



2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

DESENVOLVIMENTO DE SENSORES COM REDES FOTO REFRAATIVAS EM FIBRA ÓTICA PARA O SETOR DE PETRÓLEO

Hypolito José Kalinowski, José Luís Fabris, Márcia Müller
Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná
Av. Sete de Setembro, 3165 – 80230-901 Curitiba, PR e-mail: hjkalin@cpgei.cefetpr.br

Resumo – Descrevemos nesse trabalho o desenvolvimento de dispositivos baseados no efeito foto refrativo em fibras óticas e suas aplicações como sensores de interesse ao setor de Petróleo. Redes de Bragg e Redes de Período Longo foram produzidas por técnicas de iluminação UV ou arco elétrico e aplicadas a medidas de temperatura, deformação mecânica e mistura de combustíveis. Os protótipos desenvolvidos apresentam desempenho similar a produtos convencionais, porém tem a vantagem de que as cabeças sensoras são totalmente passivas.

Palavras-Chave: Sensores de Fibra, Ótica; Redes de Bragg; Redes de Período Longo

Abstract – We describe the development of optical fiber photo refractive devices and their application as sensors for the Oil Industry. Bragg gratings and Long Period gratings are produced by means of UV illumination or electrical arc discharge. Such devices are applied to measure temperature, strain or fuel quality. Prototypes show performance similar to conventional sensors, however their sensing heads are totally passive.

Keywords: Optical Fiber Sensors, Bragg Grating, Long Period Grating

1. Introdução

Redes foto refrativas em fibra ótica são formadas por uma modulação periódica, longitudinal, no índice de refração da fibra, ao longo da direção longitudinal (Othonos e Kalli, 1999; Meltz et al., 1989) e podem ser produzidas por diversas técnicas. A estrutura provoca um acoplamento ressonante entre diferentes modos de propagação na fibra, que se traduz pela rejeição de uma banda de frequências óticas no espectro da luz transmitida. Basicamente, tais dispositivos comportam-se como filtros óticos seletivos. Nessa família de dispositivos, aqueles com maior gama de aplicação são as redes de Bragg (FBG) e as redes de período longo (LPG).

No caso de FBG, o acoplamento se dá entre o modo de propagação e um modo similar, contra-propagante, causando a reflexão seletiva de uma banda estreita de luz, centrada no comprimento de onda de Bragg, λ_B , da rede:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo de propagação da luz e Λ é o período da modulação do índice de refração (Othonos e Kalli, 1999).

O comprimento de onda de Bragg muda quando a rede é submetida a agentes externos tais como deformação longitudinal ou temperatura. Devido aos efeitos foto-elástico e termo-ótico, o índice de refração da sílica varia com aqueles agentes, resultando em um deslocamento do comprimento de onda de Bragg, que pode ser então usado como parâmetro transdutor. Por exemplo, o deslocamento espectral, $\Delta\lambda_B$, devido a efeitos de tensão longitudinal, ϵ_z , e temperatura, T , pode ser descrito pela equação:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \epsilon_z + (\alpha + \eta) \Delta T \quad (2)$$

Na equação (2), p_e representa o coeficiente efetivo para o efeito foto elástico, α é o coeficiente de expansão térmica e η o coeficiente termo-ótico. Para fibras de sílica com núcleo dopado com germânio, $p_e \approx 0.22$, $\alpha = 0,55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $\eta = 8,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Na região espectral de 1550 nm a sensibilidade para a aplicação de tensão longitudinal é de aproximadamente 1,2 pm para uma deformação relativa de 1 μstrain (ie, 1 μm por metro), enquanto que o deslocamento do comprimento de onda de Bragg por efeito de temperatura é na ordem de 12 pm/ $^\circ\text{C}$ (Othonos e Kalli, 1999).

As redes de período longo (LPG) têm sua operação baseada no acoplamento entre o modo no núcleo e modos de casca co-propagantes, governado pela seguinte expressão (Meltz et al., 1989):

$$\lambda_m = (n_{co} - n_{cl}^m) \Lambda \quad (3)$$

onde λ_m é o comprimento de onda de ressonância entre o modo de núcleo e o m -ésimo modo de casca, n_{co} e n_{cl}^m são, respectivamente, o índice de refração efetivo do modo de núcleo e do modo de casca. Uma vez na casca, a intensidade da luz decai rapidamente por atenuação devido às perdas na interface casca-meio externo, deixando no espectro de transmissão da LPG vales de atenuação.

A característica de sensoriamento das LPG para variações do meio externo será dada pela sensibilidade da fibra ótica a estas mudanças. Além de efeitos análogos aos das redes de Bragg no tocante a temperatura e deformação, outro fator importante é a mudança no índice de refração do meio externo. O índice de refração efetivo do modo de casca depende do índice do meio circunvizinho, do índice de refração da casca e do núcleo; como o índice efetivo do modo de núcleo depende somente dos índices de refração do núcleo e da casca, uma mudança no meio externo implica em alterar o termo n_{cl}^m na Equação (3), alterando assim a condição de casamento de fase e ocasionando deslocamentos em comprimento de onda dos vales existentes no espectro de transmissão.

Do ponto de vista da instrumentação, uma vantagem no uso de FBG ou LPG como transdutores é o fato de que a informação a respeito do agente atuando sobre a rede está codificada espectralmente (Hill e Meltz, 1997; Kashyap, 1999). Isso permite determinar a magnitude desse agente sem sistemas de referência para a potência ótica, que requerem calibração periódica. Outra vantagem é a possibilidade de multiplexar em comprimento de onda um grande número de sensores, permitindo medições multi-pontuais ou quase distribuídas. A multiplexação permite monitorar estruturas com grandes dimensões como, por exemplo, cabos de transmissão de energia elétrica, tanques de armazenagem, oleodutos, cascos de navios, etc.

2. Termômetro para Altas Temperaturas utilizando Redes de Bragg

O uso de uma FBG para medida da temperatura requer, basicamente, a iluminação da rede com uma fonte ótica de largura espectral suficiente para cobrir toda a faixa esperada de deslocamento (uns poucos nanômetros para temperaturas na faixa de centena de graus), e um sistema para demodular a informação contida no espectro refletido pela rede. Esse sistema pode ser montado em várias configurações, sendo a mais simples delas o uso de uma

segunda rede, medindo-se a potência no espectro de correlação entre as duas FBG. Uma introdução ao uso de sistemas com FBG pode ser encontrado no capítulo 7 de Othonos e Kalli (1999).

Um sistema para demodular a informação espectral de uma rede de Bragg, utilizando o esquema acima descrito, que fornece um sinal elétrico proporcional à temperatura, foi implementado conforme descrito por Cardozo da Silva et al. (2003). O esquema descrito naquela referência tem algumas limitações. Uma delas deriva do baixo tempo de resposta do sistema controlador de temperatura no termo-elemento, que impede medidas onde a variação de temperatura é rápida. Tipicamente o intervalo de tempo necessário para estabilizar o termo-elemento quando a temperatura varia de alguns graus é da ordem de uma dezena de segundos. Outra limitação é decorrente do próprio esquema sensor utilizado. Como a demodulação é realizada por uma rede de Bragg idêntica àquela sensora (ou no máximo deslocada em relação ao comprimento de onda central de Bragg), a faixa dinâmica de medida está limitada pela faixa dinâmica do controlador de temperatura (além de, obviamente, pela integridade das redes utilizadas).

A primeira daquelas limitações pode ser relaxada em vários sistemas de instrumentação onde a medida e controle de temperatura não necessita de tempos de resposta muito curtos, por exemplo, em reações onde a capacidade térmica envolvida é muito alta. Quanto à segunda, sua solução requer uma “ampliação” da faixa dinâmica da rede em função da temperatura, o que pode ser implementado de maneira simples, colando a rede sobre um substrato com diferente coeficiente de expansão térmica. Aqueles autores mostram o resultado do processo de calibração de redes de Bragg, sendo uma delas livre e as demais coladas sobre diferentes substratos, a saber: vidro (lamínula de microscópio), alumínio e zinco.

O resultado descrito no parágrafo anterior tem aplicação imediata em um sistema simples para demodulação do comprimento de onda de Bragg em sistemas sensores utilizando estas redes. Como a taxa de variação da posição espectral quando a fibra está colada sobre aqueles dois metais é 4 – 5 vezes superior àquela intrínseca da rede na própria fibra, um filtro de referência com a rede assim montada pode, para um controlador de temperatura com uma faixa dinâmica ΔK , obter a temperatura na rede sobre uma faixa 4–5 x ΔK , ampliando a faixa dinâmica do instrumento como um todo. A Tabela 1 resume essa situação considerando a rede de referência (colada sobre um substrato) presa a um termo-elemento Peltier cuja faixa dinâmica vai de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo utilizada na demodulação de um sensor de rede de Bragg livre (cujo comprimento de onda de Bragg é projetado com um deslocamento inicial em relação àquela da rede de referência).

Tabela 1: Faixa dinâmica, ΔT , possível para uma rede de Bragg livre quando demodulada por uma rede com comprimento de onda de Bragg deslocado de 1,3 nm (zinco) ou 1,1 nm (alumínio), colada sobre um substrato sujeito a uma variação de temperatura ΔK .

Substrato	ΔK ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
Alumínio	-10...90	20...365
Zinco	-10...90	20...432

2.1 Estabilidade do Sensor

Para temperaturas de até poucas centenas de graus (centígrados) a fibra ótica pode ser utilizada sem problemas, já que seu ponto de fusão é bem mais elevado. Revestimentos especiais podem ser ainda empregados para melhor proteção à temperatura. No tocante às redes de Bragg o problema surge devido ao decaimento térmico da modulação de índice de refração, em temperaturas de aproximadamente $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Othonos e Kalli, 1999; Kashyap, 1999). A constante de tempo característica para o decaimento de 40 % em sua refletividade é de 10 horas (Othonos e Kalli, 1999). Isso impede que uma rede de Bragg simples possa ser utilizada de forma permanente em temperaturas daquela ordem de grandeza.

Redes de Bragg em fibra ótica, estáveis em alta temperatura, $400 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, foram produzidas por otimização das técnicas utilizadas nos processos de pré-sensibilização, térmico e por irradiação ultravioleta, adotados nas fibras usadas para gravar as redes. Foram assim obtidas redes estáveis a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ e redes mostrando apenas uma redução a 30% em sua refletividade quando mantidas por até 30 min a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Canning et al., 2001).

O uso de uma rede de Bragg estável em alta temperatura permite desenvolver um termômetro usando esse transdutor para monitorar temperaturas na faixa de $200 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, usando uma rede de referência montada sobre um substrato de zinco e utilizando os circuitos ótico e eletrônico descritos na seção anterior. Essa faixa de temperaturas tem aplicações em vários setores industriais como, por exemplo, o controle de temperatura em colunas de destilação de hidrocarbonetos.

2.2 Caracterização

As redes sensoras foram produzidas nos laboratórios do OFTC¹, usando as técnicas descritas na referência (Canning et al., 2001). Como características típicas, os resultados descritos neste trabalho usam uma rede com comprimento de Bragg inicial de 1539,89 nm em $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, cuja largura de banda a meia altura (FWHM) era de 0,27 nm, ambos determinados antes do processo de caracterização. O comprimento de onda de Bragg não se altera com sucessivas ciclagens térmicas. A largura de banda sofre uma redução inicial com o processo de aquecimento,

¹ Optical Fibre Technology Centre, University of Sydney, Austrália.

provavelmente devido à homogeneização e liberação de tensões internas. Cada rede utilizada como sensor foi previamente calibrada contra um termopar, usando um elemento Peltier e um forno de laboratório. A Figura 1 mostra um resultado típico da curva de calibração assim obtida, ajustada por um polinômio de terceiro grau (Equação 4), com coeficiente de correlação de 0,99984.

$$\lambda_B = 1539.70798 + 0.00805T + 1.73752E - 5T^2 - 1.65451E - 8T^3 \quad (4)$$

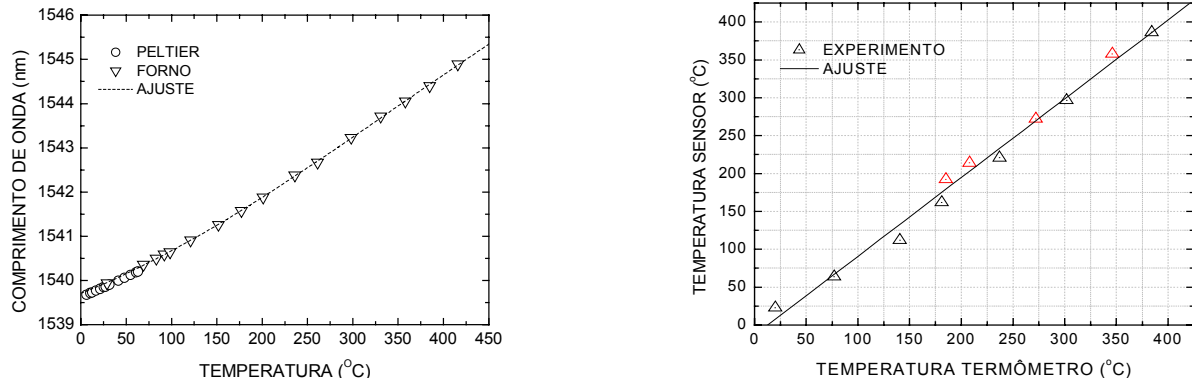


Figura 1 - Calibração da rede sensora, comprimento de onda de Bragg versus temperatura (esquerda) . Medida da temperatura em um forno usando um sensor de rede de Bragg (direita).

Para aplicação do sensor foi desenhado um encapsulamento protótipo (vide Fig. 2) para a rede sensora, com a finalidade de tornar o dispositivo mais robusto. O sistema consiste de tubo de aço (diâmetro de 4,5 mm) com revestimento interno de amianto. Na ponta desse tubo há outros dois tubos menores de aço, com diâmetros diferentes onde o de menor diâmetro (0,3 mm) serve de guia para a posicionar o sensor dentro daquele com maior diâmetro (1 mm), que serve de proteção para a rede de Bragg. Esse procedimento faz com que o a rede sensora não encoste nas paredes do tubo, evitando erros de leitura que poderiam ser provocados pela deformação mecânica do aço. Devido ao pequeno volume de ar existente entre a fibra ótica e a parede do tubo, o diferencial de temperatura é desprezível. O conjunto sensor é posicionado dentro de um bloco de cobre, usado para fixação no local onde a temperatura será mensurada.



Figura 2 - Montagem mecânica para encapsulamento do sensor (paquímetro aberto em 5 cm).

O protótipo assim desenvolvido foi usado para medidas em um forno de laboratório, novamente contra um termopar. A curva obtida é mostrada no gráfico à direita na figura 1. Embora o erro entre os dois termômetros seja ainda elevado (o desvio padrão é de 11 °C), observou-se que o sensor usando uma fibra ótica com rede de Bragg apresenta um tempo de resposta inferior ao do termopar (e ainda dominado pela capacidade térmica do encapsulamento, particularmente do bloco de cobre usado para permitir sua fixação). Outro fator que contribui para o erro nessa medida é a própria estabilidade da temperatura no forno. Usando vários filamentos, (ativação independente) o fluxo de calor não é homogêneo e a temperatura na região de medição não corresponde àquela na posição do termopar usado para controle.

3. Redes de Período Longo: Aplicação no Controle da Mistura Combustível

A técnica utilizada para gravar as LPG é a semelhante à usada por Rego et al. (2001), posicionando em uma máquina de emendas comercial uma fibra monomodo padrão, descascada. A tensão longitudinal é mantida constante durante a gravação, através de uma pequena massa suspensa por uma das extremidades da fibra. A outra extremidade da fibra ótica é presa num estágio de translação de precisão controlado por computador. Um arco elétrico é produzido com corrente e duração temporal adequadas, e em seguida a fibra é deslocada por um comprimento igual ao período da rede.

Esse procedimento é repetido várias vezes, originando perturbações periódicas ao longo da fibra, resultantes do seu aquecimento local. Como a leitura da rede estava sendo feita durante o processo de gravação, a formação da rede era realizada até que se obtivesse um espectro adequado a aplicação que se desejava ou de forma a obter a máxima eficiência de acoplamento, facilitando assim o levantamento da sensibilidade do sensor.

Para medir a resposta do sensor ao índice de refração do meio externo, primeiramente o fluido era colocado sobre a rede e logo após este procedimento, a rede e o fluido eram cobertos por duas lamínulas em contato. Esse procedimento garante que a LPG fique imersa no líquido durante as aquisições dos espectros de transmissão. Inicialmente, para verificar se as redes fabricadas eram capazes de detectar variações de índice, foram colocados fluidos com índices de refração diferentes e conhecidos. A resposta da rede com período de 649 μm e 40 pontos de gravação

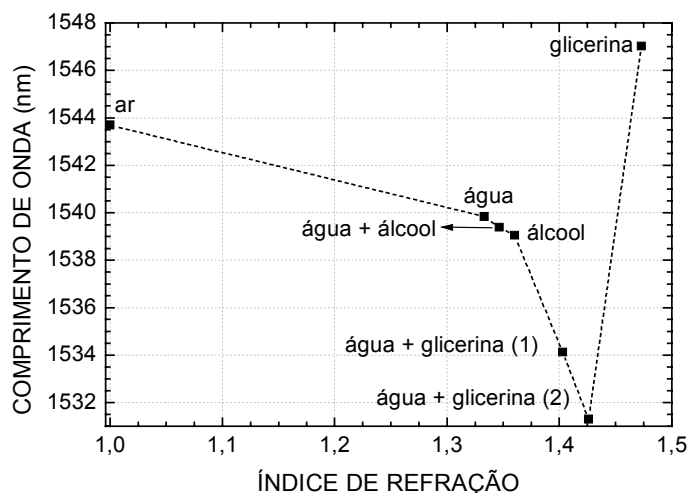


Figura 3 - Posição espectral do pico de atenuação da LPG (40 períodos de 649 μm) em função do índice de refração.

está mostrada na Fig. 3. Dessa figura pode-se notar que uma maior variação em comprimento de onda ocorre quando o índice do meio externo à fibra aproxima-se daquele da casca (Patrick et al., 1996; Bhatia e Vengsarkar, 1996). Uma variação de 8 nm na faixa entre 1,333 e 1,426 foi obtida, resultando numa resolução média de $0,0116 \text{ (nm)}^{-1}$ (Falate et al., 2002).

O gráfico da Fig. 4 mostra a sensibilidade da rede quando a concentração de álcool na gasolina é variada, para uma LPG com período de 649 μm e 53 períodos de interação. Nota-se nessa figura que, embora a rede possa detectar

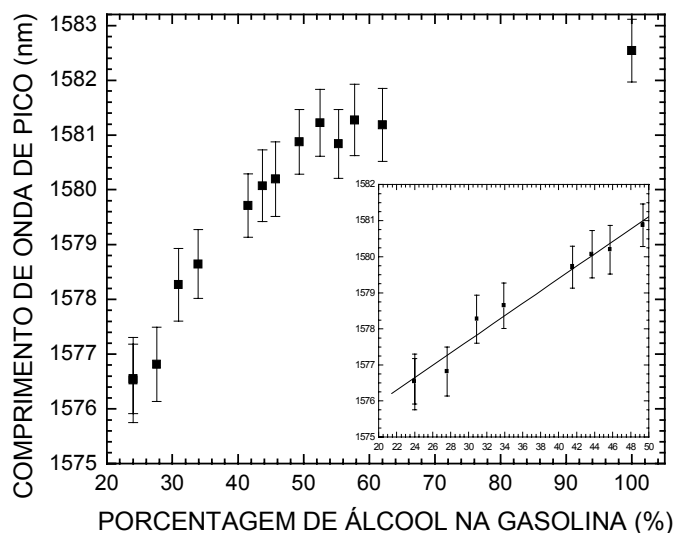


Figura 4 - Posição de pico da LPG (53 períodos de 649 μm) em função da proporção volumétrica de álcool na gasolina. O detalhe mostra a região de maior sensibilidade, que pode ser ajustada por uma reta.

concentrações acima de 49 %, existe uma região de maior sensibilidade e com uma resposta aproximadamente linear, na faixa entre 24 e 49 %, os mais prováveis valores de concentração para adulteração. Na figura em destaque é mostrado

um ajuste linear nessa faixa, para determinar a sensibilidade média da rede. O coeficiente angular resultante foi de $0,17 \pm 0,02$ nm/%.

4. Conclusões

O uso de sensores baseados em FBG e LPG permite a obtenção de instrumentos que podem operar remotamente em ambientes hostis sem riscos de ignição ou explosão, apresentando desempenho similar a de sensores convencionais. Aplicações de FBG ou LPG para medidas de temperatura ou da mistura de combustível são facilmente implementadas, já que a tecnologia de fabricação de dispositivos está disponível no Brasil. Adicionalmente, as unidades sensoras podem estar posicionadas a várias centenas de metros (até dezenas de quilômetros se for usada amplificação ótica) da unidade de leitura e processamento, permitindo melhor monitoração de pontos remotos. Outra vantagem é o posicionamento de muitos sensores ao longo do mesmo enlace ótico, reduzindo custos de cabeamento, instalação e manutenção.

Outras possibilidades em estudo compreendem a monitoração estática e estudos dinâmicos em grandes estruturas, usando sensores baseados em redes de Bragg.

O desenvolvimento de sensores para monitorar mistura de combustíveis será ainda aprofundado para incluir outros componentes utilizados na mistura (popularmente conhecidos como solventes), verificando seu efeito no deslocamento espectral da rede utilizada como sensor.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro obtido de CAPES, CNPq, Fundação Araucária, Paraná Tecnologia e da Agência Nacional de Petróleo (PRH-ANP/MME/MCT 10 CEFET-PR).

6. Referências

- BHATIA, V., VENGSARKAR, A.M. Optical fiber long-period grating sensors. *Optics Letters*, v. 21, n. 9, p. 692, 1996.
- CANNING, J., SOMMER, K., ENGLUND, M. Fibre gratings for high temperature sensor applications. *Meas. Sci. Technol.*, v. 12, p. 824-828, 2001.
- CARDOZO DA SILVA, J.C. et al. Termômetro de Alta Temperatura (0-400 C) baseado em Redes de Bragg em Fibra Ótica para Aplicação no Setor de Petróleo. In: *III Seminário Nacional de Controle e Automação*, 2003 – submetido.
- FALATE, R. et al., Produção e Caracterização de Redes de Período Longo Gravadas com Arco Elétrico. In: *X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*. Anais, p. 78-82, 2002.
- HILL, K.O., MELTZ, G. Fiber Bragg Gratings Technology: Fundamentals and Overview. *J. Lightwave Technol.*, v. 15, p. 1263-1276, 1997.
- KASHYAP, R. *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press, 1999.
- KERSEY, D. et al. Fiber Grating Sensors. *J. Lightwave Technol.*, v.15, n.8, p. 1442, 1997.
- MELTZ, G., MOOREY, W.W., GLENN, W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method. *Optics Letters*, v. 14, p. 823-825, 1989.
- MURPHY, L. J., DANDY, G. C., SIMPSON, A. R. Optimum design and operation of pumped water distribution Systems. In: *Conference on Hydraulics in Civil Engineering*, Brisbane, Australia : Institution of Engineers, fev., 1994.
- OTHONOS, A., KALLI, K. *Fiber Bragg Gratings – Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, Artech House, 1999.
- PATRICK, H.J., KERSEY, A.D., BUCHOLTZ, F. Analysis of the Response of Long Period Fiber Gratings fo External Index of Refraction. *J. Lightwave Technol.*, v. 16, n.9, p. 1606 (1996).
- REGO, G. et al. High Temperature Stability of Long-Period Gratings Produced Using an Electric Arc. *J. Lightwave Technol.*, v. 19, n. 10, p. 1574, 2001.
- VENGSARKAR, A.M. et al. Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters. *J. Lightwave Technol.*, v. 14, n.1, p. 58, 1996.