

# Sistema com Laser Sintonizável para Caracterização de Dispositivos Óticos

Aleksander S. Paterno, Hypolito J. Kalinowski, José L. Fabris

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná

Av. Sete de Setembro, 3165 — 80230-901 Curitiba, PR

sade@cpgei.cefetpr.br - www.cpgei.cefetpr.br/~loop

Recebido em 27 de Fevereiro, 2004. Versão revisada recebida em 27 de Setembro, 2004

Este trabalho descreve a implementação de um laser sintonizável a fibra dopada com Érbio em anel para caracterizar dispositivos óticos, bem como o circuito eletrônico de controle da sintonia do laser. O circuito da sintonia utiliza uma fonte de tensão gerando um sinal de rampa. O sinal ótico obtido na saída do laser é utilizado para excitar uma rede de Bragg em fibra. O sinal refletido pela rede é processado em um computador para o levantamento de suas características espectrais. Aplicações do sistema como analisador de espectro ótico de dispositivos óticos passivos e a sua utilização como sistema de interrogação de múltiplos sensores óticos a redes de Bragg em fibra são descritas por meio de um exemplo, em que se mediu remotamente a temperatura no interior de uma viga de concreto a qual foi submetida a aquecimento e vibrações.

This paper describes the implementation of an interrogation system with a tunable Erbium-doped fiber ring-laser. The laser is used to illuminate optical devices like Bragg gratings, so that it can also be used as an interrogation system to determine the spectral characteristics of optical devices. An intra-cavity Fabry-Perot filter tunes the laser and is driven by a voltage ramp generator. The resulting optical signal is captured by a photodetector and analyzed in a computer, that can be used as an optical spectrum analyzer for passive components and as an interrogation system for multiple fiber Bragg grating based sensors. As an application example, the temperature inside a concrete beam, which was under systematic heating and vibrations, has been measured remotely with the system.

## 1 Introdução

As redes de Bragg em fibra (FBG) atuam como transdutores quando iluminadas, refletindo parte da luz incidente. Como a resposta da FBG depende de seus parâmetros construtivos, uma perturbação mecânica ou térmica pode alterar as características espectrais do sinal. Normalmente a fonte ótica usada para iluminação da FBG tem banda larga de baixa potência abrangendo a região do espectro de operação dessa rede, no caso, a banda C das comunicações óticas.

As FBG refletem uma banda estreita da luz incidente, por meio de espalhamento coerente sucessivo devido às variações de índice de refração em seu núcleo[1]. O comprimento de onda central da banda de reflexão, que é aproximadamente o comprimento de onda de Bragg, a largura de banda e a porcentagem da luz refletida são alguns parâmetros que caracterizam a FBG. O comprimento de onda de Bragg é um dos parâmetros de maior interesse quando se utiliza a FBG como sensor.

Uma maneira de se demodular o comprimento de onda de uma FBG e perceber suas alterações é a utilização de um sistema cuja luz possa ter um comprimento de onda que percorra toda a faixa em que o sensor vai operar, por meio de filtros óticos ou fontes de luz sintonizáveis com largura

de banda relativamente menor do que a largura de banda do sensor.

Várias abordagens utilizando filtros foram desenvolvidas com filtros Fabry-Perot, filtros acusto-óticos (AOTF) e redes de Bragg sintonizáveis [2]. Com isso, o que se obtém é a convolução da função de transferência do filtro com o espectro da FBG. Assim, a resolução do sistema depende das larguras de banda do filtro e do sensor, bem como da SNR do sinal refletido.

A energia refletida por uma FBG,  $E_R$ , em um período de varredura é[2]:

$$E_R = \frac{RI\Delta\lambda_{BGS}}{f} \quad (1)$$

onde  $R$  é a refletividade da rede,  $I$  é a intensidade da fonte,  $\Delta\lambda_{BGS}$  é a largura de banda da rede e  $f$  é a taxa de repetição da varredura. Com um filtro sintonizável, a energia disponível para detecção,  $E_D$ , é:

$$E_D = \frac{E_R\Delta\lambda_f}{\lambda_i} \quad (2)$$

para  $\Delta\lambda_f$  a largura de banda do filtro e  $\lambda_i$  a amplitude do intervalo de varredura em comprimento de onda. Se  $\Delta\lambda_f \approx 1\%\lambda_i$ , a energia disponível para detecção por varredura para

uma reflectividade  $R = 100\%$  será somente  $1\%E_R$ . Isso significa que para se ter boa resolução, caso não se disponha de redes de alta refletividade, fontes com alta densidade espectral (lasers) são preferíveis a fontes tradicionais de banda larga.

Este texto descreve a construção de um sistema usando um laser sintonizável com o objetivo de interrogar e eventualmente monitorar dinamicamente a resposta de componentes óticos passivos, isto é, trata da utilização de um laser sintonizável em anel a fibra dopada com Érbio com a finalidade de caracterizar dinâmica e estaticamente dispositivos como as redes de Bragg em fibra.

## 2 O sistema de interrogação

Nesta seção são descritos os elementos componentes do sistema de interrogação de redes de Bragg em fibra, iniciando por seu dispositivo fundamental, a saber, um laser sintonizável em fibra dopada com Érbio sob configuração em anel; o circuito ótico para utilização do sinal do laser que excitará as FBG, bem como o circuito eletrônico de controle do filtro Fabry-Perot do laser, que controlará o comprimento de onda do sinal do laser, são descritos logo a seguir. Fechando a seção, os princípios de operação e funcionamento do sistema de interrogação completo são apresentados.

### 2.1 O laser sintonizável

O laser a fibra dopada com Érbio em anel sintonizável (ED-FRL) tem as seguintes características construtivas: um segmento de fibra dopada com Érbio (EDF) de 17 m de comprimento com uma concentração de Érbio de 280 ppm e um comprimento de onda de corte menor que 1480 nm permitindo apenas o modo fundamental  $LP_{01}$  em 1480 nm. Com as emendas feitas com fibra monomodo padrão, o comprimento efetivo total da cavidade pode ser estimado em 22 m. O feixe se propaga no sentido horário devido ao isolador em sua cavidade. O isolador ótico está integrado ao módulo híbrido de amplificação a fibra (IFAM), que além do isolador contém um multiplexador em comprimento de onda (WDM) para separar o sinal de bombeamento do sinal do laser e um fotodiodo para monitorar a potência do sinal. A utilização do IFAM permitiu a redução do número de componentes discretos no sistema.

Dentro do anel 20% da luz do laser é utilizada na realimentação. A potência máxima utilizada no bombeamento em 1480 nm para produção de uma onda contínua é de aproximadamente 75 mW. A configuração da montagem pode ser vista na fig. 1[3]. A faixa de transmissão escolhida do filtro Fabry-Perot (FFP) foi a correspondente às tensões aplicadas nos terminais do piezoelétrico do FFP entre 3,35 V e 8,75 V, que correspondiam na temperatura ambiente 24 °C aos pontos onde a potência do laser atingia o valor -20 dBm, e entre os quais a largura de banda mantinha-se constante com aproximadamente 67 pm; a sintonia no FFP permite que o sinal do laser percorra uma faixa espectral de aproximadamente 40 nm, indo de 1525 a 1565 nm, como se percebe na fig. 2. Fora desse intervalo, a largura de banda do laser aumenta e a potência cai, incorrendo em deterioração

da resolução para a aplicação requerida e necessidade de maior sensibilidade do circuito fotodetector.

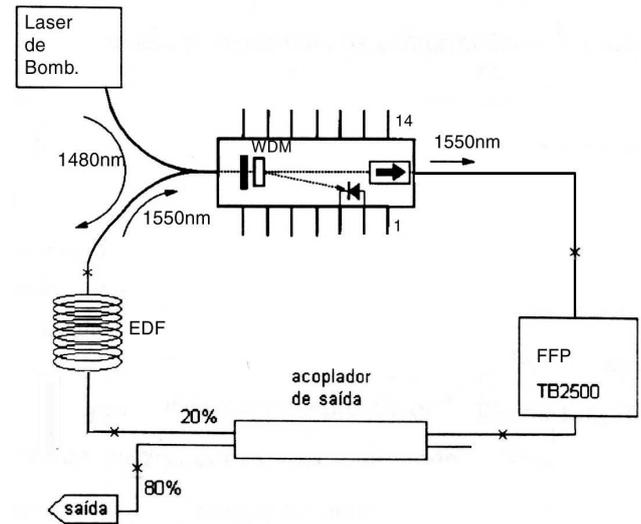


Figura 1. Configuração do laser em anel.

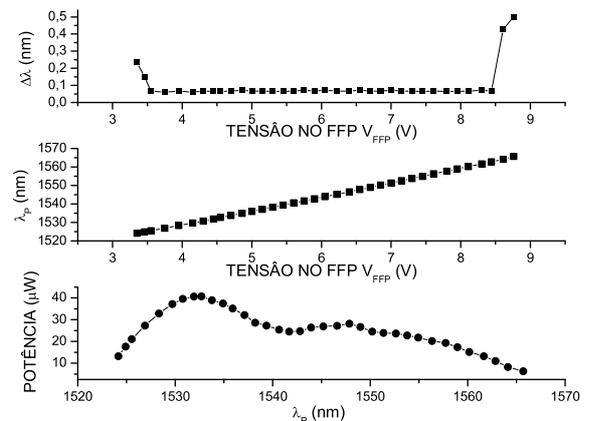


Figura 2. Gráficos ilustrando: largura de banda vs. tensão no FFP (topo); comprimento de onda vs. tensão no FFP (centro); potência de saída do laser vs. comprimento de onda central (baixo).

O laser descrito foi modificado a partir do laser construído no Laboratório de Ótica e Opto-eletrônica do CEFET-PR, o qual estava sob uma configuração que permitia o estreitamento espectral do sinal de saída por meio de dois filtros sintonizáveis instalados na cavidade formada pelo anel do circuito ótico[7]. Um dos filtros, de ajuste mecânico manual, impedia a automatização da sintonia do laser. Para evitar esse inconveniente, deixou-se apenas o filtro Fabry-Perot sintonizável eletricamente no circuito ótico e substituíram-se o acoplador WDM e o isolador ótico discretos pelo módulo IFAM contendo esses componentes, como se observa na fig. 1. Essas alterações, apesar de reduzirem o

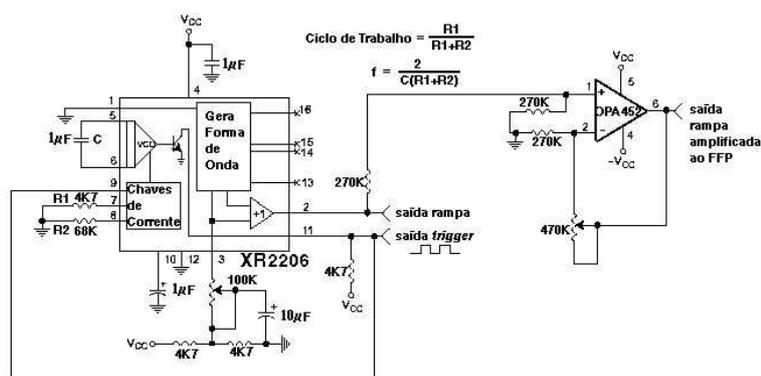


Figura 3. Esquemático do circuito gerador de rampa para o FFP.

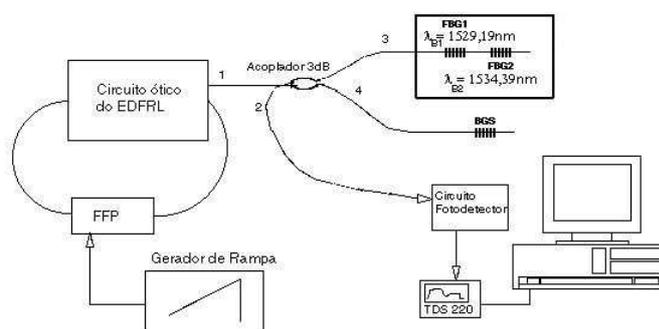


Figura 4. Representação da primeira montagem do experimento usando o laser para interrogação de BGS. Os sensores no retângulo em negrito estão sobre um termo-elemento para estabilização da temperatura.

número de emendas no anel, aumentaram as perdas e conseqüentemente a potência de limiar do laser, diminuindo também a potência de saída. Outra conseqüência da modificação foi o aumento da largura de banda do sinal, já que um dos filtros que a estreitava foi retirado[3].

## 2.2 O circuito de sintonia do FFP

A circuitaria eletrônica utilizada junto ao laser sintonizável consiste numa fonte de tensão controlável que gera um sinal triangular de tensão estável com frequência de até 25 Hz e amplitude suficiente para fazer com que, ao ser aplicada ao FFP, a tensão de varredura sintonize o filtro Fabry-Perot em algum comprimento de onda dentro de seu possível intervalo de funcionamento.

É importante observar que o tempo de sintonia do FFP pode estar limitado pelo tempo de desexcitação do Érbio no laser[4], cujo nível  $^4I_{13/2}$  tem meia-vida de fluorescência da ordem de 10 ms. Verificou-se experimentalmente não haver deformações no sinal adquirido no fotodetector caso a frequência se limitasse a 25 Hz.

### 2.2.1 Esquemático

O gerador de rampa é fundamentado em um gerador de funções de alta qualidade (XR2206/Exar) seguido por um circuito com amplificador operacional de alta tensão específico para cargas piezoelétricas (OPA452/Burr-Brown), como mostrado na fig. 3. No XR2206 estabeleceu-se a frequência da rampa e o valor médio do sinal. No circuito não-inversor do amplificador de tensão com o OPA452, controla-se a amplitude pico a pico do sinal de controle do piezoelétrico do filtro.

### 2.3 Funcionamento do sistema

A configuração do sistema de interrogação está representada na fig. 4. O feixe do laser saindo pela porta 1 é dividido em dois pelo acoplador de 3 dB e ilumina igualmente as redes de referência FBG1 e FBG2 e o sensor em rede de Bragg a ser interrogado(BGS). O sinal refletido pelas três redes de Bragg é recombinado na porta 2 e coletado por um fotodetector. O sinal convertido é adquirido por um osciloscópio digital, que transferirá os dados para um computador pessoal pela interface RS232. FBG1 e FBG2 são mantidas em uma temperatura constante por um termo-elemento sobre o qual estão instaladas, servindo de referência no espectro. O BGS que se quer avaliar tem comprimento de

onda de Bragg nominal 1539 nm. Os comprimentos de onda de Bragg nominais de FBG1 e FBG2 são respectivamente 1529,19 nm e 1534,39 nm e foram medidos à temperatura ambiente. A refletividade de todas as FBG utilizadas no experimento foi sempre maior do que 90%. Todas as FBG foram gravadas no Núcleo de Dispositivos Foto-refrativos do CEFET-PR[8], com um interferômetro com máscara de fase iluminado por um laser Nd:YAG com dois estágios para dobra de frequência, emitindo radiação UV em 266 nm[9].

A resposta obtida no osciloscópio e coletada pelo computador via RS232 mostra apenas um sinal proporcional à potência do laser em função do instante em que o FFP foi sintonizado. Para converter a escala de tempo para a de comprimento de onda, precisam-se de duas referências fixas e estáveis dentro do espectro e visíveis nos dados adquiridos no osciloscópio, no caso, FBG1 e FBG2, cujas características são conhecidas previamente por calibração. A utilização das FBG de referência lidas a cada varredura torna dispensável a estabilização térmica de elementos do sistema que são muito sensíveis à variação de temperatura, como a bobina de EDF e o FFP, pois a variação de ganho e sintonia no laser não afetam a posição dos picos de reflexão das redes de referência.

Com isso, pode-se relacionar a escala de tempo a uma escala em comprimento de onda, já que há uma relação linear entre as duas, garantida pela linearidade da resposta do FFP em função da tensão (com o FFP em temperatura constante) e da linearidade da tensão rampa aplicada ao FFP. Associando-se  $\lambda_{B1}$  e  $\lambda_{B2}$  aos instantes de tempo  $t_1$  e  $t_2$  em que os picos de reflexão são adquiridos no osciloscópio, obtém-se a reta que converte a escala de tempo  $t$  em comprimento de onda

$$\lambda = (t - t_2) \left( \frac{\lambda_{B2} - \lambda_{B1}}{t_2 - t_1} \right) + \lambda_{B2} \quad (3)$$

onde  $t_1$  e  $t_2$  são os instantes em que ocorrem os picos de tensão lidos no osciloscópio e que ficam registrados nos arquivos de leitura fornecidos pelo osciloscópio ao computador a cada varredura do circuito do FFP. Esse processo é executado para cada novo espectro adquirido e é repetido na frequência de varredura do circuito que controla o FFP, ou seja, 25 Hz. Tal frequência determina qual a máxima velocidade de variação do comprimento de onda de Bragg do sensor BGS possível de ser detectada. A fig. 5 mostra um espectro obtido para uma varredura da tensão de controle do FFP, com o eixo do tempo já convertido para comprimento de onda, por meio do conhecimento prévio dos dois primeiros picos associados aos comprimentos de onda de referência.

### 3 Aplicação em sensoriamento remoto

Para demonstrar o funcionamento do sistema na interrogação remota de sensores a FBG, montou-se um experimento para verificar a temperatura no interior de uma viga de concreto que seria aquecida intermitentemente durante um período de 75 minutos.

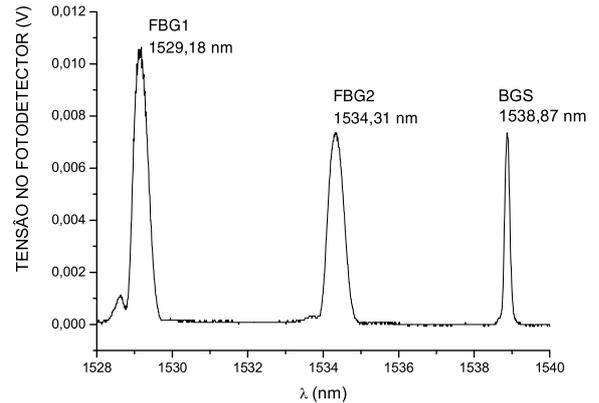


Figura 5. Espectro obtido com três redes de Bragg na medição através do sistema com laser: FBG1 e FBG2 estão à temperatura de 20,2 °C e servem de referência para o BGS.

Utilizou-se uma viga de concreto dentro da qual dois sensores independentes, compostos por FBG, foram inseridos, estando cada um envolvido em dois cilindros concêntricos de aço que os protegeriam de deformações mecânicas provenientes dos processos de fabricação, curagem e vibração da viga em que estavam imersos.

Um dos sensores é utilizado como referência e a luz que ele reflete é analisada em um analisador de espectros óticos, o qual faz parte de outro sistema de interrogação independente. O outro sensor instalado no interior da viga (BGS) é utilizado com o sistema do laser.

O experimento com a viga foi realizado no piso térreo do CEFET-PR, em um laboratório do Departamento de Construção Civil. Todo o sistema de aquisição e o laser estavam localizados três andares acima, no Laboratório de Ótica e Optoeletrônica.

A configuração do sistema pode ser vista na fig. 6. O BGS foi conectado ao laser, por um cabo ótico de 50 m de comprimento, ou seja, a distância entre a porta 4 do acoplador e a viga onde estava instalado o BGS era de pouco mais que 50 m.

Experimentalmente a reta de calibração do BGS instalado foi determinada por meio de um analisador de espectros óticos (OSA) em uma etapa anterior, obtendo-se

$$\lambda_{BGS} = 1543,73 + 0,00997T \quad (4)$$

onde  $\lambda_{BGS}$  é o comprimento de onda de Bragg do sensor em nanometro e  $T$  é a temperatura em graus Celsius. As redes de referência, neste caso, têm comprimentos de onda de Bragg constantes com  $\lambda_{B1} = 1529,12$  nm para FBG1 e  $\lambda_{B2} = 1534,28$  nm para FBG2. A temperatura do laboratório era estável, por isso não se utilizou termo-elemento nas redes de referência.

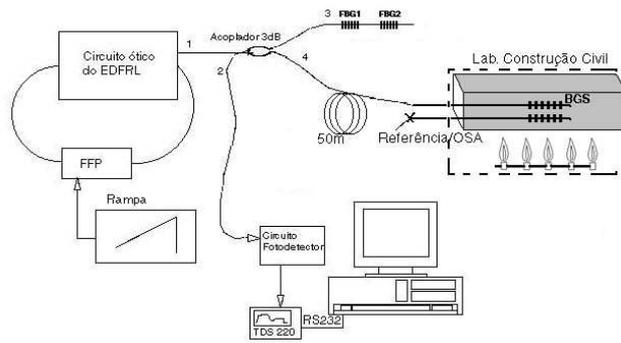


Figura 6. Representação esquemática do sistema para medidas de temperatura no interior da viga de concreto. A viga e o sistema de aquecimento estão no Laboratório de Construção Civil.

## 4 Resultados

A fig. 7 mostra o gráfico de quatro dos espectros obtidos onde se nota o deslocamento do pico de maior comprimento de onda, que corresponde ao sensor sendo monitorado (BGS), desde a primeira medida sem perturbação de temperatura, até a última aquisição na temperatura máxima, após 75 minutos de aquecimento da viga. medida que a temperatura na viga aumentava, fizeram-se aquisições a cada 3 minutos aproximadamente. Cada espectro correspondia a uma média de 128 espectros equivalendo a aproximadamente 5 s de varreduras. Para cada uma dessas médias, obteve-se o comprimento de onda de Bragg do BGS  $\lambda_{BGS}$ .

Utilizando-se dos valores de  $\lambda_{BGS}$  e da equação (4), obtiveram-se valores de temperatura, que são comparados com os valores obtidos com o sistema de referência, o qual utiliza o analisador de espectros óticos. O gráfico dos resultados pode ser visto na fig. 9.

Com a aquisição de 2500 pontos para cada espectro obtido com o osciloscópio, a resolução fica:  $40 \text{ nm}/2500 = 16 \text{ pm}$ , necessitando de 5 pontos para resolver uma largura de banda de reflexão da FBG de  $0,08 \text{ nm}$ . A incerteza estimada foi  $0,125 \text{ nm}$ .

Com o sensor instalado no analisador de espectros, obteve-se uma série de temperaturas que variaram de  $19,8^\circ\text{C}$  com a viga em temperatura ambiente até  $304,4^\circ\text{C}$  após 70 minutos de aquecimento ( $2,26 \text{ nm}$  de variação espectral correspondendo a uma variação em temperatura de  $284,6^\circ\text{C}$ )<sup>1</sup>. Com o laser, iniciou-se medindo  $35,4^\circ\text{C}$  e após os 70 minutos obteve-se  $226,6^\circ\text{C}$  (variação espectral de  $1,91 \text{ nm}$  correspondendo a  $\Delta T = 191,2^\circ\text{C}$ ), como se pode observar na fig. 9.

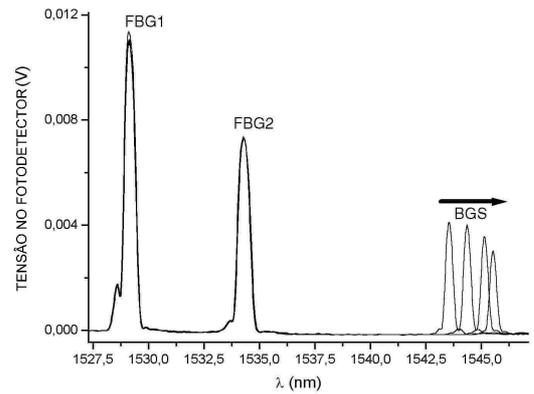


Figura 7. Evolução do espectro de reflexão do BGS com o aumento da temperatura na viga.

Ao se demonstrar a relação de linearidade entre temperatura e comprimento de onda de Bragg está-se determinando a linearidade da resposta do sistema, eliminando assim a possibilidade de o sistema de interrogação ser o responsável por qualquer não linearidade que acarrete uma discrepância além do erro sistemático durante a obtenção dos dados. Para demonstrar tal linearidade, pode-se observar o gráfico da fig. 8 comparando o comportamento das leituras de temperatura para um sensor em FBG submetido a uma variação de temperatura medida com o OSA e com o laser. O comprimento de onda de reflexão nominal do sensor é  $\lambda_{BGS} = 1529,12 \text{ nm}$  e sua temperatura foi alterada acoplando-o a um termo-elemento PELTIER, que variou sua temperatura em  $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ . Utilizaram-se redes de referência em  $\lambda_{B1} = 1534,28 \text{ nm}$  e  $\lambda_{B2} = 1539 \text{ nm}$ .

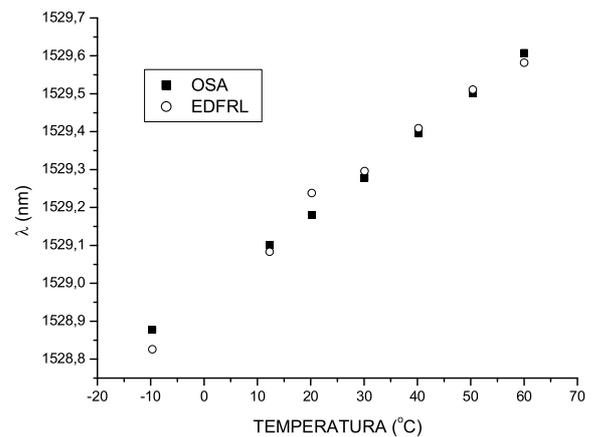


Figura 8. Leituras de temperatura utilizando o analisador de espectros óticos (OSA) e o sistema com o laser (EDFRL) para obtenção da reta de calibração da rede de referência em  $1529,12 \text{ nm}$  e ilustrando a linearidade do sistema.

<sup>1</sup>Tomaremos aqui o ponto de medição em 70 minutos como referência, a fim de se compararem os valores medidos pelos dois sistemas.

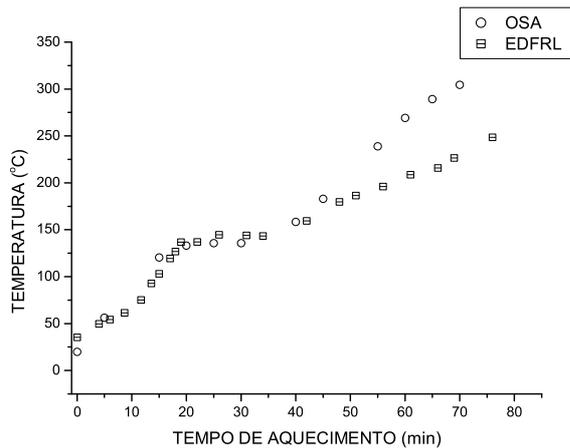


Figura 9. Comparação entre as medidas de temperatura feitas com o sistema de referência utilizando o analisador de espectros óticos (OSA) e o sistema com o laser (EDFRL).

## 5 Discussão

Na fig. 7 observa-se que as redes de referência FBG1 e FBG2 em  $\lambda_{B1} = 1529,12 \text{ nm}$  e  $\lambda_{B2} = 1534,28 \text{ nm}$ , mantiveram-se estáveis durante o experimento. A variação da amplitude do sinal refletido pelas FBG se deve à não uniformidade do espectro de ganho do laser e à uma pequena e reversível queda na refletividade das FBG com o aumento de temperatura.

Durante os primeiros 45 minutos de aquecimento, como se vê na fig. 9, a temperatura medida pelo sistema com o laser acompanha a medida direta da temperatura feita pelo sensor acoplado ao analisador de espectros óticos, donde pode-se concluir que até essa região os sistemas estão com uma fidedignidade relativamente boa. Além disso, para explicar por que ambos os sistemas não medem exatamente a mesma temperatura nessa região nos primeiros 45 minutos, deve-se considerar as condições em que ficaram os sensores após os 28 dias de secagem do concreto da viga. É provável que tenham se distanciado um do outro após a concretagem. Além desse distanciamento, deve-se levar em conta a não homogeneidade do concreto, que após a secagem pode de alguma maneira estar tracionando o sensor independente, já que redes de Bragg em fibra mostram uma razoável sensibilidade à perturbação mecânica[5]. Essa propriedade leva a crer que um tracionamento do sensor, causado internamente pela viga ou por manipulação dos cabos, possa aumentar os valores de deslocamento do comprimento de onda do sensor, distanciando as medidas obtidas com os dois sistemas. Ambas as curvas também mostram uma região plana no aquecimento, decorrente da falta de pressão nos bocais que esquentavam a viga, levando a uma situação de equilíbrio térmico. Para voltar ao aumento de temperatura, abriram-se as válvulas para liberação de mais gás. Nessa região

dos primeiros 45 minutos, as medidas com o laser foram em média  $12,8^\circ\text{C}$  maiores do que com o OSA, com desvio padrão de  $18,2^\circ\text{C}$ .

A partir do ponto em 45 minutos, percebe-se uma divergência entre as medidas dos dois sistemas. Neste caso, a diferença entre as curvas obtidas com o sistema de interrogação com o OSA e o sistema com o laser, pode também residir no fato de que o aquecimento do concreto a partir desse ponto tornou-se ainda mais heterogêneo, provocando gradientes de temperatura maiores entre os sensores, pois a possível presença de rachaduras devido ao aumento de temperatura e vibrações<sup>2</sup> pode ter originado pequenas regiões preenchidas por ar, aumentando o gradiente térmico. Nessa região a partir dos 45 minutos, as medidas diretas com o OSA foram em média  $50,7^\circ\text{C}$  maiores do que com o laser, com um desvio de  $32^\circ\text{C}$ .

Um estudo detalhado dos efeitos estruturais na viga de concreto submetida a vibrações e variações de temperatura monitoradas com sensores óticos será publicado em outro artigo[10].

Quanto à performance do sistema, a evolução do espectro de reflexão dos sensores pode ser obtida de maneira praticamente instantânea, dado que sua limitação está no sistema eletrônico de aquisição, permitindo desempenho equivalente neste ponto aos analisadores de espectros óticos de redes de difração e.g., MS9710B-Anritsu, em que a varredura em comprimento de onda é feita normalmente numa taxa de  $1 \text{ nm/ms}$ , a mesma do sistema desenvolvido com o laser, pois o intervalo de sintonia do laser de  $40 \text{ nm}$  pode ser percorrido em aproximadamente  $1/25 \text{ s}$ . No quesito resolução, o sistema se mostra melhor do que um sistema que opera com base em uma fonte de banda larga seguida de um FFP sintonizável, estando aí as vantagens de se utilizar um laser sintonizável quando se compara sua densidade espectral de potência com a de uma ASE [5]. Se comparado ao MS9710B/Anritsu, a incerteza de  $0,12 \text{ nm}$  poderá ser diminuída se se estreitar a largura de banda do laser, aumentar a qualidade e a velocidade de aquisição dos dados, bem como aumentar o intervalo de sintonia do laser e sua potência.

## 6 Conclusão

O sistema desenvolvido permite a execução de várias funções de um analisador de espectro ótico, tais como a análise da forma de onda da resposta espectral de dispositivos como as redes de Bragg operando na banda C. O sistema foi utilizado para interrogação de sensores distribuídos a redes de Bragg com testes em laboratório e em campo. Outras aplicações do sistema podem ser exploradas em sistemas de sensoriamento a fibra ótica, particularmente em sistemas de demodulação de comprimento de onda em FBG multi-canais, que necessitam de mais potência ótica para seu funcionamento, podendo assim dividir o custo do laser por canal [6]. Deve-se ainda ressaltar que, apesar de a potência

<sup>2</sup>A viga estava simultaneamente sendo usada em um experimento destrutivo que pretendia determinar sua frequência de ressonância ao se aumentar a temperatura, e para isso induziram-se fortes vibrações na viga.

do laser ser relativamente baixa, sua alta densidade espectral permite registrar espectros de rede com baixas refletividades, que não são observadas usando um LED de alta potência (1 mW) seguido de um FFP de varredura.

## 7 Agradecimentos

À Agência Nacional do Petróleo (ANP) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo apoio financeiro por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás (PRH-ANP/MCT - PRH10 - CEFET-PR); ao CAPES, CNPq e LITS/TECPAR pelo apoio ao laboratório. Os autores agradecem ainda à Dra. Elisabeth Penner (DACOC/CEFET-PR) e J. C. C. da Silva, C. Martelli e R. Falate pelo apoio experimental.

## References

- [1] Kashyap, R. "Fiber Bragg Gratings", Londres, Reino Unido, Academic Press, 1999.
- [2] Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M., Koo, K. P., Askins, C. G., Putnam, M. A., Friebele, E. J., "Fiber Grating Sensors", *Journal of Lightwave Technology*, **15**, 1442-1463(1997).
- [3] Paterno, A. S., "Laser sintonizável para caracterização de dispositivos óticos", Curitiba, CEFET-PR, 2003, Dissertação de Mestrado.
- [4] Chieng, Y. T., Cowle, G. J., Minasian, R. A., "Optimization of Wavelength Tuning of Erbium-Doped Fiber Ring Lasers", *Journal of Lightwave Technology*, **14**, 1730-1738(1996).
- [5] Othonos, A., Kalli, K., "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing", Boston, EUA, Artech House, 1999.
- [6] Coroy, T., Chappell, L. M., Guillermo, N. J., Huang, S. Y., Measures, R. M., "Peak Detection Demodulation of a Bragg Fiber Optic Sensor using a Gain-Coupled Distributed Feedback Tunable Laser", *12th International Conference on Optical Fiber Sensors*, **16**, 210-212(1997).
- [7] Pontes, M. J., dos Santos, M. J. D., Abe, I., Kalinowski, H. J., Giraldi, M. T. M. R., "Analysis of Longitudinal Mode Suppression in a Fiber Ring Laser containing Two Optical Filters", *Fiber and Integrated Optics*, **19**, 57-65(2000).
- [8] da Silva, J. C. C., Abe, I., Chaves, R. C., Fabris, J. L., Pinto, J. L., Kalinowski, H. J., Barbosa, C. L., "Development of Bragg grating sensors at CEFET-PR", *Optics and Lasers in Engineering*, **39**, 511-523(2003).
- [9] da Silva, J. C. C., Falate, R., Nogueira, R. N., Kalinowski, H. J., Fabris, J. L., Pinto, J. L., "Production of Fiber Bragg Gratings in Phase Mask Interferometers", *Proc. 4th. Conference on Telecommunications*, 449-451, Aveiro, Portugal, 2003.
- [10] da Silva, J. C. C. et ali, "Dynamic Analysis of Structures using Fibre Bragg Gratings", *Journal of Sound and Vibration*, submetido, (2004).