

SENSORES A FIBRA ÓTICA PARA DETECÇÃO DE HIDROCARBONETOS E MONITORAÇÃO DA TEMPERATURA EM POLIDUTOS

Francelli Klembe¹, Ricardo Canute Kamikawachi¹, Rafael Rosado¹,
Fabiano Kuller¹, Márcia Müller¹, José Luís Fabris¹

¹ CEFET-PR Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná
Av. Sete de Setembro, 3165 CEP 80230-901 Curitiba – Pr
fran@cpgei.cefetpr.br

Resumo – Neste trabalho descrevemos a produção e caracterização de dispositivos sensores em fibra ótica visando à identificação de hidrocarbonetos fluindo em polidutos. Foram produzidas Redes de Bragg e de Período Longo em fibras óticas, sendo a primeira caracterizada quanto a variações de temperatura e a segunda quanto a alterações no índice de refração do meio exterior a fibra. Na produção da Rede de Bragg foi utilizada a técnica de escrita interferométrica com laser ultravioleta. A Rede de período longo foi obtida com a técnica de escrita ponto-a-ponto com a descarga elétrica de uma máquina de emendas. A caracterização da Rede de Bragg como sensor de temperatura foi realizada para variações de temperatura na faixa entre 0 e 40 °C, e o sensor foi submetido a tratamento térmico a 190 °C por 1 hora para diminuir a histerese. A sensibilidade obtida foi de 11,3 pm/°C. O sensor de Rede de Período Longo foi utilizado para a identificação de amostras de álcool, gasolina, aguarrás, tiner, querosene e diesel, mostrando um tempo máximo de resposta de 3 segundos, e alterações no comprimento de onda de atenuação desde 1528,35 até 1554,87 nm.

Palavras-Chave: Sensores, Rede de Período Longo, Hidrocarbonetos, Rede de Bragg, Temperatura.

Abstract – In this work we describe the production and characterization of sensor devices in optical fibers used to identify the hydrocarbons flowing in a pipeline. Fiber Bragg Gratings and Long Period Gratings were produced in optical fibers, the former characterized for changes in the temperature and the latter for changes in the refractive index of the external medium of the fiber. The method employed to produce de Fiber Bragg Grating used an ultraviolet laser and a phase mask interferometer. The Long Period Grating was produced with a point-to-point electric arch discharge from a fusion splicer. The characterization of the Fiber Bragg Grating as a temperature sensor was accomplished for temperature changes in the range between 0 and 40 °C, and the sensor was kept at 190 °C for 1 hour to reduce its hysteresis. The obtained sensor sensitivity was of 11.3 pm/°C. The Long Period Gratings sensor was employed for the identification of alcohol, gasoline, turpentine, thinner, kerosene and diesel samples, showing a response time of 3 seconds, and changes in the attenuation wavelength from 1528.35 up to 1554.87 nm.

Keywords: Sensor, Long Period Grating, Hydrocarbons, Fiber Bragg Grating, Temperature.

1. Introdução

Redes em fibra ótica são estruturas periódicas de modulação do índice de refração no núcleo da fibra, ao longo do eixo de propagação da luz, e podem ser usadas como sensores de tensão, de temperatura e de índice de refração (Patrick, *et al*, 1996 e 1997). Destes dispositivos, as redes de Bragg (FBG – *Fiber Bragg Gratings*) e as redes de período longo (LPG – *Long Period Gratings*) são os que possuem maiores aplicações.

Nas FBG, o acoplamento ocorre 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:

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

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo de propagação da luz e A é o período espacial da modulação do índice de refração (Othonos e Kalli, 1999). Se a condição de Bragg não for satisfeita, a luz refletida de cada plano subsequente se torna progressivamente fora de fase e pode eventualmente cancelar-se. Quando a condição de Bragg é satisfeita, as contribuições da luz refletida de cada plano da rede interferem construtivamente na direção contra-propagante formando um pico de reflexão com o comprimento de onda definido pelos parâmetros da rede.

O comprimento de onda de Bragg sofre mudanças quando a rede é submetida à ação de deformações longitudinais (ϵ_z) ou temperatura (T). O deslocamento espectral, $\Delta\lambda_B$, devido a esses efeitos pode ser descrito pela equação (Othonos, 1997):

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

Na Equação (2), p_e representa o coeficiente efetivo para o efeito foto-elástico, α é o coeficiente de expansão térmica e η é o coeficiente termo-ótico. Portanto, qualquer alteração na temperatura, implica em alterar o termo $(\alpha + \eta)$ da equação (2), ocorrendo um deslocamento no comprimento de onda de Bragg dos picos existentes no espectro de reflexão.

As LPG têm sua operação fundamentada no acoplamento entre o modo propagante de núcleo e modos co-propagantes de casca. Os comprimentos de onda de ressonância das LPG são dados pela condição de casamento de fase (Meltz, *et al*, 1.989):

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

onde λ_m é o comprimento de onda central do m -ésimo modo de casca, para o qual a luz foi acoplada, n_{co} é o índice de refração efetivo do modo de núcleo, n_{cl}^m é o índice de refração efetivo do m -ésimo modo de casca e A é o período espacial da rede. A potência ótica que se propaga nos modos de casca decai rapidamente para modos de radiação, deixando no espectro de transmissão vales de atenuação centrados no comprimento de onda dados pela Equação (3). O índice de refração efetivo do modo de casca depende do índice de refração do meio circunvizinho, do núcleo e da casca. Uma mudança no meio externo implica em alterar o termo n_{cl}^m na Equação (3), alterando a condição de casamento de fase e ocasionando deslocamentos em comprimentos de onda dos vales existentes no espectro de transmissão. A identificação dos diversos deslocamentos de λ_m para variações conhecidas de índices de refração do meio externo permitem então a construção e calibração de um dispositivo sensor.

2. Leitura e Gravação de Redes

2.1. Rede de Bragg

A Figura 1 representa o sistema de leitura e gravação de Redes de Bragg. O sistema de leitura utiliza um LED superluminescente (*Superlum, Pilot-2*), que opera na faixa de 1445 nm a 1645 nm como fonte de luz. A luz acoplada à fibra é refletida pela FBG e analisada pelo analisador de espectros óticos (OSA - *Optical Spectrum Analyzer, Anritsu, MS9710B*), operando com resolução de 0,1 nm, estabilidade de comprimento de onda de ± 5 pm, e os dados são enviados para um computador.

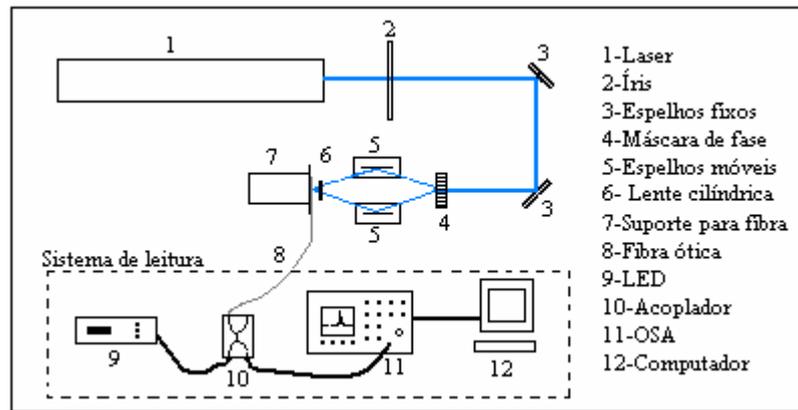


Figura 1: Diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação de FBG.

A gravação consiste na junção das técnicas interferométrica e de máscara de fase (Kashyap, 1999), onde a luz ultravioleta de um laser (*New Wave, Tempest-20, Nd YAG*) é difratada pela máscara de fase e recombinada via reflexão em dois espelhos móveis, com resolução angular de $0,001^\circ$, controlados por computador. A lente cilíndrica focaliza os feixes UV, formando um padrão de interferência luminosa no núcleo da fibra. O período espacial do padrão formado determina o comprimento de onda de reflexão, λ_B , da rede escrita.

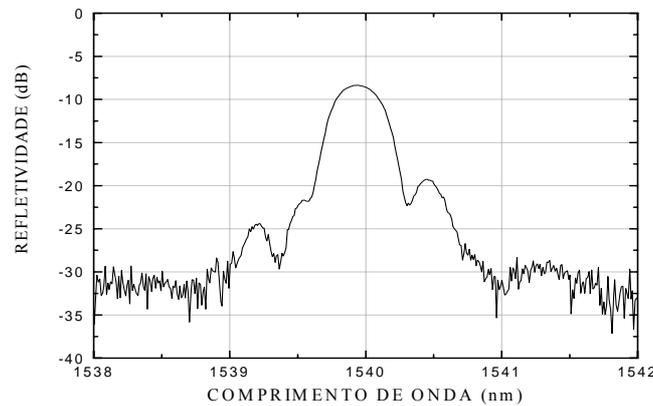


Figura 2: Espectros de reflexão da fibra após o processo de gravação.

A Figura 2 apresenta o espectro de reflexão típico de uma FBG. Para a gravação foi utilizada fibra SMF hidrogenada, para aumentar a fotossensibilidade da rede. A Rede de Bragg gravada e utilizada nos experimentos possui uma largura de banda ($\Delta\lambda$) de 0,41 nm, comprimento de onda central (λ) de 1539,83 nm e refletividade de 20,8 dB.

2.2. Rede de Período Longo

A Figura 3 mostra o sistema de leitura e gravação de Redes de Período Longo em fibra ótica. O sistema de leitura utiliza uma lâmpada halógena de 50 W, cuja luz é acoplada a um monocromador através de uma lente convergente. Ao atravessar o monocromador, a luz é modulada por um *chopper* e é focalizada por uma lente objetiva em uma fibra ótica. A luz transmitida pela fibra é focalizada por outra lente objetiva em um detector de InGaAs e o sinal é processado por um amplificador *lock-in*. Todo este sistema é controlado por computador.

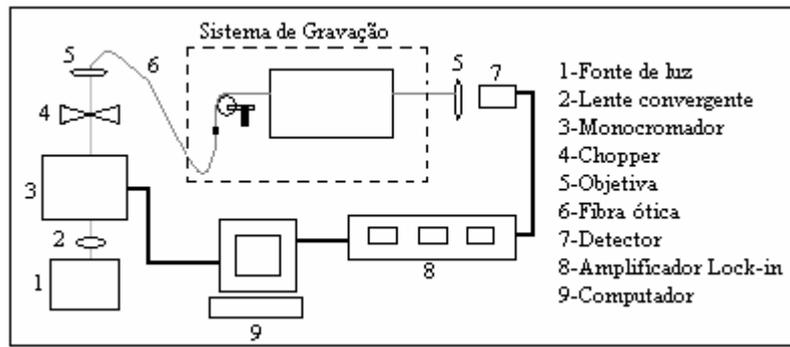


Figura 3: Diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação das LPG.

O sistema de gravação usa um método similar ao descrito por Rego *et al* com algumas modificações. A fibra é inserida entre os eletrodos de uma máquina de emendas de fibras óticas. Uma das extremidades da fibra passa por uma roldana, e uma massa de 17,52 g é presa a esta para mantê-la sob tensão longitudinal constante. A outra extremidade é fixada em um estágio de translação de precisão controlado por computador. Um arco elétrico de corrente de 12 mA e duração temporal de 0,5 s é então aplicado; em seguida a fibra é deslocada por um comprimento igual ao período da rede e um novo arco é aplicado. Este procedimento é então repetido várias vezes gerando a alteração periódica no índice de refração da fibra que caracteriza a LPG.

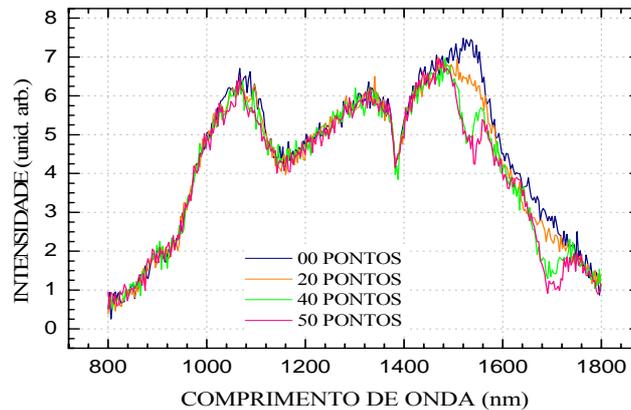


Figura 4: Espectros de transmissão da fibra durante o processo de gravação.

Na Figura 4 é apresentado o espectro de transmissão da fibra quando posicionada no sistema e durante a formação da rede após 20, 40 e 50 pontos de interação. Esse acompanhamento do processo de formação da rede permite que a escrita seja realizada até que se tenha uma rede com máxima eficiência de acoplamento, facilitando assim a leitura do sensor.

Nos experimentos a rede utilizada foi obtida após a gravação de 50 pontos de interação, possuindo comprimento de onda do vale de atenuação no ar de 1544 nm, e período de 595 μm .

3. Caracterização das Redes

3.1. Rede de Bragg quanto a Temperatura

A rede utilizada como sensor de temperatura foi previamente calibrada com um termopar, usando um elemento *Peltier*, em três ciclos de aquecimento e resfriamento, e um forno de laboratório.

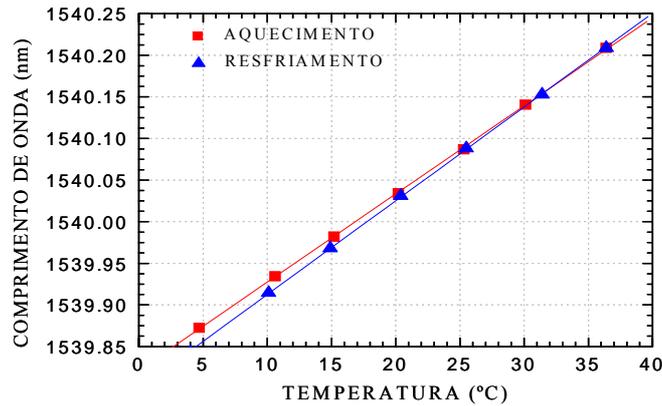


Figura 5: Caracterização da FBG com o *Peltier*, primeiro ciclo.

A Figura 5 mostra a evolução térmica do comprimento de onda como função da temperatura, em um intervalo de aproximadamente 40 °C, utilizando o *Peltier*. Para os três ciclos analisados o comportamento foi semelhante, mostrando uma histerese para os processos de aquecimento e resfriamento de 0,0081 nm em 20 °C, e sensibilidade de 11,3 pm/°C. Para evitar imprecisões nas medidas de temperatura devidas a histerese apresentada, a fibra foi submetida a um processo de recozimento (Liu *et al*, 2001 e Douay *et al*, 1993).

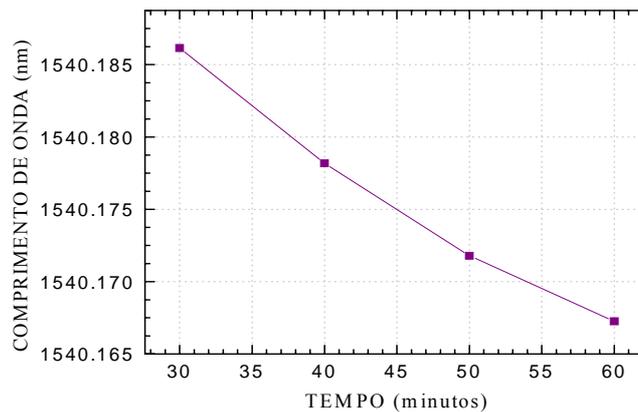


Figura 6: Evolução do comprimento de onda da FBG mantida a uma temperatura de 190 °C, em um forno de laboratório.

A Figura 6 mostra a evolução do comprimento de onda quando a FBG foi colocada em um forno de laboratório a uma temperatura de aproximadamente 190 °C. A FBG foi deixada no forno durante uma hora, sendo que o acompanhamento da evolução do comprimento de onda foi feito a cada dez minutos na segunda meia hora, quando a temperatura mantinha-se constante. Neste período, observa-se um pequeno deslocamento do comprimento de onda de 0,019 nm.

Após a retirada da FBG do forno, foi realizada novamente a caracterização com o *Peltier* e o resultado é apresentado na Figura 7, para um dos ciclos de aquecimento e resfriamento.

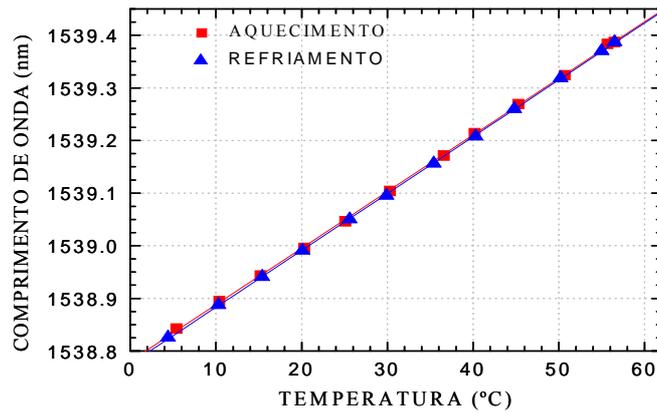


Figura 7: Caracterização da FBG com o *Peltier*, primeiro ciclo, após forno.

A Figura 7 mostra a evolução térmica do comprimento de onda como função da temperatura, em um intervalo de aproximadamente 60 °C, utilizando o *Peltier*. Para os três ciclos analisados o comportamento foi semelhante, mostrando uma histerese para os processos de aquecimento e resfriamento de 0,003 nm em 20 °C e sensibilidade de 11,3 pm/°C.

Desta maneira, as FBG podem ser utilizadas no sensoriamento de temperaturas, uma vez que o comprimento de onda de Bragg varia linearmente com a temperatura, com uma histerese reduzida.

3.2. Rede de Período Longo quanto a Alteração do Meio Externo

Para demonstrar a possibilidade da identificação de hidrocarbonetos fluindo em um duto, a LPG produzida foi posicionada no interior de um tubo de PVC através do qual é provida a passagem controlada do fluido sob análise. Como as LPG são sensíveis a outros parâmetros externos como curvaturas (Patrick, *et al*) e temperatura (Vengsarkar, *et al*), a rede foi colada na parede interna do tubo e a temperatura foi monitorada, mantendo-se na faixa de $19,5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

Uma das extremidades da fibra contendo a rede foi conectada a um LED superluminescente, utilizado como fonte de luz. A outra extremidade da fibra foi conectada a um analisador de espectros óticos (OSA), operando com resolução de 0,1 nm, estabilidade de comprimento de onda de $\pm 5\text{ pm}$, utilizado para medir o comprimento de onda do vale de atenuação da LPG. Os dados coletados são enviados a um computador, e analisados por um programa em *Labview* que mostra os resultados no monitor na forma de gráfico.

Nos experimentos foram utilizadas amostras de álcool, gasolina, aguarrás, tiner, querosene e diesel, e os resultados são apresentados na Figura 8.

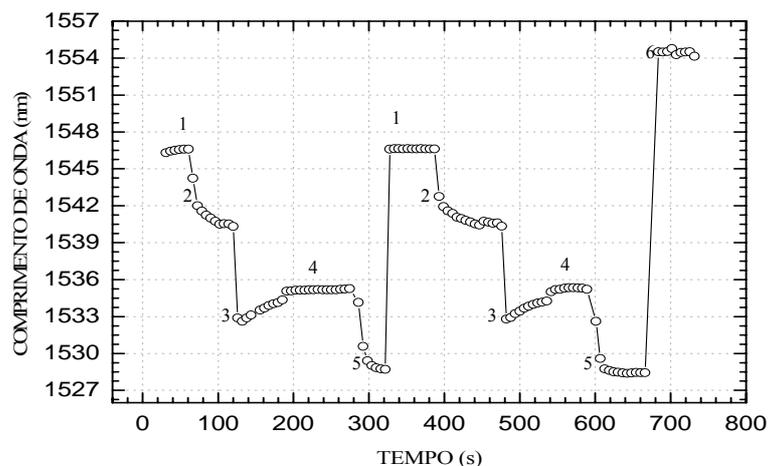


Figura 8: Posição do vale de atenuação da LPG quando inseridas as amostras (1 - álcool, 2 - gasolina, 3 - aguarrás, 4 - tiner, 5 - querosene, 6 - diesel).

O comprimento de onda do vale de atenuação da rede utilizada (1544 nm no ar) desloca-se quando a rede entra em contato com as amostras de hidrocarbonetos, sendo que o comprimento de onda do vale de atenuação observado depende do índice de refração da amostra. A detecção das alterações no comprimento de onda de ressonância ocorrem

no tempo de aproximadamente 3 segundos após a rede ter entrado em contato com o fluido. Esse tempo de resposta do sensor é limitado principalmente pela capacidade de processamento do sistema experimental. Quando se inicia um novo ciclo, os comprimentos de onda do vale de atenuação assumem valores aproximadamente iguais aos anteriores evidenciando a confiabilidade do sensor. A grande sensibilidade da rede a alterações de índice resulta em mudanças no comprimento de onda de atenuação desde 1528,35 nm (para o querosene) até 1554,87 nm (para o diesel). Estes deslocamentos são facilmente detectados pelo sistema experimental, o que mostra a viabilidade da técnica apresentada para a identificação dos hidrocarbonetos no interior do duto.

Variações de temperatura que podem ocorrer durante o monitoramento do fluxo provocam deslocamentos no comprimento de onda do vale de atenuação da LPG que podem ser monitorados e compensados com a utilização de uma Rede de Bragg, como proposto em Kamikawachi *et al.*

Com os valores conhecidos dos índices de refração das substâncias é possível fazer uma calibração prévia do sensor, o que possibilita a identificação do hidrocarboneto que flui no duto em determinado instante.

4. Conclusão

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que o sensor baseado em Redes de Período Longo possui características que tornam o seu uso promissor na identificação de hidrocarbonetos presentes no fluxo em polidutos. A sensibilidade da LPG a variações de temperatura do fluido pode ser compensada com o uso do sensor baseado em Rede de Bragg, que possibilita a medida independente deste parâmetro. A pequena histerese existente na resposta do sensor, que poderia comprometer a correta identificação da temperatura, pode ser eliminada através do tratamento térmico da rede. Esta histerese pode ter como origem a presença de defeitos na sílica decorrentes do processo de fabricação e de hidrogenação (Othonos, 1997). A versatilidade dos sensores a fibra permitem que um único enlace possa conter uma ou mais redes, o que possibilita o monitoramento de um ou mais pontos do sistema de dutos, permitindo ainda que o enlace seja posicionado fora da tubulação e apenas nos pontos de interesse a fibra esteja inserida no duto, facilitando o processo de manutenção. É possível ainda melhorar o desempenho do sensor a partir do desenvolvimento de um sistema de gravação que produza redes com menor largura de banda, possibilitando uma detecção mais precisa da variação do comprimento de onda. Um sistema de sensoriamento à fibra ótica possui a versatilidade de poder ser controlado em tempo real, sem a necessidade de que uma pessoa se desloque até o local de medida.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo - ANP - e da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP - por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT (PRH10-CEFET-PR).

6. Referências

- DOUAY, M., FERTEIN, E., XIE, W. X., BERNAGE, P., NIAY, P., BAYON, J. F., GEORGES, T. Thermal Hysteresis of Bragg Wavelengths of Intra-Core Fiber Gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 5, 1331 – 1334, 1993.
- KAMIKAWACHI, R. C., POSSETTI, G. R. C., MÜLLER, M., FABRIS, J.L. Optical Sensor Based on fiber grating for Hydrocarbon Detection in aquatic Environment. *XXVII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada*. v. 6, 2004.
- KASHYAP, R., Fiber Bragg Grating, San Diego, Academic Press, 1999.
- LIU, H. Y., PENG, G.D., CHU, P.L., Thermal Tuning of Polymer Optical Fiber Bragg Gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 13, 824 – 826, 2001.
- MELTZ, G., MOOREY, W. W., GLENN, W. H. Formation of Bragg gratings in optical fiber by transverse holographic method. *Optical Letters*, v. 14, p. 823-825, 1989.
- OTHONOS A. Fiber Bragg Gratings. Review Sciences Instrument. Vol. 68, pag. 4309-4341, 1997.
- OTHONOS, A., KALLI, K. Fiber Bragg Gratings – Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing, Artech House, 1999.
- PATRICK, H. J., KERSEY, A. D., BUCHOLTZ, M. K., EWING, K. J., JUDKINS, J. B., VENGSARKAR, A.M. Chemical Sensor Based on Long Period Fiber Grating Response to Index of refraction. *OSA Technical Digest Series*, v. 11, 420-421, 1997.
- PATRICK, H. J., WILLIAMS, G. M., KERSEY, A. D., PEDRAZZANI, J. R., VENGSARKAR, A.M. Hybrid Fiber Bragg Grating / Long Period Fiber Grating Sensor for Strain / Temperature Discrimination. *IEEE Photonics Technology Letters*. v. 8, 1223- 1225, 1996.
- REGO, G., OKHOTNIKOV, O., DIANOV, E., SULIMOV, V. High-Temperature Stability of Long-Period Fiber Grating Produced Using an Electric Arc. *J. Lightwave Technol.* V. 19, 1574-1579, 2001.

VENGSAKAR, A. M., LEMAIRE, P. J., JUDKINS, J. B., BHATIA, V., ERDOGAN, T., SIPE, J.E. Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters, *J. Lightwave Technol.* V.14, 58-65, 1996.