

SENSORES INTERFEROMÉTRICOS EM FIBRA ÓPTICA

A. B. LOBO RIBEIRO

Centro de Optoelectrónica, INESC-Porto, R. Campo Alegre 687, 4150 PORTO.
Tel.: (02) 6082 601, Fax: (02) 6082 799, email: alr@goe.fc.up.pt

Neste artigo pretende-se dar uma visão, global e necessariamente sumária, da tecnologia de sensores de fibra óptica, em especial do tipo interferométrico. São descritas diversas configurações de sensores interferométricos e respectivas funções de transferência, e apontadas as sensibilidades típicas conseguidas na monitorização de parâmetros físicos.

1. Introdução

A área da instrumentação e medida, nomeadamente no que diz respeito aos elementos sensores, tem registado uma rápida expansão nos últimos anos. Em paralelo com o desenvolvimento acelerado de sensores baseados em tecnologia microelectrónica, os sensores com suporte em técnicas ópticas têm-se também afirmado significativamente, em particular desde o aparecimento das fibras ópticas.

Numa descrição razoavelmente geral destes sistemas, as fibras ópticas são utilizadas simultaneamente como sensores (para medição de variadas grandezas físicas: pressão, velocidade de rotação, deslocamento mecânico, temperatura, intensidade de corrente eléctrica, deformação mecânica, campo magnético e eléctrico, etc.) e como meio de transmissão do sinal detectado até ao bloco de aquisição e processamento.

Uma grandeza física como, por exemplo, a temperatura, actua sobre a radiação que se propaga numa fibra óptica através da modificação das características de propagação da fibra; uma leitura adequada dessas alterações na radiação propagada possibilita, em princípio, a determinação das variações dessa grandeza física. A versatilidade da fibra óptica é assinalável, dado que a radiação guiada é caracterizada por um conjunto

de parâmetros, como sejam a intensidade, o comprimento de onda, a frequência, a fase e a polarização, todos potencialmente moduláveis pelas mais variadas grandezas físicas. A estrutura básica de uma fibra óptica é a de um cilindro de sílica (diâmetro típico 125 μm), cuja região axial (núcleo, com diâmetro típico de 4 a 8 μm) é dopada de modo a aumentar o seu índice de refração e, assim, guiar a radiação. Alguns dos atributos dos sensores de fibra óptica que os tornam uma alternativa técnica atraente, relativamente aos sensores electrónicos convencionais, são: a sua imunidade a interferências electromagnéticas; o facto de serem totalmente passivos electricamente, o que os torna intrinsecamente seguros; o baixo consumo de potência eléctrica; a sua resistência a altas temperaturas; as dimensões e peso reduzidos; a grande largura de banda e a possibilidade de multiplexagem óptica e eléctrica para implementação de redes de sensores [1,2,3].

Os referidos sensores podem ser classificados de acordo com o seu modo de funcionamento; assim, a maioria dos sensores de fibra óptica é classificável segundo o tipo de modulação do sinal óptico (intensidade, fase; em certos casos, polarização, comprimento de onda e frequência) [1,2]. Os sensores de modulação de intensidade (*Sensores de Intensidade*) constituíram a primeira gera-

- Interferómetros
- Fibras ópticas
- Sensores interferométricos
- Sensores de fibra óptica

ção de sensores de fibra óptica. Neste tipo de sensores, a intensidade luminosa transmitida pela fibra óptica é variada por um mecanismo apropriado; por exemplo: modulação por reflexão num espelho móvel, onde a variação da posição do espelho provoca variação da potência luminosa captada pela fibra receptora; modulação por microcurvatura na fibra óptica provoca radiação para o exterior da fibra de uma fracção de potência luminosa guiada; etc. Estes sensores usam normalmente fibra multimodo e díodos emissores de luz (LED), o que os torna atractivos em termos de custo. Em geral, estes sensores são conceptualmente simples, fáceis de reproduzir e económicos, mas estão sujeitos a erros devidos a flutuações de intensidade causadas pelo emissor óptico ou por perturbações ao longo das fibras [1,2]. Uma descrição mais detalhada deste tipo de sensores será apresentada num futuro artigo.

2. Sensores Interferométricos

Nestes sensores, a grandeza física que se pretende medir actua na fibra óptica modulando a fase da radiação por ela transmitida. Estes sensores, pela sua natureza, empregam fontes ópticas coerentes (díodos laser, por exemplo) e fibras ópticas monomodo (fibras ópticas concebidas para guiar um único modo de propagação, modo guiado esse que tem uma propagação axial do tipo onda plana, mas com um perfil de amplitude aproximadamente gaussiano, com diâmetro típico da ordem de 3 a 10 μm [2]). Numa fibra multimodo (que propaga, em geral, centenas ou milhares de modos guiados), a profundidade de modulação de fase varia de modo para modo e, além disso, as fases relativas e polarizações desses modos guiados são aleatórias; daí a necessidade de utilização de fibra monomodo para se obter modulação de fase eficiente da radiação.

A modulação de fase pode ser directa ou indirecta; neste caso, a grandeza física em causa afecta um elemento conversor que, por sua vez, actua directamente sobre a fibra óptica alterando a fase da radiação guiada. A variação de fase total da onda guiada num determinado percurso da fibra óptica monomodo depende essencialmente de três parâmetros da fibra — comprimento, índice de refração e diâmetro — cada um deles podendo ser actuado do exterior; por exemplo:

- comprimento: por tensão mecânica longitudinal ou expansão térmica;
- índice de refração: por temperatura, pressão, tensão longitudinal;
- diâmetro: por pressão radial ou expansão térmica.

A medição de pequenas variações da fase da radiação que é transmitida através da região onde actua o mensurando é conseguida comparando-a com a fase da radiação proveniente da mesma fonte óptica mas que percorreu um caminho óptico diferente e protegido da

acção do mensurando. Por interferência, a diferença de fase ($\Delta\phi$) pode então ser medida com uma sensibilidade $\approx 1 \mu\text{rad}$, isto é, com uma sensibilidade correspondente a $\approx 10^{-6}$ do comprimento de onda ($\Delta\phi = 2\pi\text{OPD}/\lambda$), o que origina uma possível resolução na medição do caminho óptico (OPD) de ≈ 1 parte em 10^{12} !

Existem diversas configurações de sensores interferométricos que podem ser implementadas usando fibras ópticas monomodo e que são análogas às de interferómetros clássicos. Deste modo, e de uma maneira geral, os sensores interferométricos em fibra óptica podem ter por base dois tipos de configurações: *interferómetros de duas ou de múltiplas ondas*.

2.1. Interferómetros de Duas Ondas em Fibra Óptica

Uma configuração bastante comum é o *interferómetro de Michelson* em fibra óptica (Fig.1a). A radiação proveniente da fonte óptica é dividida por um acoplador direccionado (AD), originando duas ondas que percorrem dois percursos diferentes: um que se designa de referência e o outro de sinal (onde actua o mensurando — fibra sensora). O acoplador direccionado construído em fibra (baseado na transferência parcial da radiação guiada entre dois núcleos de fibra óptica monomodo muito próximos) executa a mesma função que um divisor de feixe de luz tradicional do interferómetro de Michelson clássico [3,4]. No fim de cada percurso de fibra óptica é incorporado um espelho (M) que pode ser, por exemplo, um filme fino de prata previamente depositado na extremidade da fibra. A radiação que se propaga no percurso de sinal fica, deste modo, duplamente sujeita à acção do mensurando, sendo recombinada no acoplador direccionado com a radiação da fibra de referência. Uma das ondas de interferência resultante fica disponível para detecção, enquanto que a segunda é acoplada para a fonte óptica. Este último aspecto é indesejável, visto que radiação reinjectada na fonte óptica tende a perturbar o seu funcionamento, principalmente se a fonte for um laser monomodo [4].

Na figura 1b mostra-se uma configuração alternativa, o *interferómetro de Mach-Zehnder* em fibra óptica. Neste caso são usados dois acopladores direccionados, permitindo a obtenção fácil de duas ondas interferentes em oposição de fase, o que pode ser muito conveniente em algumas técnicas de processamento de sinal. Um outro interferómetro de duas ondas bastante estudado e utilizado é o *interferómetro de Sagnac* (fig.1c). Nesta configuração, as duas ondas percorrem percursos idênticos, mas em sentidos opostos. Este interferómetro é utilizado como sensor de rotação (*giroscópio*). O seu princípio de funcionamento assenta, simplificado, no facto de, estando a bobina de fibra a rodar com uma certa velocidade angular (ω), as duas ondas (de sinal e de referência) que percorrem a bobina em sentidos opostos, emer-

girem da fibra de saída em instantes de tempo diferentes, resultando assim numa diferença de fase que é proporcional ao comprimento total da fibra na bobina, ao diâmetro desta e à velocidade angular [3,4].

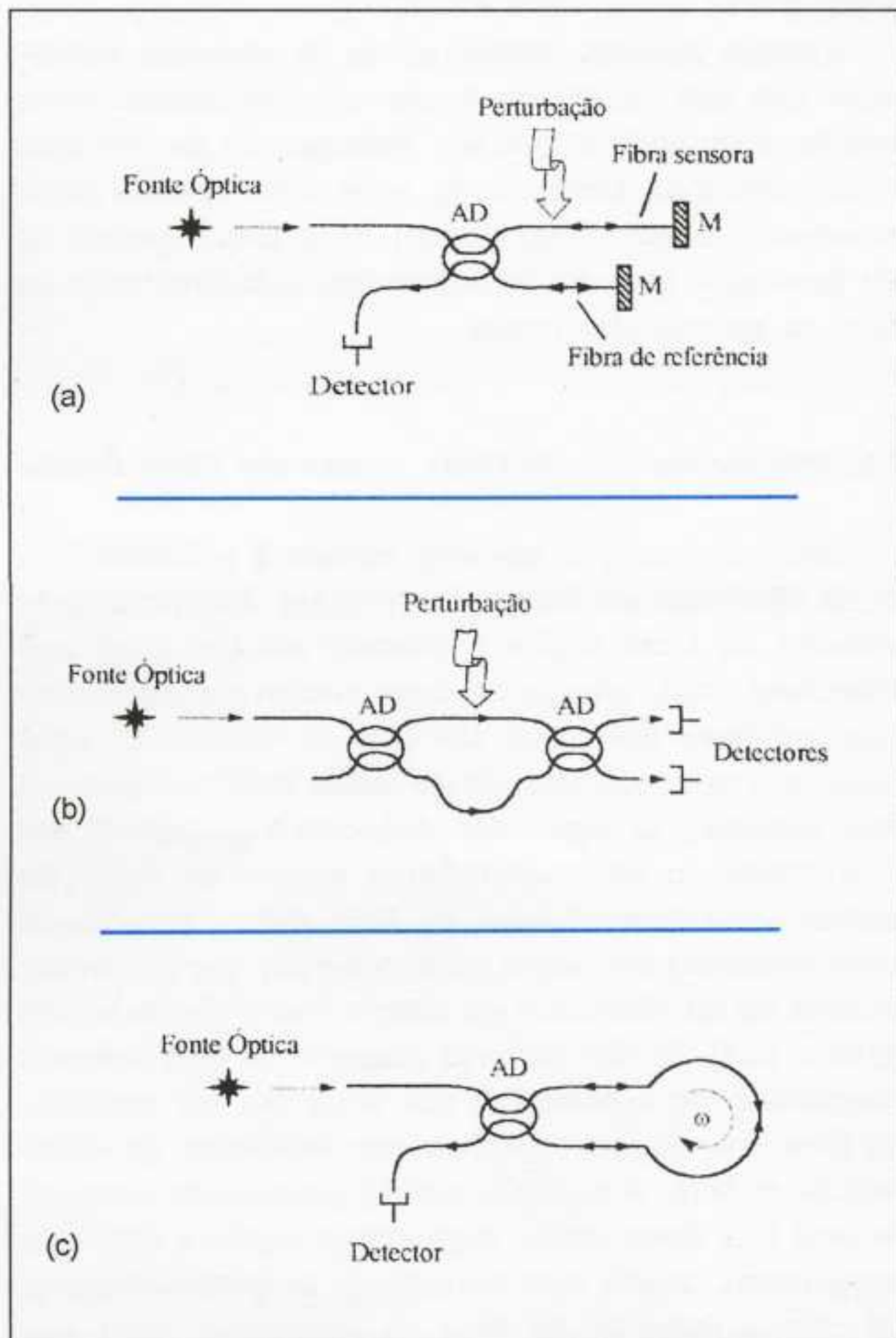


Fig. 1 — Interferômetros em fibra óptica do tipo: (a) Michelson, (b) Mach-Zehnder, (c) Sagnac.

Todos estes interferômetros de duas ondas exibem uma função de transferência com respeito à diferença de fase da forma

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{2} [1 + V \cos(\Delta\phi)] \quad (1)$$

em que I_{out} é a potência óptica que incide no detector, I_{in} a potência óptica de entrada no interferómetro, V é a visibilidade (ou contraste) da figura de interferência produzida e $\Delta\phi$ é a diferença de fase entre as duas ondas (de sinal e de referência). A visibilidade depende da razão das potências ópticas das ondas interferentes, do grau de coerência da fonte óptica e do estado de polarização entre os vectores campo eléctrico das ondas interferentes.

Na figura 2 representa-se a função de transferência (1), assumindo que o interferómetro não tem perdas e que a visibilidade é unitária [3,4]. Através desta figura, podem detectar-se dois problemas óbvios, nomeadamente: a sensibilidade da potência óptica de saída (I_{out}) a variações da fase óptica em torno de $m\pi$ (com m inteiro) é nula; variações de fase maiores do que π não podem ser distinguidas sem ambiguidade das variações menores que π , dado que a resposta do interferómetro é periódica.

A sensibilidade máxima do interferómetro ocorre para valores da diferença de fase entre as duas ondas de $\phi = (2m+1)\pi/2$, designados usualmente por "pontos de quadratura". Para maximizar a sensibilidade, teremos de operar o interferómetro num dos pontos de quadratura, o que é equivalente a manter a diferença de percursos ópticos entre as duas ondas em um quarto de comprimento de onda da luz incidente (isto é, \pm módulo $\lambda/2$). Quanto à limitação da gama de medição ser de π , pode ser ultrapassada utilizando técnicas de processamento de sinal adequadas, ou adoptando uma arquitectura para o sistema que permita, através de processos de "feedback" [3,4], limitar a gama dinâmica ao intervalo de fase correspondente a $\pm\pi/2$.

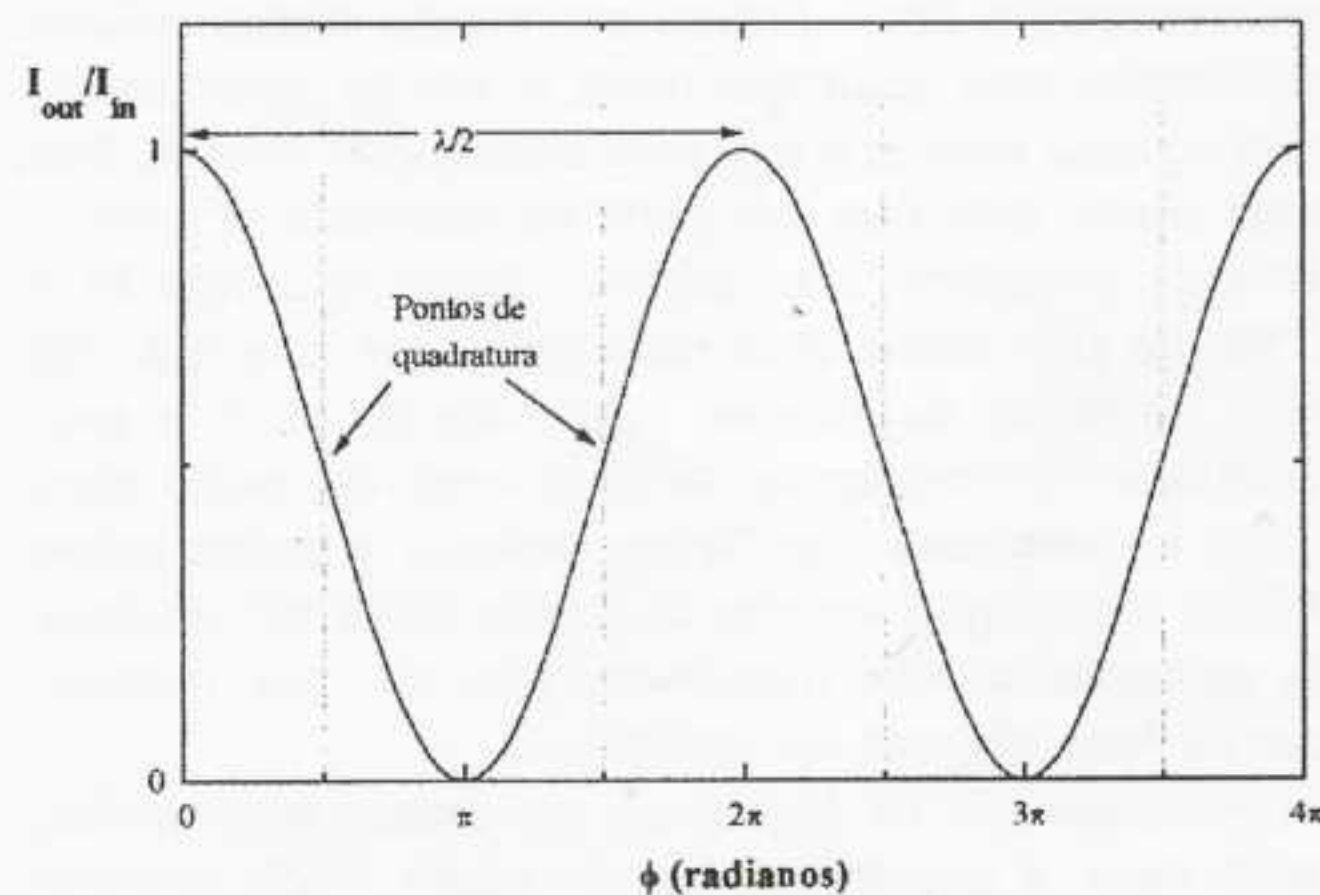


Fig. 2 — Função de transferência de um interferómetro de duas ondas.

2.2. Interferómetros de Múltiplas Ondas em Fibra Óptica

Neste tipo de interferómetros a radiação proveniente da fonte óptica é dividida por múltiplos percursos antes de ocorrer a recombinação. Uma maneira de conseguir isso consiste em construir uma cavidade óptica que possua um único percurso, o qual é atravessado diversas vezes pela radiação óptica incidente. Se a cavidade óptica funcionar como região de medição onde actua a perturbação física, então o mensurando actuará na radiação que se propaga em cada percurso, multiplicando assim o efeito sobre esta.

Na figura 3a apresenta-se, esquematicamente, um tipo de cavidade óptica que consiste simplesmente em duas extensões de fibra óptica monomodo com faces cortadas perpendicularmente ao eixo e semi-espelhadas, isto é, parcialmente reflectoras. Esta configuração é designada por *interferómetro de Fabry-Pérot* e a sua função de transferência em transmissão é dada por [1,2]:

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{1 + \left(\frac{4R}{(1-R)^2} \right) \sin^2(\phi/2)} \quad (2)$$

com a fase óptica ϕ dada por

$$\phi = \frac{4\pi nd}{\lambda} \quad (3)$$

em que R é a reflectividade das interfaces ópticas (para o caso em questão, estamos a considerar que as superfícies semi-espelhadas não têm perdas), d é a separação entre elas, n é o índice de refração efectivo da cavi-

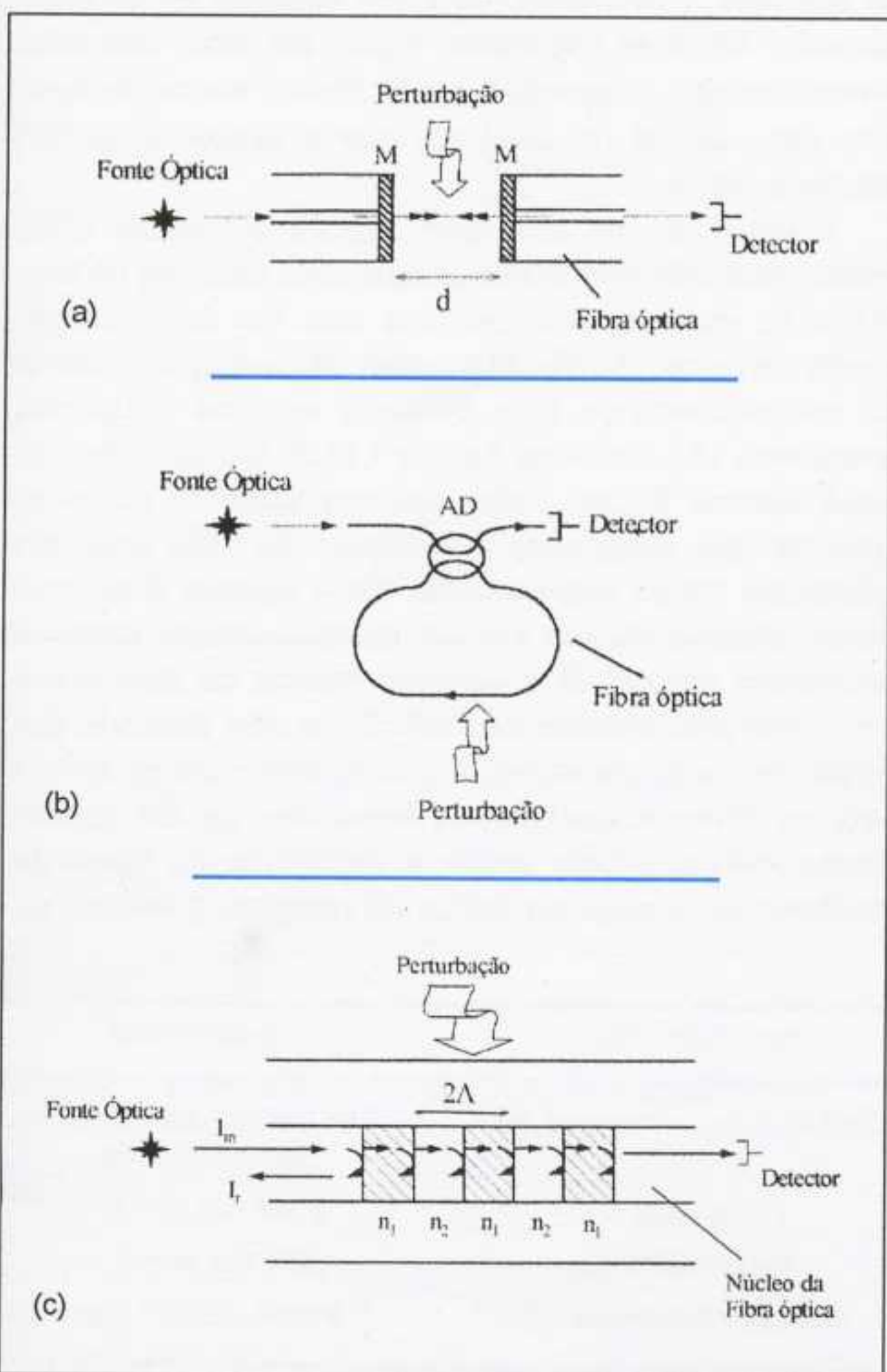


Fig. 3 — (a) Interferómetro de Fabry-Pérot em fibra, (b) interferómetro de anel em fibra, (c) rede periódica de Bragg em fibra óptica.

dade e λ o comprimento de onda da luz incidente. Na figura 4 representa-se a função de transferência em transmissão do interferómetro de Fabry-Pérot em função da fase óptica, para diversos valores da reflectividade das superfícies espelhadas (M). É de notar que, para valores de $\lambda = 2m\pi$ (com m inteiro), ocorre um máximo de transmissão, máximo esse que é independente do valor de R , o que significa que elevada transmissão pode ocorrer mesmos para valores elevados de reflectividade, incluindo casos em que $R > 99\%$.

Em termos de sensibilidade máxima, o ponto óptimo de funcionamento deste tipo de interferómetro depende da reflectividade (R) das superfícies semi-espelhadas. Se for elevada, o ponto óptimo de funcionamento ocorre

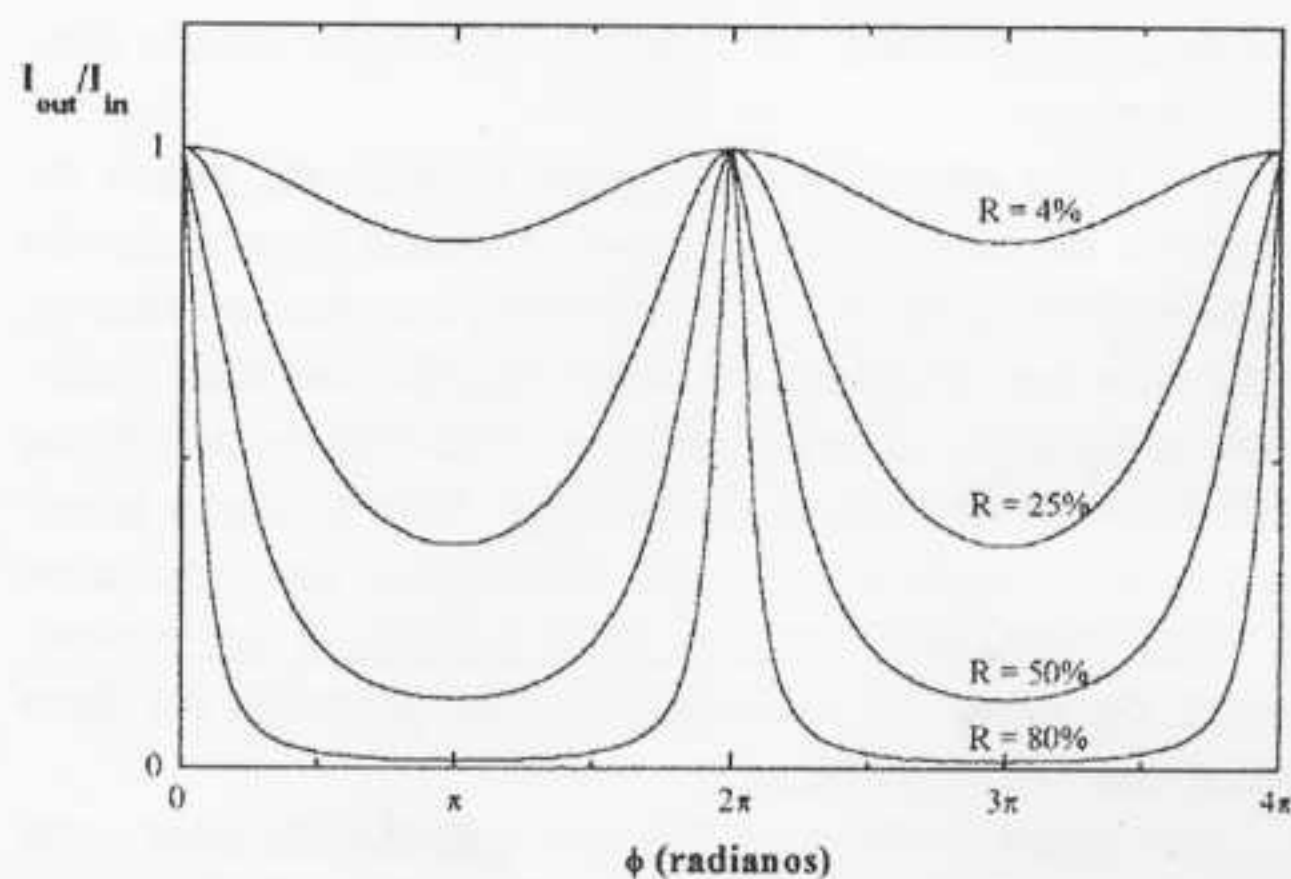


Fig. 4 — Função de transferência (normalizada) em transmissão de um interferómetro de Fabry-Pérot.

para I_{out} igual a $3/4$ do valor máximo, enquanto se for baixa ocorre para $1/2$ do valor máximo (neste último caso, $R = 4\%$, a função de transferência é muito similar à dos interferómetros de duas ondas, como se vê pela fig. 4).

Outro tipo de interferómetro de múltiplas ondas muito comum é o *interferómetro em Anel* (fig.3b), que se baseia no acoplamento parcial da radiação óptica, através de um acoplador direccionado (AD), para uma anel em fibra que fará circular a radiação. Estes interferómetros transmitem o sinal de interferência resultante da sobreposição de múltiplas ondas que são geradas por acoplamento sucessivo da radiação para o anel em fibra. Quando a radiação que é novamente acoplada para o anel, após ter percorrido uma volta completa, se encontra em fase com a radiação que está a ser acoplada pela primeira vez, está-se na situação de interferência construtiva. A sua função de transferência é similar à do interferómetro de Fabry-Pérot a operar em reflexão (isto é, complementar da Fig. 4).

Outro processo de se conseguir um sensor deste tipo é através da utilização de uma *rede periódica de Bragg* em fibra óptica (fig. 3c) [2,4]. Neste caso, cada onda elementar é originada pela reflexão parcial em diferentes

reflectores distribuídos em série. Um conjunto igualmente espaçado de pequenos reflectores pode ser fabricado na própria fibra óptica variando periodicamente o índice de refração do núcleo (n_2) ao longo de um comprimento de fibra desejado (na fig. 3c, tais reflectores correspondem às regiões de índice de refração a sombreado — n_1). Para se obter uma destas redes periódicas, procede-se do seguinte modo: recorre-se a fibra óptica especial fotossensível à radiação ultravioleta (com forte dopagem em germânio no núcleo da fibra), ou colocando uma fibra standard numa câmara com hidrogénio a alta pressão durante algumas horas; utilizando um sistema interferométrico iluminado por uma fonte laser a emitir na região de 240 nm, é gerado um padrão periódico de interferência, o qual é projectado sobre a extensão desejada de fibra óptica [2,4]. Este padrão de radiação resulta numa modificação periódica do índice de refração (*efeito foto-refractivo*).

Em cada interface entre duas regiões de índice de refração diferente, uma pequena reflexão ocorre, sendo a intensidade total da onda reflectida resultante determinada pela sobreposição de todas as componentes individuais reflectidas, apresentando um máximo de amplitude quando estas se encontram em fase. Esta situação acontece quando a separação (Λ) entre cada par adjacente de superfícies reflectoras é igual a metade do comprimento de onda da radiação que se propaga na fibra óptica (*condição de Bragg*).

Um exemplo da resposta em reflexão de uma rede periódica deste tipo é apresentado na figura 5. Esta função difere claramente da dos interferómetros de Fabry-Pérot e de Anel, visto que exhibe apenas um único máximo no comprimento de onda que obedece à condição de Bragg (λ_B). No entanto, e em alguns casos, um segundo máximo de reflexão aparecerá quando o comprimento de onda da radiação incidente na rede periódica de Bragg for metade do seu valor inicial, isto é, quando $\lambda_B/2$ (2.º harmónico). Quando a rede periódica de Bragg sofre uma perturbação exterior (temperatura, pres-

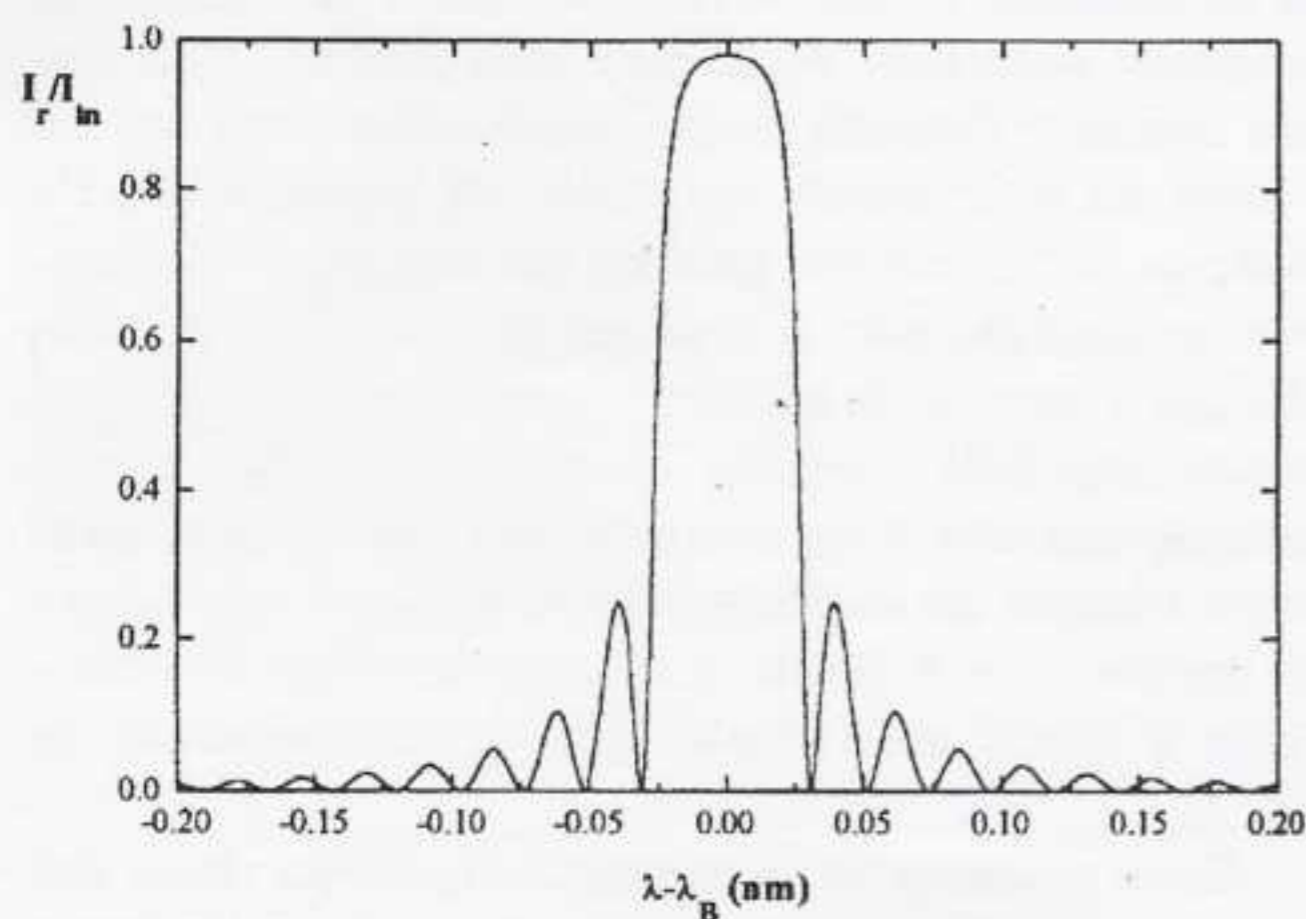


Fig. 5 — Reflectividade típica de uma rede periódica de Bragg em fibra óptica.

são, deformação axial, etc.), o período da rede (Λ) e os valores do índice de refração variam ligeiramente, resultando num desvio do comprimento de onda de Bragg inicial, desvio esse proporcional à amplitude dessa perturbação física. Este tipo de dispositivo tem um enorme potencial no domínio dos sensores de fibra óptica, visto que a informação sobre o mensurando está codificada no comprimento de onda, parâmetro este independente de flutuações de potência óptica da fonte e dos diversos componentes ópticos que constituem o sistema (como sejam acopladores direccionais, juntas entre fibras, etc.) [4].

3. Sensibilidade às Interações Físicas

Na maioria das aplicações, a acção do mensurando sobre a radiação que se propaga na fibra óptica faz-se via actuação no material que constitui a fibra e/ou no seu revestimento. Em quase todos os casos práticos, as alterações ambientais tendem também a produzir alterações nas características da radiação guiada, particularmente na sua fase, provocando um efeito adicional ao do mensurando. Torna-se importante saber, por isso, qual será a sensibilidade do sensor à acção destes efeitos ambientais, em especial no caso em que o sensor é do tipo interferométrico.

A aplicação de uma perturbação sobre um dado comprimento de fibra óptica produz uma variação na fase óptica do modo que se propaga com um dado comprimento de onda. As sensibilidades de fase (por unidade de comprimento) da fibra óptica a algumas influências ambientais são dadas na Tabela 1 [2,3]. De salientar que estes valores típicos dizem respeito somente às variações de fase associadas a variações de cada uma das grandezas físicas mencionadas. Para calcular a sensibilidade efectiva de um sensor interferométrico torna-se necessário determinar a variação mínima de fase que é detectável pelo sistema de medição, a qual depende das fontes de ruído presentes. Considerando valores típicos para os diversos parâmetros relevantes de um sensor interferométrico (como sejam a visibilidade da figura de interferência, a potência óptica no receptor, a largura de

Parâmetro Físico	Sensibilidade
Deformação linear axial (ϵ)	10^7 rad m^{-1} por unidade de deformação
Força axial (F)	$2 \cdot 10^4$ rad m^{-1} N^{-1}
Temperatura (T)	10^2 rad m^{-1} K^{-1}
Pressão hidrostática (P)	$5 \cdot 10^{-5}$ rad m^{-1} Pa^{-1}

Tabela 1 — Sensibilidade da fase óptica às influências ambientais, para fibras ópticas de núcleo de sílica a operar no comprimento de onda de 850 nm (valores típicos).

banda do bloco de processamento), variações de fase da ordem de 1 μ rad podem ser detectadas. Assim, como exemplo, um metro de fibra óptica no percurso de sinal de um sensor interferométrico tem uma resolução potencial em temperatura de 10^{-8} K.

No caso das redes de Bragg, o parâmetro que vai variar com a acção do mensurando é o comprimento de onda de Bragg da rede. Para uma fibra com núcleo de sílica, a Tabela 2 indica os valores típicos das sensibilidades (normalizadas pelo comprimento de onda de Bragg) para várias grandezas físicas [2,4]. Como exemplo, para se conseguir medir temperatura com uma resolução de ≈ 0.1 K utilizando um sensor de Bragg operando no comprimento de onda de Bragg a $\approx 1.3 \mu\text{m}$, é necessário detectar desvios neste comprimento de onda com uma resolução de ≈ 0.001 nm. Apesar desta resolução no comprimento de onda ser facilmente conseguida através de instrumentação laboratorial adequada (por exemplo, analisadores de espectros ópticos ou lasers sintonizáveis), a capacidade de resolver desvios desta ordem de grandeza, utilizando novos sistemas electro-ópticos compactos e de baixo custo, tem concentrado as atenções de diversos grupos de investigação desta área nos últimos anos.

Parâmetro Físico	Sensibilidade
Deformação linear axial (ϵ)	$(0.74 \text{ a } 0.78) \cdot 10^{-6} \mu\text{strain}^{-1}$ (a)
Temperatura (T)	$(7.5 \text{ a } 8.9) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Campo Magnético (B)	$2 \cdot 10^{-7} \text{ T}^{-1}$
Pressão hidrostática (P)	$2.71 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$

(a) 1 μstrain (micro-strain) corresponde à unidade de deformação de 1 parte em 10^6 .

Tabela 2 — Sensibilidades primárias típicas (normalizadas ao comprimento de onda de Bragg) das redes periódicas de Bragg.

4. Conclusão

Os sensores interferométricos, além de evidenciarem as vantagens inerentes a todos os sensores de fibra óptica, acrescentam-lhe outras, tais como versatilidade na geometria do elemento sensor, grande alcance dinâmico, extrema sensibilidade, capacidade de monitorização remota e multiplexagem eficiente. Por outro lado, a sensibilidade da fibra óptica a diferentes parâmetros físicos levanta o problema da selectividade do sensor, que por sua vez obriga ao uso de técnicas de referência por forma a calibrar e distinguir o parâmetro de interesse. Além disto, o sinal óptico de saída de um sensor interferométrico requer um processamento de sinal específico devido à sua função de transferência periódica, o que pode limitar o alcance dinâmico, dificultar medições abso-

lutas, degradar o desempenho e aumentar o nível de ruído do sistema.

Nas áreas de aplicação em ambientes adversos que requerem instrumentos especializados e de elevada sensibilidade, os sensores de fibra óptica oferecem possibilidades de monitorização que não seria possível atingir, doutra forma, utilizando os sensores convencionais.

Referências

- [1] UDD, E. — *Fiber Optic Sensors*, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [2] GRATTAN, K. T. V., and MEGGITT, B. T. — *Optical Fiber Sensor Technology*, Chapman & Hall, London, 1985.
- [3] JACKSON, D. A. — "Monomode optical fibre interferometers for precision measurement", *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 18, 981 (1985).
- [4] JACKSON, D. A. — "Recent progress in monomode fibre-optic sensors", *Meas. Sci. Technol.* 5, 621 (1994).

A. B. Lobo Ribeiro é Investigador Sénior no Grupo de Optoelectrónica do INESC-Porto, e Prof. Auxiliar no Dept. Ciências e Tecnologia da Universidade Fernando Pessoa, Porto.

Engineering Teaching in Physics Education

25-26 June 1998

Sheffield Hallam University, UK

A high proportion of physics graduates work in industry, effectively as engineers. The purpose of this international workshop is to bring together the representatives of industry and higher education to explore the need for, and the education of, physics graduates whose skills embrace engineering. The programme will consider undergraduate degrees and postgraduate taught and research degrees and will address subject content and skill requirements. Through invited and proffered papers, poster presentations, discussions and plenary sessions the format will enable the comparison of industry's needs with good educational practice and aims to identify proposed ways forward. Invited speakers from Germany, Slovakia, Poland and the UK will introduce the various sessions.

This international meeting will be held in June 1998 under the auspices of the Societe European pour la Formation des Ingenieurs (SEFI), the European Physical Society (EPS) and the Institute of Physics.

Registration fee: £ 185 (includes lunch)

Accommodation: £ 21 to £ 60 per night

Information: Institute of Physics, Conf. Department
76 Portland Place, London W1N 3DH
Tel: +441714704800; Fax: +441714704900
E-mail: conferences@iop.org
Web: <http://www.iop.org/Confs>