feixe de luz UV por um divisor de feixes, separando-os igualmente. Em seguida estes feixes são combinados de forma a produzirem um padrão de interferência sobre a região da FO onde se deseja crescer a rede de Bragg. Nesse método o ângulo entre os dois feixes que se encontram para formar a interferência é que irá determinar o comprimento de onda de Bragg.

Esta técnica, também conhecida como técnica de crescimento de rede holográfica, é vantajosa pois permite o crescimento de uma rede de Bragg em praticamente qualquer comprimento de onda visível e não exige potências tão altas quanto as necessárias para o crescimento de redes pelo método interno.

A desvantagem desta técnica é que ela é muito sensível a perturbações e externas como vibrações ou correntes de ar, que podem prejudicar a periodicidade da rede (OTHONOS, 1999).

2.3.5.3

Crescimento de rede de Bragg por Máscara de Fase

Está técnica é uma das mais eficientes para o crescimento de redes de Bragg. Ela utiliza um elemento de difração óptica (denominado máscara de fase) que atua modulando espacialmente o feixe de luz UV.

A máscara é formada por um obstáculo com fendas espaçadas por uma distância constante definida por Λ_m . A superposição entre as ondas difratadas de ordem $m = 0$ e $m = \pm 1$, formam um padrão de interferência no núcleo da FO, com uma modulação no índice de refração de período constante e definido pela equação 2,14.

$$\Lambda = \frac{\Lambda_m}{2} \quad (2,14)$$

A desvantagem desta técnica é que o comprimento de onda de Bragg fica definido pela máscara usada. Para se alterar esse comprimento, deve-se usar uma máscara com espaçamento diferente entre as fendas.

Existem outras técnicas para o crescimento de redes de Bragg descritas na literatura, mas como o assunto não é o foco desta tese os mesmos não serão abordados.

2.3.6 Técnicas de Leitura dos sensores FBG

Sendo os sensores FBG modulados por comprimento de onda, os deslocamentos espectrais registrados são a variável utilizada para se mensurar determinada grandeza de interesse (ALLIL *et al*, 2007). Assim, para demodular as respostas obtidas pelas FBGs, diferentes técnicas foram sugeridas. Cada técnica apresenta vantagens e desvantagens no que se refere à capacidade de multiplexação, estabilidade, acurácia, custo e tempo de resposta, sendo necessário avaliar as necessidades existentes em cada problema.

Dentre as principais técnicas de demodulação existentes, se destacam atualmente as técnicas de demodulação por comprimento de onda e a técnica de demodulação por filtros fixos.

- Demodulação por comprimento de onda

Esta técnica é considerada de simples implementação e é bastante utilizada. Nela, é medido o deslocamento do comprimento de onda da FBG (que está relacionado com a grandeza que está sendo observada). Dessa forma, as variações do comprimento de onda de Bragg dão toda a informação do mensurando.

Usualmente, esta técnica tem a sua configuração descrita por uma fonte óptica, que fornece luz para a FO. Parte desta luz sofre reflexão (no comprimento de onda de Bragg) ao passar pela FBG, que volta pela fibra até atingir um acoplador óptico que desvia este sinal para um Analisador de Espectro Óptico (OSA). A figura 17 mostra um desenho da configuração descrita.

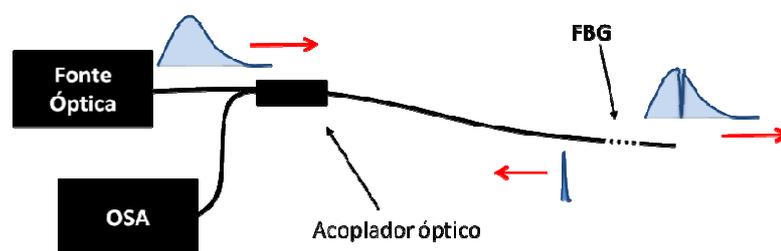


Figura 17 - Configuração típica de um sistema de leitura por demodulação por comprimento de onda.

Apesar desse sistema apresentar vantagens de simplicidade na sua montagem (XIAO *et al*, 2008), algumas desvantagens, tais como alto custo do equipamento de

medição e elevado tempo de aquisição, prejudicam o seu uso para sistemas de monitoramento (KATO, 2004).

- Demodulação por filtros fixos

A técnica de demodulação por filtros fixos utiliza a convolução entre a resposta espectral obtida pelo sensor FBG (exposto ao ambiente/estrutura de medição) e o sinal espectral obtido por 1 ou 2 filtros fixos, os quais podem ser interferômetros ou mesmo redes de Bragg (NUNES *et al*, 2004).

Esta técnica, além de apresentar menores custos com relação ao equipamento necessário, possui maior velocidade de aquisição e processamento, permitindo dessa forma ser usado em aplicações dinâmicas.

A configuração (figura 18) típica dessa técnica envolve uma fonte óptica de banda larga, um fotodetector para cada filtro (no caso de haver 2 filtros) e o sensor FBG.

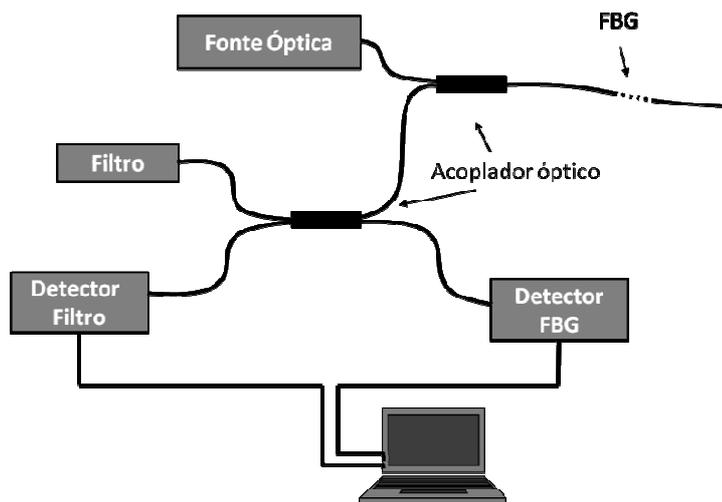


Figura 18 - Configuração típica de um sistema de leitura por demodulação por filtro fixo.

A principal diferença entre o sistema de demodulação com 1 filtro fixo e o sistema com 2 filtros fixos é que, ao se inserir um segundo filtro, aumenta-se bastante a faixa de leitura do sensor (NUNES *et al*, 2004).