

III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

Termômetro de Alta Temperatura (0-400 °C) baseado em Redes de Bragg em Fibra Ótica para Aplicação no Setor de Petróleo

Jean Carlos Cardozo da Silva ^a, Cicero Martelli ^a, Bárbara Winiarski Diesel ^a, José Luís Fabris ^a, Hypolito José Kalinowski ^a, Nathaniel Goothoff ^b e John Canning ^b.

^a Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná
Laboratório de Inovação em Tecnologia de Sensores
80230-901, Curitiba, Brasil.
e-mail: hjkalin@cpgei.cefetpr.br

^b Optical Fibre Technology Centre, University of Sydney
206 National Innovation Centre, Australian Technology Park
Eveleigh, Sydney NSW 1430, Australia.
e-mail: j.canning@oftc.usyd.edu.au

GRUPO: A B C D E

TEMA: Tendências em Sensores e Atuadores

PALAVRAS CHAVE: Redes de Bragg, sensor de Temperatura, coluna de craqueamento.

RESUMO – Descreve-se a utilização de redes de Bragg em fibra ótica, estáveis na faixa de 200 – 400 °C, como transdutores para termômetro aplicável em colunas de craqueamento.

ABSTRACT – We describe the use of fiber Bragg gratings, stable at high temperatures (200 – 400 °C), as transducers for temperature measurements. A thermometer using such gratings, aimed to hydrocarbon distillation columns, is developed.

INTRODUÇÃO

Sensores de fibra ótica são excelentes soluções para aplicações onde ocorrem restrições ao uso de sensores convencionais, como em presença de substâncias inflamáveis ou explosivas. Tais sensores apresentam ainda características de desempenho ou custo/benefício competitivos com outras técnicas utilizadas. Baixos volume e massa, imunidade eletromagnética, baixa reatividade química à ampla gama de agentes são vantagens dos sensores de fibra ótica, além de poderem ser utilizados em enlaces localizados a grandes distâncias devido à baixa atenuação dos sinais óticos transmitidos pela fibra.

As redes de Bragg em fibra ótica (FOBG) constituem-se em modulação periódica no índice de refração da fibra, ao longo da direção longitudinal [1], [2]. A existência dessa modulação provoca a reflexão seletiva de uma banda estreita de luz, centrada no comprimento de onda de Bragg, λ_B , da rede:

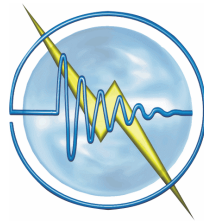
$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

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.

O comprimento de onda de Bragg sofre mudança quando a rede é submetida à ação de agentes externos tais como deformação longitudinal ou temperatura. Devido aos efeitos foto-elástico e termo-ótico, o índice de refração da sílica muda com aqueles agentes, resultando em deslocamento do comprimento de onda de Bragg, que pode ser então usado como parâmetro transdutor. É de particular interesse para a área de sensores o uso das redes de Bragg para medir aqueles parâmetros físicos (outras grandezas podem influenciar o comprimento de onda de Bragg, embora de maneira não tão direta). 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 13.7 pm/ $^\circ\text{C}$ [1].



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

Do ponto de vista da instrumentação, uma vantagem no uso de FOBG como transdutores é o fato de que a informação a respeito do agente atuando sobre a rede está codificada espectralmente [3], [4]. 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 grande número de transdutores, permitindo a realização de sensores multi-pontuais ou quase distribuídos. A multiplexação permite monitorar estruturas com grandes dimensões como, por exemplo, cabos de transmissão de energia elétrica, barragens, oleodutos, etc.

TERMÔMETRO COM REDES DE BRAGG

O uso de FOBG para medida da temperatura requer, basicamente, a iluminação da rede com fonte ótica de largura espectral suficiente para cobrir toda a faixa esperada de deslocamento (uns poucos nanômetros para temperaturas na faixa de centenas de graus), e sistema para demodular a informação contida no espectro refletido pela rede. Esse sistema pode ser montado em várias configurações, sendo a mais simples dela o uso de uma segunda rede, medindo-se a potência no espectro de correlação entre as duas FOBG. Introdução ao uso de sistemas com FOBG pode ser encontrado no capítulo 7 da referência [1].

Sistema para demodular a informação espectral de uma rede de Bragg, utilizando o esquema acima descrito, que fornece sinal elétrico proporcional à temperatura, foi implementado conforme o esquema de circuitos ótico e eletrônico apresentados na Fig. 1.

O módulo do circuito emissor contém fonte de corrente modulada por onda senoidal de 2 kHz. O sinal resultante é aplicado a um LED com comprimento de onda centrado em 1540 nm e com largura de faixa espectral de 60 nm. O objetivo desse módulo é enviar o sinal ótico de banda larga para iluminar a rede sensora.

A rede de referência é montada sobre termo elemento Peltier. A banda espectral refletida pela rede sensora (cuja posição depende da temperatura a ser medida) incide sobre a rede de referência e é por sua vez refletida para o fotodetector do circuito receptor do sensor. A potência total incidente sobre o detector do sistema sensor vai depender da posição espectral relativa entre as bandas das duas redes, sendo que o sinal máximo indica quando ambas estão superpostas (centradas no mesmo comprimento de onda de Bragg). Assim, um sistema

automático de controle de ganho, atuando sobre a corrente de controle do termo elemento na rede de referência, fornece sinal proporcional ao comprimento de onda de Bragg da rede sensora, i.e., à temperatura [1].

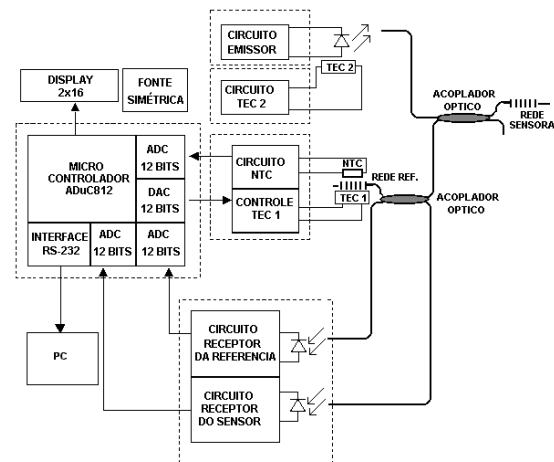
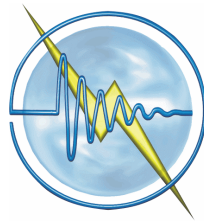


Fig. 1. Esquema para demodulação de sensores de temperatura utilizando redes de Bragg.

Os circuitos receptores de sinais óticos têm por objetivo melhorar a qualidade do sinal antes de enviá-lo ao microprocessador. O circuito de referência recebe o sinal ótico refletido pela rede sensora. O circuito sensor recebe o sinal ótico depois de duas reflexões. A primeira reflexão ocorre na rede sensora enquanto que a rede de referência provoca a segunda reflexão, que se encontra em temperatura conhecida devido ao sistema de controle atuando sobre o termo elemento. Além de fotodetectors, os circuitos são compostos por amplificadores operacionais que realizam funções de filtragem e amplificação de sinal. Foram utilizados amplificadores OPA602 da BURR-BROWN por apresentarem alto ganho e baixo ruído. Os sinais obtidos através das recepções sensora e de referência permitem com que se trabalhe com a razão entre eles, garantindo que se mudanças espúrias ocorrerem na potência ótica do sinal recebido, elas irão atingir ambos os sinais de forma a manter constante a razão entre eles.

O bloco de controle do termo elemento Peltier (TEC1 - NTC) funciona como interface entre a rede de referência e o módulo micro-controlador, informando a este último a temperatura da rede de referência, através da leitura de um NTC e serve ainda para controlar a temperatura da rede de referência, conforme instruções recebidas do módulo micro-controlador.



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

A refrigeração do emissor ótico é realizada através de um segundo elemento Peltier (TEC2), estabilizado à temperatura de 5 °C, o que faz a eficiência do LED aumentar consideravelmente.

O microprocessador (Analog Devices - ADuC812) utilizado no projeto é responsável por controlar a rede de referência e decidir qual é a temperatura do sensor. Esses dados são mostrados em um display junto ao sensor e enviados pela porta serial para um programa de monitoração no microcomputador.

O esquema acima descrito tem algumas limitações. Uma delas é derivada 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 necessitam de tempos de respostas muito curtos, por exemplo, em reações onde a capacidade térmica envolvida é muito alta. Quanto à segunda, sua solução requer “ampliação” da faixa dinâmica da rede em função da temperatura, o que pode ser implementado de maneira simples, colando a rede sobre substrato com diferente coeficiente de expansão térmica.

A Fig. 2 mostra o resultado do processo de calibração de redes de Bragg, sendo uma delas livre e as demais coladas sobre diferentes substratos, a saber: vidro (laminula de microscópio), alumínio e zinco. Observa-se claramente a modificação na taxa de variação da posição espectral da banda de reflexão da rede em função da temperatura, dependente nesse caso do material onde a rede encontra-se colada.

Esse resultado deriva da expansão térmica do material do substrato, cujo coeficiente é superior àquele do vidro de sílica constituinte da fibra. Dessa forma a rede é, com o aumento da temperatura, submetida a esforço mecânico que provoca o deslocamento espectral do comprimento de onda de Bragg de acordo com a

primeira parcela no lado direito da equação 2. Os coeficientes das retas ajustadas aos pontos experimentais na Fig. 2 são: 8.24 pm°C⁻¹, 10,59 pm°C⁻¹, 36.56 pm°C⁻¹ e 43.63 pm°C⁻¹, respectivamente para a fibra livre, colada sobre o vidro, alumínio ou zinco.

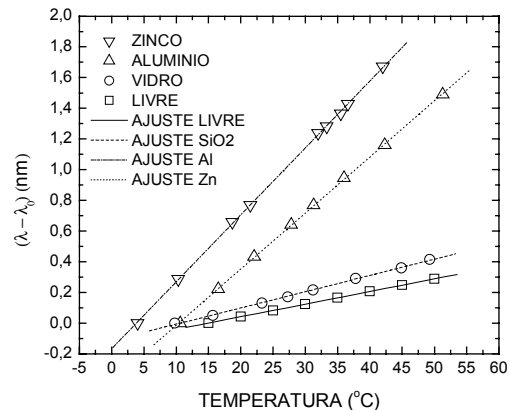
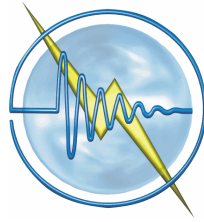


Fig. 2. Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para redes coladas sobre diferentes substratos. Marcas – experimental; linhas – melhor ajuste.

O resultado descrito no parágrafo anterior tem aplicação imediata na construção de 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 °C a 90 °C, sendo utilizada na demodulação de um sensor de rede de Bragg livre. Para atuar em faixas de temperatura diferentes, calcula-se o comprimento de onda de Bragg da rede de referência deslocada em relação à rede do sensor. A tabela 1 resume os dados desse procedimento, para uma rede de referência com o comprimento de onda de Bragg deslocado de 1.3 nm (zinco) ou 1.1 nm (alumínio) em relação àquele da rede sensora. Dentro das faixas indicadas na tabela 1 as redes de Bragg permanecem dentro do limite de elasticidade da fibra ótica, garantindo sua integridade física.



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

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 (°C)	ΔT (°C)
Alumínio	-10...90	20...365
Zinco	-10...90	20...432

ESTABILIDADE DO TRANSDUTOR

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 aos transdutores (redes de Bragg) o problema surge devido ao decaimento térmico da modulação de índice de refração que dá origem ao dispositivo, em temperaturas de aproximadamente 110 °C [4]. A constante de tempo característica para o decaimento de 40 % em sua refletividade é de 10 horas [1]. 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 °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 °C e redes mostrando apenas uma redução a 30% em sua refletividade quando mantidas por até 30 min a 700 °C [5].

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 °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.

CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

As redes sensoras foram produzidas nos laboratórios do OFTC, usando as técnicas descritas na referência [5]. Como características típicas, os resultados descritos neste trabalho usam uma rede com comprimento de Bragg inicial de 1539,89 nm em 20 °C, cuja largura de banda a meia altura (FWHM) era de 0.27 nm,

ambos determinados antes do processo de caracterização.

Para caracterizar a rede sensora foram utilizados um termo elemento Peltier (na faixa de 0 a 100 °C) e um forno QUIMIS, modelo 318M21, com faixa de operação até 1200 °C. A rede sensora e um termopar tipo K foram posicionados no interior do forno. A emissão espontânea amplificada (ASE) de um amplificador ótico de fibra dopada com érbio (EDFA) foi usada como fonte de luz, iluminando o sensor ótico através de um acoplador direcional. Esse acoplador serve para dirigir o sinal de reflexão da rede de Bragg para o equipamento de detecção (analisador de espectros óticos – OSA). A Fig. 3 mostra a curva de calibração para aquela rede em dois diferentes sistemas de aquecimento: termo elemento (Peltier) para baixas temperaturas e o forno para as temperaturas mais elevadas.

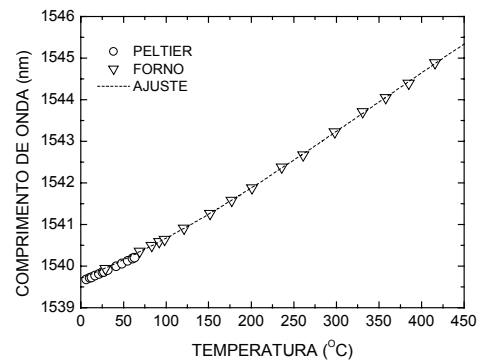
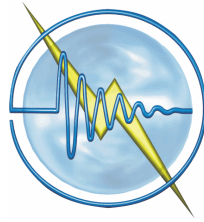


Fig. 3. Variação do Comprimento de onda central versus temperatura, em diferentes sistemas para variação de temperatura: Peltier e Forno.

A Fig. 3 indica a variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura da rede. A curva de resposta da rede para variação de temperatura entre 0 °C e 400 °C é ajustada por um polinômio de terceiro grau, que serve como curva de calibração do transdutor, apresentando a seguinte equação (coeficiente de correlação de 0,99984):

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

Outros ensaios foram realizados para verificar a estabilidade do sensor ótico. Na Fig. 4 é apresentado o comportamento da largura de banda da rede sob a variação de temperatura ao longo do tempo, para um ciclo de aquecimento – resfriamento de 4 horas, seguido por uma determinação adicional após 24 horas.



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

O comprimento de onda de Bragg não apresentou alteração após a realização do ensaio, ou seja, o λ_B antes e após o ensaio foram os mesmos para a mesma temperatura (20 °C).

No tocante à largura espectral da rede, observa-se naquela figura uma ligeira redução nessa largura que, dentro do erro experimental, se estabiliza após a temperatura atingir aproximadamente 350 °C, não sofrendo mudanças posteriores durante a fase de resfriamento. Esse caráter indica ser a causa desse efeito provavelmente decorrente de ativação térmica.

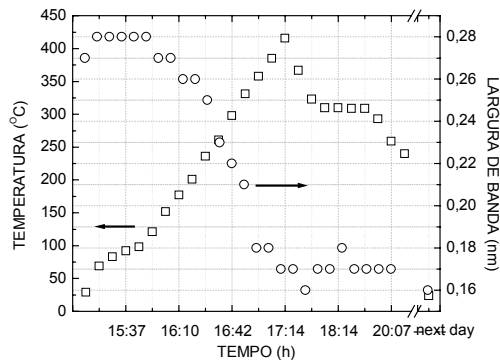


Fig. 4. Variação da largura de banda com a variação da temperatura em relação ao tempo de ensaio.

O comportamento observado na figura 4 pode ser explicado pela não homogeneidade do perfil do feixe do laser de gravação da rede. O feixe que deveria ter uma distribuição Gaussiana, apresenta um perfil ligeiramente assimétrico. Esse fato provoca uma ligeira distorção no perfil de modulação do índice de refração durante a gravação, que deixa de apresentar simetria em relação à posição média. Isso implica em um ligeiro alargamento espectral devido à não homogeneidade do perfil gravado. Durante o processo de aquecimento (lento) da rede, há possibilidade de um ligeiro recozimento em sua estrutura. Esse recozimento favorece a homogeneização do perfil e conduz à redução na largura de linha.

Para aplicação do sensor em colunas de destilação foi desenhado um encapsulamento protótipo (vide Fig. 5) 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 entre duas placas de cobre, que foi escolhido por apresentar alta condutividade térmica.



Fig. 5. Montagem mecânica para encapsulamento do sensor (Paquímetro aberto em 5 cm).

CONCLUSÃO

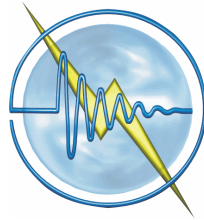
Foram apresentados ensaios com redes, que apresentaram uma excelente resposta para a faixa de temperatura necessárias ao desenvolvimento de sensores para aplicação em colunas de destilação (faixa desejada 250 °C a 350 °C). As curvas de resposta para variação de 0 °C a 400 °C foram ajustadas por polinômio de terceiro grau para calibração do transdutor com coeficiente de correlação de 0,99984.

Devido à baixa capacidade térmica do elemento sensor (10 mm x 125 μm) em sílica, o tempo de resposta é bastante reduzido em relação a termopares do tipo K, encapsulados para uso de fornos de alta temperatura. O uso das redes permite ainda que o sistema de leitura opere de forma remota.

O sistema ótico proposto neste trabalho apresenta vantagens quando comparados a outros sensores de temperatura comerciais, como por exemplo, par bimetálico, termo-acoplador, termistor e sensor piroelétrico.

O par bimetálico tem como característica indesejável a histerese [6], o que leva a flutuações nas medidas de temperatura. No que tange ao sensor de FOBG a resposta à variação de temperatura apresenta histerese desprezível para faixa de 0 °C a 400 °C.

O termo-acoplador tem faixa de operação limitada, pois apresenta característica não linear a partir de determinados valores de temperatura, além disso, o sinal gerado é pequeno (ex.: para variação de 10 °C produz apenas alguns



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

milésimos de Volts), o que significa que é necessário amplificação e tratamento do sinal em quase todas as aplicações [6], limitando a possibilidade de sensoramento remoto.

O termistor é muito utilizado para medidas de baixas temperaturas, 0 °C a 150 °C. Tem como vantagem seu tamanho reduzido, no entanto não apresenta resposta linear. Os sensores a rede de Bragg, além de ter as dimensões da fibra óptica (~125 µm), podem ser utilizados para monitorar temperaturas de até 700 °C [5].

Os sensores piroelétricos apresentam grande sensibilidade ao fluxo de calor, mas seu tempo de resposta está limitado à faixa de operação, isto é, quanto maior a faixa de operação, maior o tempo de resposta [6]. Para o sistema de medição de temperatura com FOBG, o tempo de resposta está limitado pela eletrônica envolvida no tratamento do sinal [1] e pela massa térmica do encapsulamento.

Todos os sensores comerciais citados necessitam que o módulo de detecção do sinal fique nas suas proximidades, em virtude das perdas por transmissão inerente aos sinais elétricos. Já o sistema proposto permite que o módulo de detecção possa ficar até a alguns quilômetros do local da medida.

AGRADECIMENTOS

Esse projeto foi realizado dentro das atividades do Laboratório de Tecnologia de Inovação em Sensores (LITS). Os autores agradecem ainda o apoio financeiro recebido do CNPq, CTPETRO, CAPES e Fundação Araucária.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Othonos and K. Kalli, (1999) Fiber Bragg Gratings – Fundamentals and Applications in telecommunications and Sensing, *Artech House*.
- [2] G. Meltz, W. W. Morey and W. H. Glenn, (1989) Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method, *Optics Letters*, vol. 14, pp. 823-825.
- [3] K. O. Hill and G. Meltz, (1997) Fiber Bragg Gratings Technology: Fundamentals and Overview, *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 1263-1276.
- [4] R. Kashyap, (1999) Fiber Bragg Gratings, *Academic Press*, London.
- [5] J. Canning, K. Sommer e M. Englund, (2001) Fibre gratings for high temperature sensor applications, *Meas. Sci. Technol.* 12, 824-828.
- [6] I. R. Sinclair (1988) Sensors and Transducers – A guide for Technicians, *BSP*.