

# Capítulo 2 – Fibras Ópticas

## 2.1 Introdução

Nos dias de hoje, as fibras ópticas são largamente utilizadas em diversos setores com um número grande de aplicações em sistemas de telecomunicação. Outras aplicações que também podemos citar são sistemas de TV de alta resolução e de controle, sensoriamento de várias grandezas físicas e químicas, como por exemplo, temperatura, pressão e concentrações químicas. Além disso, possuem aplicações em medicina e na indústria de automóvel.

Quando as fibras ópticas são usadas como guias de onda na transmissão de sinais ópticos, a propagação da luz é possível devido ao fenômeno de reflexão total da luz, conhecido desde de 1854. No entanto, fibras ópticas com revestimento só foram idealizadas a partir de 1950 por Brian O'Brien [1], porém estas fibras possuíam alta perdas e por isso suas aplicações eram limitadas a pequenas distâncias.

O desenvolvimento de técnicas de medição óptica a partir dos anos 70 e de fibras ópticas com baixas perdas e alta qualidade para uso em telecomunicação permitiu o avanço significativo das técnicas de sensoriamento pois viabilizaram a monitorização de grandezas a longas distâncias.

Neste capítulo descreveremos a forma de fabricação e geometria de uma fibra óptica, os modos de propagação ao longo de uma fibra óptica e suas vantagens. Além disso, serão mencionados algumas fibras consideradas especiais e os tipos de sensores à fibra que podem ser encontrados. Será também apresentada uma breve descrição da fabricação de redes de Bragg e sua aplicação como sensores.

## 2.2 Fabricação e Geometria de Fibras Ópticas

Uma fibra óptica de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) consiste de um núcleo central cilíndrico envolvido por uma camada denominada de casca (*cladding*). Fibras de vidro são bastante resistentes desde que sua superfície não seja arranhada, desta forma, um outro revestimento plástico externo é encontrado na configuração destas fibras para uma maior proteção.

O processo de fabricação das fibras mais usado é a deposição química por fase vapor modificada (MCVD) [2]. Primeiramente, se fabrica uma preforma de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) com um diâmetro entre 3 e 10cm. A seção transversal da preforma apresenta uma forma circular, onde a região central é da ordem de alguns milímetros e possui um índice de refração ligeiramente maior que a periferia. Fibras de telecomunicação são feitas de sílica pura ( $\text{SiO}_2$ ) sendo o núcleo dopado com  $\text{GeO}_2$ . Alguns outros dopantes também são muito usados, como por exemplo, pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), alumínio e fluorenos. Esses elementos alteram algumas propriedades dos vidros, como a viscosidade e o ponto de fusão, alterando consequentemente o índice de refração do núcleo.

A preforma é aquecida em um forno a uma temperatura de aproximadamente  $2000^\circ\text{C}$  e puxada pela extremidade inferior a uma velocidade constante para que o diâmetro final seja constante ao longo da fibra. Durante o processo de puxamento é depositado um revestimento plástico de proteção, sendo a fibra óptica coletada em bobinas.

Bobinas de fibras com quilômetros de comprimento podem ser fabricadas com este processo. As fibras ópticas podem ser produzidas em diversos diâmetros, entretanto, as fibras padrões para telecomunicação possuem o diâmetro do núcleo e da casca tipicamente da ordem de  $8\mu\text{m}$  e  $125\mu\text{m}$ , respectivamente. Algumas fibras consideradas especiais serão descritas na seção 2.4.

Com este processo de fabricação, o índice de refração do núcleo ( $n_1$ ) é ligeiramente maior que o índice de refração da casca ( $n_2$ ) devido a presença de germânio no núcleo. Existem dois tipos de perfis de índices de refração para as fibras ópticas mais comumente encontradas, conhecidos como índice degrau e índice

gradual. Nas fibras com índice degrau, o índice de refração entre o núcleo e a casca varia abruptamente, enquanto que nas fibras com índice gradual o índice de refração decresce gradualmente do centro à interface núcleo-casca. A seção transversal e o perfil do índice de refração de uma fibra de índice degrau e gradual são mostrados na Fig. 2.1. Nesta figura, os raios do núcleo e da casca são definidos por  $a$  e  $b$ , respectivamente, enquanto que  $n_0$  é o índice de refração do ar [3].

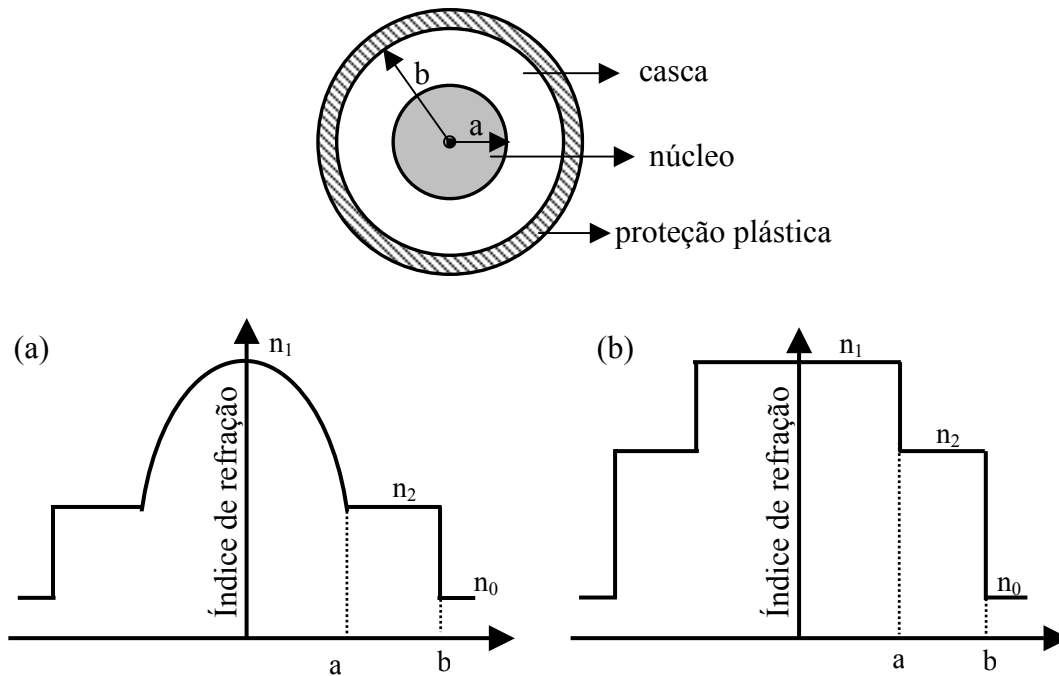


Fig. 2.1. Seção transversal de uma fibra óptica e perfil do índice de refração de uma fibra de (a) índice gradual e (b) índice degrau [3].

Existem diferentes tipos de fibras ópticas que, por sua vez, possuem diferentes características construtivas, sendo otimizadas para determinadas aplicações. As fibras ópticas são classificadas como multimodo ou monomodo. As dimensões do revestimento e da casca são aproximadamente iguais para as fibras ópticas monomodo e multimodo. Entretanto, o diâmetro do núcleo da fibra óptica monomodo da ordem de  $8 \mu\text{m}$  é muito menor do que as multimodos ( $>50 \mu\text{m}$ ).

As fibras multimodo são utilizadas na maioria das aplicações em redes locais (LAN) [1]. Em função do diâmetro maior do seu núcleo é possível a utilização de

transmissores relativamente baratos, como os diodos, e conectores de baixo custo. As fibras monomodo são adequadas para aplicações que envolvam grandes distâncias devido as baixas perdas, embora requeiram conectores de maior precisão possuindo um alto custo.

### 2.2.1 Fibras de índice degrau

Numa fibra de índice de refração gradual os raios incidentes na interface ar-fibra se afastam da normal devido à refração causada pela diferença dos índices de refração [4] como mostrado na Fig.2.2. O ângulo de refração  $\theta_r$  é obtido a partir da seguinte relação (Lei de Snell):

$$n_o \text{ sen } \theta_i = n_1 \text{ sen } \theta_r \quad (2.1)$$

onde  $n_o$  e  $n_1$  são os índices de refração do ar e do núcleo da fibra, respectivamente, e  $\theta_i$  é o ângulo de incidência do feixe. Uma nova refração será sofrida pelo feixe quando este incidir na interface entre o núcleo e a casca. No entanto, esta refração somente será possível quando  $\text{sen } \phi < n_2/n_1$ , onde  $n_2$  é o índice de refração da casca.

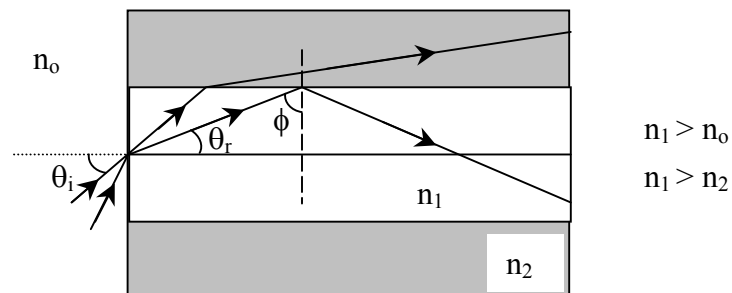


Fig. 2.2. Raios luminosos em uma fibra de índice degrau.

Para ângulos maiores que o ângulo crítico  $\phi_c$ , definido através da equação:

$$\text{sen } \phi_c = n_2 / n_1 \quad (2.2)$$

o feixe sofrerá reflexão total na interface núcleo-casca. Como os feixes sofrem diversas reflexões ao longo do comprimento da fibra, apenas raios com  $\phi > \phi_c$  permanecerão confinados no núcleo da fibra.

O ângulo máximo que o feixe incidente pode ter para permanecer confinado no núcleo é determinado pelas equações 2.1 e 2.2 e notando que  $\theta_r = \pi/2 - \phi_c$ , desta forma obtém-se que:

$$n_o \text{ sen } \theta_i = n_1 \text{ cos } \phi_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.3)$$

A quantidade  $n_o \text{ sen } \theta_i$  é definida como abertura numérica (AN) de uma fibra que representa a capacidade da fibra de captar luz. Se  $n_1 \approx n_2$ , a abertura numérica será aproximadamente:

$$AN = n_1 (2\Delta)^{1/2}, \quad \Delta = (n_1 - n_2) / n_1 \quad (2.4)$$

onde  $\Delta$  é a variação relativa do índice de refração na interface núcleo-casca. O valor de  $\Delta$  dever ser o maior possível para que se possa acoplar uma maior quantidade de luz na fibra. Entretanto, tais fibras não são úteis para sistemas de telecomunicação pois apresentam um fenômeno conhecido como dispersão modal [3].

A dispersão modal pode ser explicada através da existência de diferentes percursos ópticos no núcleo em função do ângulo de incidência na fibra. Os feixes que incidem com ângulos superiores aos demais deslocam-se através de percursos mais longos e demoram mais tempo para atingir a extremidade oposta da fibra que os feixes que se deslocam ao longo do eixo. Os diferentes tempos de propagação fazem com que a forma dos impulsos (pulsos curtos) que representam o sinal se alterem. O efeito de dispersão modal é reduzido se fibras de índice gradual são utilizadas.

### 2.2.2 Fibras de índice gradual

Nestas fibras [1], o índice de refração varia gradualmente a partir de um valor máximo  $n_1$  diminuindo radialmente na direção da casca até um valor mínimo  $n_2$ . O índice de refração na maioria das fibras gradual varia na forma quadrática decrescente.

O caminho percorrido por feixes com maior ângulo de incidência será maior, entretanto a velocidade dos feixes varia ao longo do percurso devido a variação do índice de refração. Isto é, feixes propagando ao longo do eixo da fibra percorrem um caminho menor, porém, com velocidade menor, conseqüentemente feixes que percorrem maior caminho terão velocidades maiores, desta forma, a dispersão modal é menor em fibras ópticas gradual.

## 2.3 Propagação de Onda em Fibras

Quando a luz se propaga na fibra, esta viaja como em um guia de onda de simetria cilíndrica. Como todo fenômeno eletromagnético, campos ópticos de propagação em fibras são governados pelas equações de Maxwell [5]. Desta forma, o campo óptico guiado em uma fibra é descrito pela solução da equação de onda.

Nesta seção as equações de Maxwell serão apresentadas para o caso de uma fibra óptica com perfil de índice degrau, como também, serão descritos os modos que podem ser guiados neste tipo de fibra.

### 2.3.1 Equações de Maxwell

Em um meio não condutor sem cargas livres com densidade de corrente nula [3], as equações de Maxwell podem ser escritas da seguinte forma:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.8)$$

onde  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{H}$  são os campos elétricos e magnéticos, respectivamente, enquanto,  $\mathbf{D}$  e  $\mathbf{B}$  são os campos de deslocamento elétrico e magnético, respectivamente [6]. A resposta do meio aos campos elétrico e magnético do sinal óptico é expressa por:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (2.10)$$

onde  $\varepsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo e  $\mathbf{P}$  e  $\mathbf{M}$  são as polarizações elétrica e magnética, respectivamente e que dependem do material. As fibras ópticas são compostas basicamente por sílica que possui uma natureza não magnética, ou seja,  $\mathbf{M}$  é igual a zero ( $\mathbf{M} = 0$ ). Utilizando as equações 2.5 - 2.10, obtém-se:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz sendo definida por  $c = (\mu_0 \varepsilon_0)^{-1/2}$ .

A polarização  $\mathbf{P}$  expressa a forma como a fibra responde a presença de um campo óptico. Para baixas intensidades de luz, os elétrons oscilam harmonicamente, e efeitos não lineares são desprezados. A polarização elétrica é então expressa como:

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} \quad (2.12)$$

onde  $\chi^{(1)}$  é a susceptibilidade linear. No entanto, se a intensidade da luz for alta, a relação entre  $\mathbf{P}$  e  $\mathbf{E}$  pode ser não-linear.

Com a equação 2.12 é possível escrever a equação 2.11 da seguinte forma:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.13)$$

sendo  $n$  o índice de refração definido como  $n^2 = 1 + \chi^{(1)}$ , na ausência de absorção. Neste caso, alterações no campo óptico ao longo da fibra são causadas por dispersão devido a dependência do índice de refração com o comprimento de onda.

O campo elétrico pode ser escrito em termos da transformada de Fourier, dado por:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega \quad (2.14)$$

desta maneira, podemos escrever a equação 2.13 da seguinte forma:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) + n^2 k^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = 0 \quad (2.15)$$

onde o número de onda é definido como  $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ , e  $\lambda$  é o comprimento de onda do campo óptico oscilando na frequência  $\omega$ .

### 2.3.2 Modos ópticos das fibras

A solução da equação 2.15 fornece os modos ópticos de fibras ópticas com perfil degrau [3]. O conceito de modos é um conceito geral na Óptica ocorrendo também na teoria de lasers. Utilizando coordenadas cilíndricas [7] devido a simetria das fibras ópticas pode-se determinar a solução da equação de onda, entretanto, é



necessário tomar duas das seis componentes de  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{H}$  como independentes. As demais componentes serão escritas em função das componentes independentes. Aplicando separação de variáveis nas equações é possível obter todas as soluções para a equação de onda. As soluções das duas componentes independentes são encontradas em termos de quatro constantes que podem ser determinadas pelas condições de contorno.

Os modos das fibras são modos híbridos e denotados por  $HE_{mn}$  ou  $EH_{nm}$ , onde  $m$  e  $n$  são autovalores da equação de onda. No caso em que  $m = 0$ , a seguinte notação é usada:  $TE_{0n}$  e  $TM_{0n}$ , pois estes correspondem aos modos elétrico-transverso e magnético-transverso, respectivamente. A notação usada para denotar o modo de propagação fundamental na fibra é  $TM_{01}$ . Este modo somente é encontrado em fibras monomodo. Fibras que suportam outros modos propagantes são as fibras multimodo. A notação  $LP_{mn}$  é usada para modos propagantes linearmente polarizados.

## 2.4 Atenuação e Dispersão em Fibras Ópticas

Um parâmetro relevante na fibra é a medida da perda de potência do sinal óptico durante a propagação na fibra. Se  $P_0$  é a potência na entrada de uma fibra óptica, a potência transmitida  $P_T$  é dada por:

$$P_T = P_0 e^{-\alpha L} \quad (2.16)$$

onde  $\alpha$  é a constante de atenuação sendo referida como perda da fibra óptica e  $L$  é o comprimento da fibra óptica. A perda da fibra é expressa em unidade de dB/km pelo uso da relação:

$$\alpha_{dB} = -\frac{10}{L} \log\left(\frac{P_T}{P_0}\right) \quad (2.17)$$

onde a Eq.2.16 foi utilizada para relacionar  $\alpha_{dB}$  e  $\alpha$ .

A dispersão está relacionada à dependência do índice de refração com a frequência. Quando uma onda eletromagnética interage com os elétrons de um dielétrico, a resposta do meio depende da frequência óptica  $\omega$ . Isto faz com que as diferentes componentes espectrais contidas no pulso se propaguem com diferentes velocidades  $c/n(\omega)$ . Isto produz um alargamento temporal do pulso que se muito grande, pode produzir a chamada interferência entre pulsos adjacentes.

Ao propagar dois pulsos com diferentes comprimentos de onda, um vai se atrasar em relação ao outro devido a dispersão. Este atraso ( $\Delta T$ ) é proporcional ao comprimento da fibra  $L$  e diferença dos comprimentos de onda ( $\Delta\lambda$ ) e a constante de proporcionalidade define o parâmetro de dispersão ( $D$ ):

$$D = \frac{\Delta T}{L\Delta\lambda} \quad (2.18)$$

No caso de  $D(\lambda) > 0$ , falamos de propagação na região de dispersão anômala da fibra onde as frequências menores (frequências ‘vermelhas’) viajam mais devagar que as maiores (frequências ‘azuis’). No caso  $D(\lambda) < 0$  temos propagação na região normal e o oposto ocorre. No caso de  $D = 0$  dizemos que temos propagação no zero de dispersão da fibra.

## 2.5 Fibras Especiais

Fibras ópticas podem apresentar diferentes estruturas do núcleo e da casca, além disso, podem ser dopadas com diversos tipos de material dependendo de sua aplicação. Elas também podem apresentar diversos tipos de perfis do índice de refração. Nesta seção, descrevemos alguns tipos de fibras especiais e suas possíveis aplicações, tais como, amplificadores e lasers a fibra.

Fibras multimodo podem ser feitas inteiramente de plástico [1]. Muitas destas fibras possuem o núcleo de um tipo de polimetil (PMMA) enquanto que a casca é dopada com um material de menor índice de refração como polímeros contendo

fluorenos. As fibras de plástico apresentam como desvantagens, alta atenuação e baixa resistência a altas temperaturas. Pelo fato de ter um custo baixo e uma grande flexibilidade, essas fibras têm sido usadas há muitos anos na indústria automotiva, onde as distâncias de transmissão são pequenas e a largura de banda requerida é modesta.

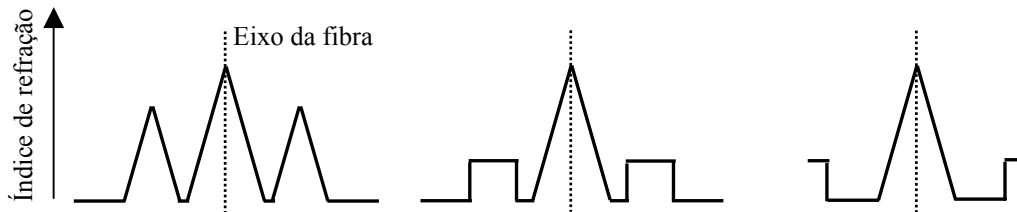


Fig. 2.3. Perfis do índice de refração encontrados para fibras de dispersão deslocada.

Outro tipo de fibra muito utilizada nos sistemas de telecomunicação é a fibra de dispersão deslocada (*dispersion-shifted fibers*) [3]. A dispersão do guia de onda depende do diâmetro do núcleo e da variação dos índices de refração  $\Delta$ , sendo assim, fibras de dispersão deslocada são desenhadas para operar no mínimo de dispersão da fibra óptica (1.3 $\mu\text{m}$  e 1.55 $\mu\text{m}$ ). A geometria dessas fibras consiste de múltiplas camadas de casca e o perfil do índice de refração diferenciado das outras fibras como mostrado na Fig. 2.3. Diversos outros perfis para esse tipo de fibra podem ser encontrados na literatura [3, 8].

As fibras na realidade podem exibir uma considerável variação na forma do núcleo ao longo de seu comprimento, e isto pode levar a uma quebra de sua simetria cilíndrica [3]. Essa quebra na simetria pode causar a remoção da degenerescência entre os modos ortogonais da fibra, provocando birrefringência, isto significa que duas polarizações viajando na fibra óptica terão velocidades diferentes. O grau de birrefringência é definido por:

$$B = |n_l - n_r| \quad (2.19)$$

onde  $n_l$  e  $n_r$  são os índices de refração do modo lento e do modo rápido, respectivamente. Birrefringência leva a uma variação periódica da potência entre as componentes da polarização com um comprimento dado por:

$$L_B = \lambda / B \quad (2.20)$$

onde  $L_B$  é denominado o comprimento de batimento. Ao longo das fibras convencionais,  $B$  não é constante devido as flutuações na forma e a não uniformidade de força que podem atuar no núcleo. Como resultado, luz linearmente polarizada que viaja numa fibra perderá rapidamente sua polarização. Este efeito pode não ser importante para sistemas de comunicação óptica, uma vez que os receptores detectam a intensidade total da luz e não a sua polarização, entretanto, este não é o caso de sistemas de comunicação coerente. Fibras em que flutuações na forma e no tamanho não são fatores importantes para a manutenção da polarização são comercialmente encontradas. Essas fibras são conhecidas como fibras que preservam a polarização [3] ou fibras de alta birrefringência (*hi-bi*).

Fibras ópticas podem possuir diversos tipos de dopantes e co-dopantes. Fibras com alta concentração de germânio e co-dopadas com boro são muito utilizadas na fabricação de redes de Bragg em que se requer fotossensibilidade das fibras à radiação ultravioleta (UV). A fibra fotossensível foi observada pela primeira vez em uma fibra de sílica dopada com germânio em 1978 [9] durante um experimento para estudar efeitos não lineares em uma fibra óptica especialmente fabricada. Rede de Bragg gravada em uma fibra pode ser utilizada como um refletor, filtro e componente de dispersão, apresentando uma alta eficiência e com a vantagem de ser inserida na própria fibra. Redes de Bragg são largamente utilizadas em telecomunicação. O princípio de funcionamento desse dispositivo é bem simples e sua forma mais básica consiste de uma modulação periódica do índice de refração ao longo do núcleo da fibra. Essa modulação faz com que a luz com um comprimento de onda específico seja refletido, permitindo a passagem de luz com outros comprimentos de onda. O processo de fabricação de uma rede de Bragg será descrito na seção 2.7.1.

Outro tipo de fibras especiais são as dopadas com íons de terras raras. As fibras de sílica têm mostrado ser um excelente hospedeiro quando íons de diferentes espécies de terras raras são incorporados [10]. Por exemplo, quando íons de érbio ( $\text{Er}^{3+}$ ) são introduzidos na fibra de sílica e submetidos a uma excitação laser de um comprimento de onda adequado, estes geram luz em torno de  $1.5\mu\text{m}$  [11] com uma largura de banda de até 44nm. Desta forma, estas fibras são de especial interesse no campo de telecomunicações ópticas para a construção de lasers a fibra, cw e lasers pulsados com durações de picosegundos [12] e femtossegundos [13], além de serem utilizadas com amplificadores ópticos [14, 15].

Existem muitos tipos de fibras com geometrias diferentes como as fibras com núcleo elíptico, as fibras D, com dois núcleos (*twin core fiber*) e as fibras com buracos [16, 17]. Fibras com buracos podem ser utilizadas, por exemplo, na geração de não-linearidade diretamente na fibra [18, 19]. Fibras com buracos e núcleo elíptico são comparadas às fibras que preservam a polarização, entretanto, é possível encontrar essas fibras com núcleo circular.

## 2.6 Vantagens das Fibras Ópticas

Em sistemas de telecomunicações, as fibras ópticas, devido as suas características, apresentam algumas vantagens em relação aos guias de transmissão convencionais, tais como, o par trançado e o cabo coaxial.

As fibras ópticas são constituídas de vidro ou plástico, material abundante e que é um isolador elétrico, não havendo necessidade de se preocupar com aterramento, problemas de interface de equipamento e interferência eletromagnética.

Com os sistemas de cabos de fibra óptica uma maior quantidade de dados pode ser transmitida a distâncias maiores em relação ao sistema de cabos coaxial, desse modo se reduz o número de guias de transmissão e o número de repetidores necessários no percurso entre o transmissor até o receptor. Esta redução nos equipamentos e componentes reduz o custo do sistema de transmissão e a sua complexidade.

A enorme redução do tamanho dos cabos, promovida pelas fibras ópticas, permitiu reduzir o problema de espaço e de congestionamento de dutos nos subsolos das grandes cidades e em grandes edifícios comerciais. O efeito combinado do tamanho e peso reduzido fez das fibras ópticas o meio de transmissão ideal em aviões, navios, satélites, entre outros. Além disso, os cabos ópticos oferecem vantagens quanto ao armazenamento, transporte, manuseio e instalação em relação aos cabos metálicos de resistência e durabilidade equivalentes.

As fibras ópticas não irradiam significativamente a luz propagada, implicando em um alto grau de segurança para a informação transportada. Isso torna a fibra importante em aplicações bancárias, redes de computadores e sistemas militares.

As aplicações das fibras ópticas são as mais diversas, como por exemplo, em telecomunicações e em medicina, na indústria automotiva e militar. Aqui temos especial interesse em sua aplicação no sensoriamento de grandezas físicas e químicas, como por exemplo, temperatura, pressão e concentrações químicas. A seguir serão apresentadas algumas aplicações de sensores a fibra.

## **2.7 Sensores a Fibra Óptica**

Sensores a fibra óptica têm certas vantagens em relação aos sistemas convencionais pois incluem a imunidade a interferência eletromagnética, tamanho reduzido, alta sensibilidade entre outros [20]. Pesquisas iniciais estavam direcionadas para o uso de sensores ópticos para monitorar parâmetros físicos como força, temperatura e pressão, mas em 1980, os pesquisadores perceberam que esses sensores também poderiam ser aplicados em grandezas químicas e na medicina [21].

Para algumas aplicações, os sensores a fibra são as melhores opções devido às vantagens que as fibras ópticas oferecem, como por exemplo, o fato de serem de material dielétrico que permite seu uso em áreas onde existe risco de explosão se dispositivos elétricos forem usados, e a capacidade de serem realizadas medidas a longas distâncias.

Alguns tipos de sensores a fibra têm sido comercializados com sucesso, podemos citar por exemplo os giroscópios e os sensores de corrente [1], entretanto,

esses sensores ainda apresentam um alto custo. Em alguns sistemas de sensores, o sensor a base de fibra é apenas um subsistema.

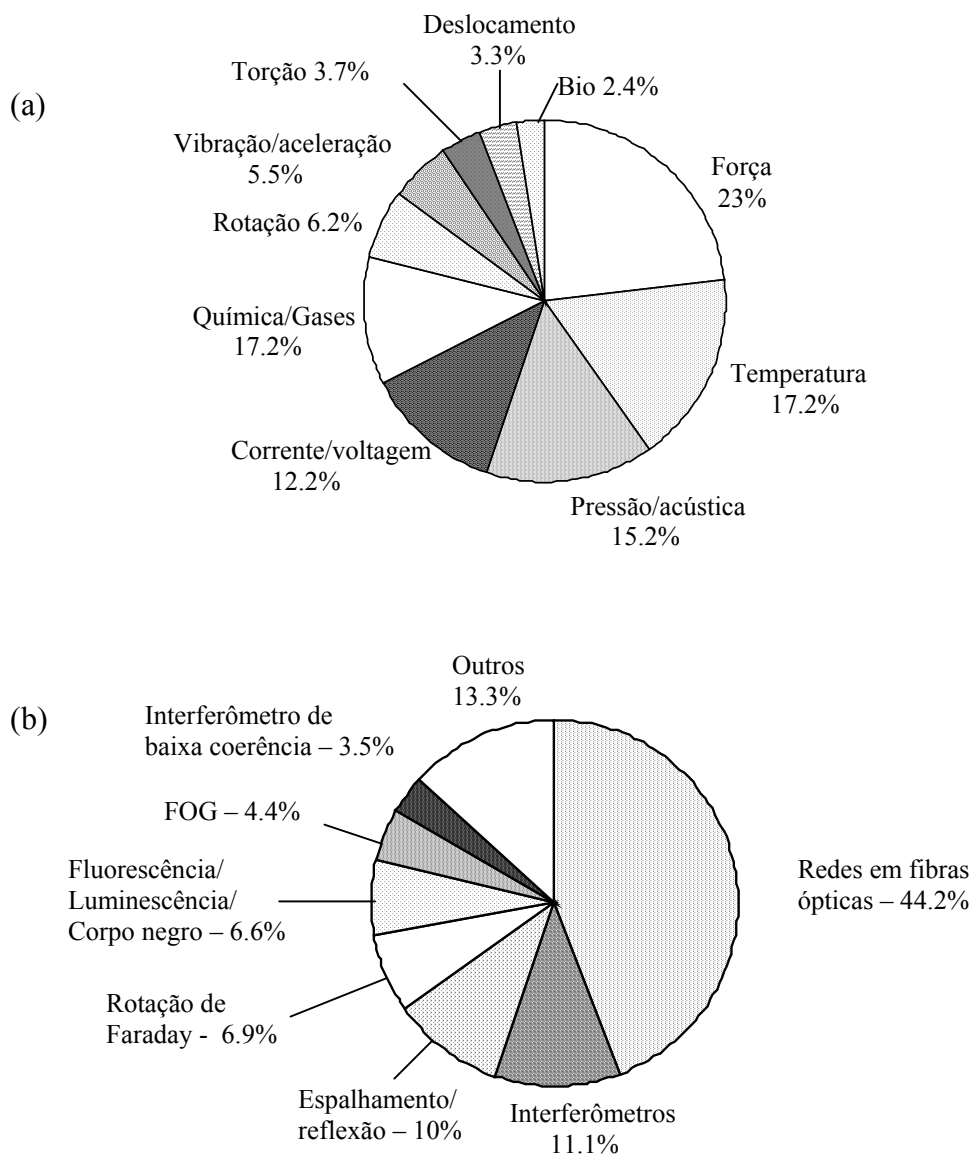


Fig. 2.4. Distribuição dos trabalhos apresentados OFS-15 de acordo com (a) grandeza medida e (b) com a tecnologia aplicada.

A Fig. 2.4 mostra a distribuição de trabalhos apresentados na 15ª Conferência de Sensores baseados em Fibras Ópticas (OFS) realizado em Oregon em Maio de 2002 de acordo com (a) a grandeza medida e (b) com a tecnologia aplicada para a medição [22]. Dentre as diversas configurações de sensores baseados em fibras

ópticas, aquelas que utilizam redes de Bragg gravadas em fibras possuem uma grande importância conforme mostra a Fig. 2.4.

A gravação de redes em fibras foi reportada em 1978 [9], e intensos estudos iniciaram depois que o método de fabricação de redes de Bragg tornou-se confiável [23]. A aplicação de redes de Bragg na área de sensoriamento tem sido amplamente estudada sendo este método aplicado para monitorar diversas grandezas, como temperatura e força [23, 24].

Na área biomédica [25], existem três tipos de sensores a fibra que são utilizados: os não-invasivos que ficam apenas em contato com a pele; os minimamente invasivos, que são inseridos dentro de cavidades do corpo; e os invasivos, que são inseridos em órgãos ou em vasos sanguíneos. Eles são utilizados nas mais diversas áreas da medicina, como, na Oncologia para diagnose de tumores, na Oftalmologia na análise de catarata e muitas outras.

### 2.7.1 Redes de Bragg em Fibras

Desde que a primeira rede de Bragg foi escrita pelo método externo interferométrico em 1989, diversas variações do método foram propostas buscando o controle das características das redes, podendo-se fabricar uma ampla gama de estruturas de grande aplicação prática [23]. A pesquisa progrediu neste campo e grande controle sobre a gravação de redes foi alcançado existindo hoje empresas especializadas na sua fabricação visando aplicações específicas.

No método interferométrico com máscara de fase, a fonte de radiação ultravioleta (UV) é o quarto harmônico ( $\lambda=266$  nm) de um laser de Nd:YAG Q-switched e mode-locked, gerado através de um cristal que dobra a frequência do segundo harmônico do laser [23]. O feixe de luz UV incide em uma máscara de fase sendo difratado em várias ordens das quais a +1 e a -1 se recombina na lateral da fibra através de dois espelhos. O feixe de ordem zero da máscara é bloqueado por um anteparo opaco. Os espelhos utilizados na montagem são móveis, possibilitando o ajuste dos feixes de modo que estes se superponham espacialmente na fibra e possam



irradiá-la com um padrão de interferência. O diâmetro do feixe UV define o comprimento da rede a ser escrita. Para analisar a refletividade da rede, a luz de um LED centrado em 1550nm é acoplada na fibra hidrogenada através de um acoplador. O sinal refletido é detectado através de um analisador de espectro óptico (OSA), como mostra a Fig. 2.5. Fibras com alta concentração de germânio e co-dopadas com boro e hidrogenadas são normalmente utilizadas na fabricação de redes.

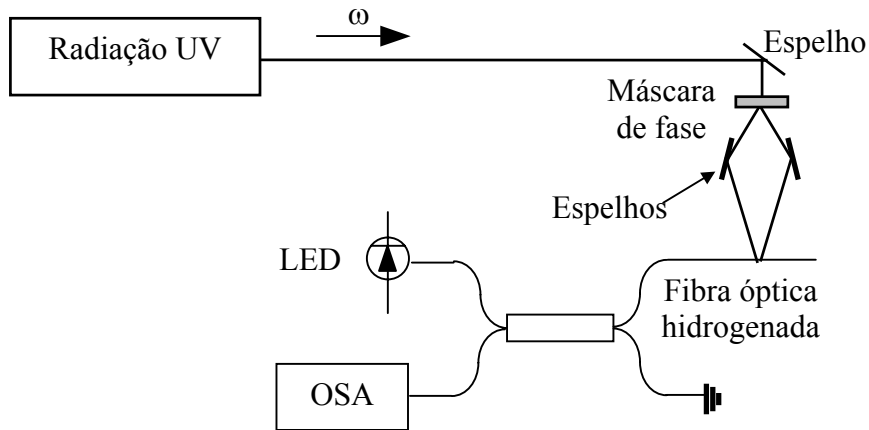


Fig. 2.5. Esquema da montagem utilizada em fabricação de redes pelo método interferométrico com máscara de fase.

O comprimento de onda da luz que é refletido pela rede de Bragg  $\lambda_B$  [26] é dado por:

$$\lambda_B = 2 n_{ef} \Lambda \quad (2.21)$$

onde  $n_{ef}$  é o índice de refração efetivo, e  $\Lambda$  é a periodicidade da rede. Campos externos, como temperatura e pressão [27], causam uma dilatação na fibra que consequentemente, faz variar a periodicidade da rede de Bragg gravada [28]. Com isso, o comprimento de onda do sinal transmitido ou refletido através da fibra será alterado, desta forma, pode-se utilizar esta variação para se determinar a grandeza a ser medida, como por exemplo, temperatura. A Fig. 2.6 mostra o princípio de um sensor baseado em rede de Bragg. Um acoplador é utilizado para acoplar luz de uma

fonte à fibra onde está gravada a rede de Bragg e para coletar o sinal refletido que será medido no sistema de detecção. O sinal de entrada é representado por  $I_{in}$  sendo refletido pela rede apenas o comprimento de Bragg ( $\lambda_B$ ). O espectro refletido é dado por  $I_r$  e o sinal transmitido é dado  $I_t$ . Quando um campo externo atua na rede,  $\lambda_B$  irá variar e a variação no comprimento de onda da luz refletida pela rede de Bragg será dado por  $\Delta\lambda_B$ .

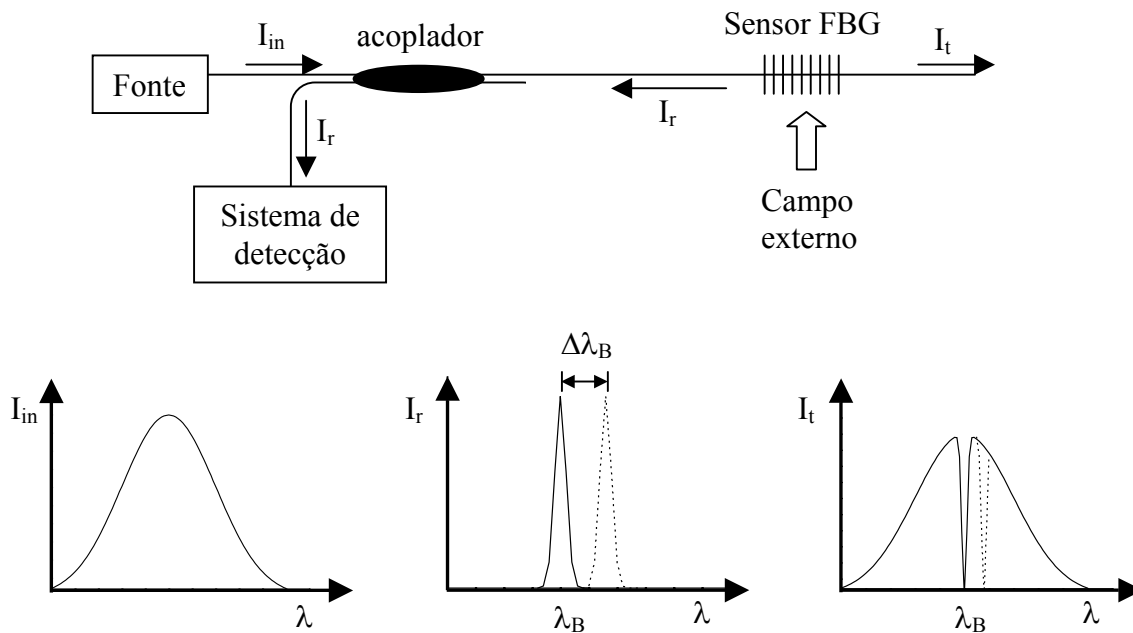


Fig. 2.6. Princípio de operação de um sensor baseado em rede de Bragg.

A resposta típica da variação no comprimento de onda de Bragg para temperatura é de aproximadamente 6.8 pm/°C para  $\lambda_B$  de 830 nm, 10 pm/°C para 1300 nm, e 13 pm/°C para 1550 nm [22]. Entretanto, todos esses valores dependem do tipo de rede fabricada na fibra.

Neste capítulo foi realizada uma revisão sobre a fabricação e geometria de fibras ópticas, suas vantagens e aplicação na área de sensoriamento. Além disso, foram comentados os modos de propagação em fibras ópticas com índice degrau. Também foram apresentadas as aplicações e os tipos de fibras ópticas

comercialmente encontradas, assim como, uma breve descrição da fabricação de redes de Bragg em fibras ópticas.