

# APLICAÇÃO DE TRANSDUTOR À FIBRA ÓTICA PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DE COLETOR SOLAR PLANO

**Mariana Machado** – marimachad@gmail.com

**Philipi Martins** – martins\_philipi@hotmail.com

**Ivo de Lourenço Júnior** – lourenco@utfpr.edu.br

**Jean Carlos Cardozo da Silva** – jeanccs@utfpr.edu.br

**Flavio Lori Grando** – flavio.grando.eng@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE)

**Valmir de Oliveira** – valmir@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI)

**Resumo.** Este trabalho apresenta medidas de temperatura em um coletor solar plano por intermédio de sensores multiplexados ao longo de uma fibra ótica. Foram utilizados 18 sensores de temperatura para monitorar a placa do coletor solar. Estes sensores estavam separados por uma distância de 20,0 cm dispostos em três cordões de fibras ótica com 1,20 m de comprimento. A temperatura da placa do coletor solar também foi medida com uma câmera térmica. As medidas de temperatura em ambos os dispositivos indicaram boa concordância. Os sensores óticos se apresentam como outra possibilidade para o mapeamento térmico e o cálculo da eficiência dos coletores solares.

**Palavras-chave:** Redes de Bragg (FBGs), Medição de Temperatura, Coletor Solar Plano

## 1. INTRODUÇÃO

A radiação solar é essencial para a manutenção da vida em nosso planeta e também uma fonte importante e expressiva de energia. Esta energia pode ser aproveitada por meio de diversas técnicas, como a fotovoltaica, a heliotérmica e a solar térmica. Esta última pode ser obtida por meio de coletores planos ou concentradores solares, os quais consistem em aquecedores de fluidos, estes, mantidos em reservatórios termicamente isolados até seu uso final.

A energia solar térmica tem o seu principal aproveitamento em residências, em que é utilizada principalmente no aquecimento de água. Uma maneira de utilizar a energia solar para o aquecimento da água é por meio de coletores solares planos. Consistem basicamente em uma superfície plana escura que absorve a radiação solar e em uma superfície isolante para reduzir as perdas por condução e são projetados para aplicações nas quais a energia fornecida deve possuir temperaturas moderadas, da ordem de 100°C acima da temperatura ambiente.

Para uma maximização do rendimento dos coletores solares ao longo do dia, é necessário o cálculo de sua eficiência. Um dos parâmetros necessários é a temperatura média do coletor. Porém sua obtenção é difícil, pois está associada com a radiação solar incidente, as condições de entrada do fluido e de parâmetros construtivos.

O mapeamento térmico ajuda no processo de obtenção da temperatura média de um coletor solar, através da utilização de sensores de temperatura.

Os sensores comumente empregados para medição de temperatura são termopares, termistores e detectores de temperatura por resistência (RTDs). Apesar de possuírem aplicações mais específicas, os sensores à fibra ótica começaram a ser difundidos com a finalidade de medição de temperatura, em que são envolvidas grandezas dinâmicas e estáticas. Dentre os sensores óticos, as redes de Bragg em fibra ótica (FBG) são utilizadas em diversas situações em que são necessárias medidas de temperatura.

Como ressaltado, o estudo da eficiência de coletores solares é dificultado pela complexidade da medição correta da temperatura média da placa de absorção. O referido documento apresenta a aplicação de um transdutor à fibra ótica utilizando redes de Bragg, através do qual foi realizado o mapeamento térmico do coletor em muitos pontos ao longo de sua área. Através dessa aplicação, pretende-se avaliar o seu desempenho para que no futuro sejam utilizados em medições de temperatura visando o cálculo da eficiência desse coletor.

## 2. REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA (FBGs)

As fibras óticas são utilizadas como sensores nas mais diversas áreas como a biomédica (Majumder, et al., 2008), e a industrial (Werneck; Allil e Ribeiro, 2012). As vantagens de se utilizar fibra ótica para sensoriamento são muitas, dentre as quais se destacam (Kuo e Zhen'an, 2009), (Gonçalves et al., 2010), (Rao, 1999): imunidade a interferências eletromagnéticas, elemento eletricamente passivo, dielétrico, alta sensibilidade, miniaturização, possibilidade de multiplexagem entre outros. Outro aspecto importante para a escolha dos sensores à fibra ótica é que a fibra pode ser utilizada como elemento sensor e meio de comunicação. Dentre as fibras óticas, as redes de Bragg (FBG) são utilizadas em diversas aplicações em que são necessárias medidas de temperatura.

As Redes de Bragg em Fibra Ótica (Faria, Parentoni e Martinez, 2012) são elementos transdutores originados no núcleo de uma fibra ótica fotossensível quando regiões com diferentes índices de refração estão espaçados periodicamente ao longo de seu comprimento. Operam como um filtro espectral reflexivo que seleciona um determinado comprimento de onda contido em uma banda de comprimentos de onda que foram acoplados à fibra. Denomina-se este comprimento de onda como comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ), sendo determinado (Faria, Parentoni e Martinez, 2012) pela Eq. (1).

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

em que:

$\Lambda$  é a periodicidade espacial de modulação do índice de refração;  
 $n_{eff}$  é o índice de refração efetivo do núcleo.

A Fig. 1 (Quintero, 2006) exemplifica a modulação periódica em uma rede de Bragg em fibra ótica.

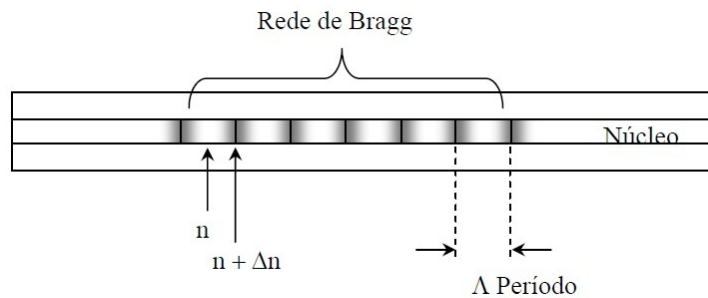


Figura 1 - Ilustração da modulação local do índice de refração do núcleo da fibra ótica que constitui a rede de Bragg.

Muitas FBGs (Werneck; Allil e Ribeiro, 2012) podem ser inscritas em uma mesma fibra ótica em diferentes comprimentos de onda centrais, constituindo-se em uma das grandes vantagens desse tipo de técnica. Contudo deve-se atentar para dois detalhes: assegurar que o espectro de cada comprimento de onda central não sobreponha o do comprimento vizinho e que cada espectro não se sobreponha ao espectro vizinho quando existir variação de temperatura no seu funcionamento. O fato das FBGs serem inscritas na mesma fibra ótica possibilita a medição simultânea de diversos pontos de uma superfície, dessa forma, resultando em um mapeamento térmico mais próximo do real.

A capacidade de sensoriamento das redes de Bragg está relacionada ao deslocamento espacial do comprimento de onda de Bragg  $\lambda_B$ , pelo fato deste poder ser alterado tanto pela mudança de temperatura quanto por deformações mecânicas. Este fenômeno pode ser descrito (Zhang e Li, 2009) através da modificação da Eq. (1), resultando na Eq. (2):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta)\Delta T = K_T \cdot \Delta T \quad (2)$$

em que:

$\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica;

$\zeta$  é o coeficiente termo-ótico;

$K_T = \alpha + \zeta$ , representando a sensibilidade à temperatura da rede de Bragg.

Os valores do coeficiente termo-ótico ( $\zeta$ ) e do coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ ) podem variar conforme a concentração do dopante da fibra.

### 3. COLETORES SOLARES PLANOS

Um coletor solar é um dispositivo que converte a radiação solar em calor e transfere este para o fluido de trabalho. (Duffie e Beckman, 2006). Normalmente este fluido é um líquido com um baixo ponto de congelamento. Os coletores solares planos são basicamente constituídos por uma superfície escura que absorve a radiação solar e uma camada isolante para reduzir as perdas por condução. No Brasil são utilizadas principalmente para aquecimento de água para consumo doméstico, já que esse tipo de coletor é utilizado em aplicações nas quais o fluido possui temperaturas moderadas (até 100°C acima da temperatura ambiente).

Nos ambientes domésticos o coletor solar plano faz parte de um sistema de aquecimento de água, constituído também por um reservatório de água e por um sistema de encanamentos. A Fig. 2 apresenta um sistema desse tipo, instalado junto à UTFPR campus Pato Branco.



Figura 2 – Arranjo experimental de sistema de aquecimento de água, localizado na UTFPR campus Pato Branco/PR.

#### 4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para a realização das medidas de temperatura foi utilizado um sistema de aquecimento de água localizado na UTFPR, campus Pato Branco/PR (latitude: 26°13'43"S, longitude: 52°40'14"W e altitude aproximada de 760m). Este sistema é composto basicamente por um coletor solar de 62,0 x 125,0 cm, um reservatório de polietileno com capacidade para 310 litros e tubulações de PVC, as quais servem para interligar o coletor ao reservatório. Neste trabalho somente o coletor foi monitorado, outros pontos de temperatura – como entrada e saída de água no coletor e no reservatório – também serão monitorados em breve.

Os procedimentos experimentais foram divididos em três partes: calibração, instalação das fibras no coletor solar e aquisição dos dados.

##### 4.1 Calibração

Para as medidas de temperatura no coletor solar foi planejado o uso de três cordões de fibra ótica multiplexados. Cada cordão possui 1,20 m de comprimento com seis redes de Bragg, gravados com seis diferentes comprimentos de onda ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ ). Cada cordão recebeu uma denominação específica (B, C e D). Por sua vez, cada sensor recebeu sua denominação conforme o comprimento de onda. O sensor com o menor comprimento de onda ( $\lambda_1$ ) foi denominado de sensor 1 e esse procedimento foi repetido até alcançar o sensor com maior comprimento de onda ( $\lambda_6$ ) designado sensor 6. Existe um espaçamento de 20,0 cm entre um elemento sensor e outro ao longo do cordão, conforme Fig. 3.

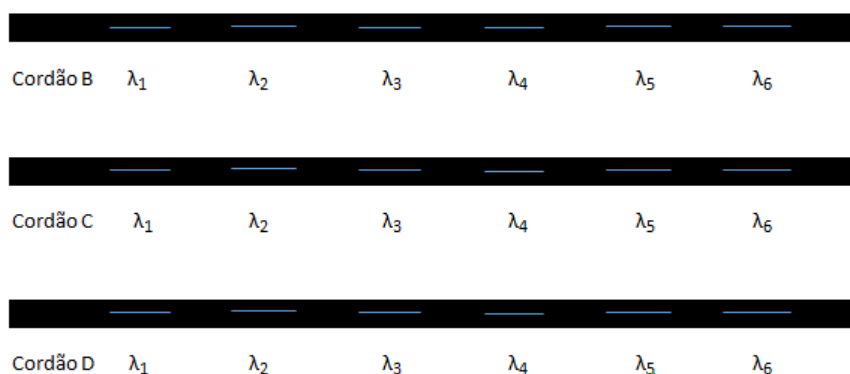


Figura 3 – Ilustração dos sensores nos cordões de fibra ótica.

Os sensores foram submetidos a um processo de calibração térmica, as fibras foram introduzidas no interior de um tubo de cobre oco com 4,0 mm de diâmetro interno e 6,0 mm de diâmetro externo. Dentro do tubo as fibras foram imersas em óleo de silicone DC510, o qual possui calor específico de 0,39 J/(kg.K) e faixa de temperatura de trabalho

de  $-20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $180,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O óleo circulou pelo tubo e sua temperatura foi controlada por um banho termostático (conforme Fig. 4) de imersão da marca Polyscience, modelo 9002A11B, com precisão de  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  e faixa de temperatura entre  $-20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $200,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Figura 4 – Arranjo experimental do sistema de calibração dos sensores a fibra ótica.

A próxima etapa consistiu na realização de cinco ensaios nos quais a temperatura variou de  $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  até  $70,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  e de  $70,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  até  $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A cada variação de  $10^{\circ}\text{C}$ , aguardou-se cinco minutos para estabilização da temperatura e então os valores dos comprimentos de onda de Bragg das FBGs foram determinados através do interrogador ótico.

Finalizados os ensaios, foi possível a determinação de gráficos de caracterização térmica de cada cordão. As médias dos valores obtidos nos ensaios foram calculadas e inseridas em um gráfico. Posteriormente realizou-se um ajuste linear dos pontos para cada sensor. O resultado está na Fig. 5, como exemplo, para os sensores do cordão C.

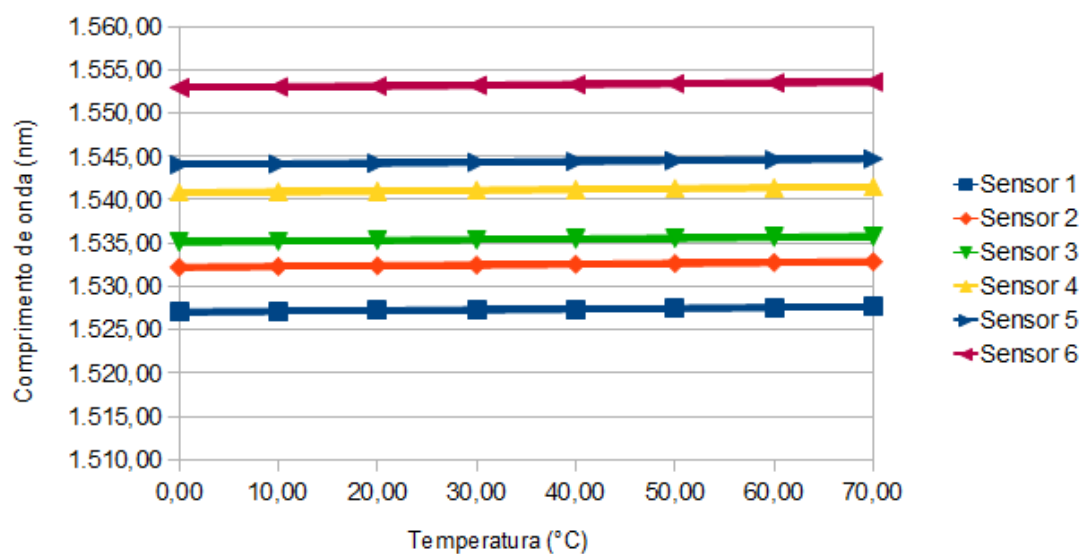


Figura 5 – Gráfico de caracterização térmica dos sensores do cordão C.

Através do ajuste de retas foi possível a determinação da sensibilidade térmica de cada sensor e do coeficiente de correlação. Os valores desses indicadores estão na Tab. 1.

Tabela 1 – Coeficiente de correlação e sensibilidade térmica de cada sensor do cordão C.

| SENSOR | LINEARIDADE | SENSIBILIDADE TÉRMICA (pm/°C) |
|--------|-------------|-------------------------------|
| 1      | 0,99936     | 9,03                          |
| 2      | 0,99949     | 9,19                          |
| 3      | 0,99935     | 8,85                          |
| 4      | 0,99885     | 9,48                          |
| 5      | 0,99899     | 9,50                          |
| 6      | 0,99909     | 9,34                          |

A sensibilidade térmica foi obtida através do coeficiente angular da reta de ajuste. Os sensores do cordão C possuem uma sensibilidade alta e seus valores estão condizentes com os encontrados na literatura. O ajuste da reta proveniente do conjunto de pontos experimentais resultou em um coeficiente de correlação muito próximo de 1, indicando forte aproximação dos pontos experimentais à reta, para todos os sensores calibrados.

#### 4.2 Instalação das Fibras na Placa e no Sistema de Aquecimento de Água

Dividiu-se a parte frontal do coletor em quatro partes iguais, com 15,50 cm de espaçamento. Os cordões com os sensores de fibra ótica foram colocados nas extremidades da placa, conforme a fig. 6. Uma fina camada de pasta térmica foi utilizada entre os sensores, com o objetivo de fixar os cordões na placa. Após este procedimento, levou-se a placa com as fibras para instalação no sistema externo de aquecimento de água. A placa estava com uma inclinação de 30°. A parte inferior de cada cordão foi interligada no interrogador ótico.

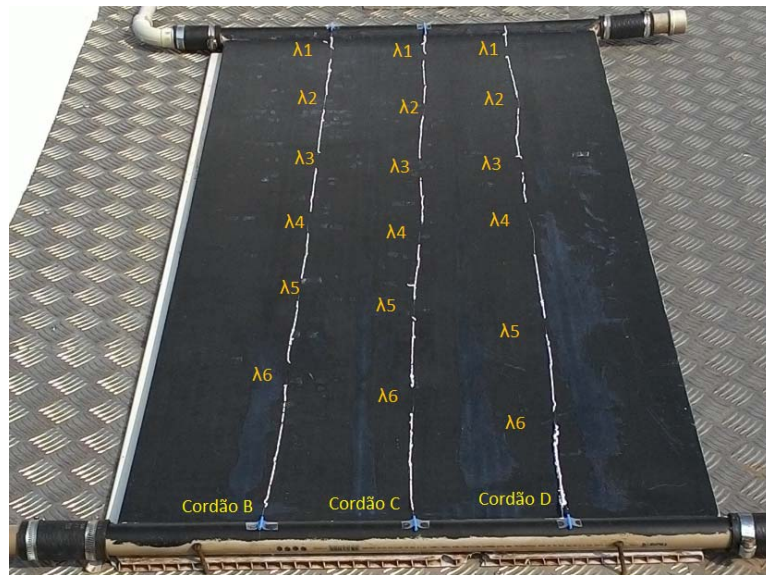


Figura 6 – Coletor térmico com os sensores baseados em fibras óticas instalado no sistema de aquecimento de água.

#### 4.3 Aquisição de dados

O interrogador ótico, modelo DI410, marca HBM, possui uma resolução de 1 pm e uma fonte de radiação laser sintonizável interna, operando na faixa de 1510 nm a 1590 nm, que ilumina as FBGs e a luz refletida pelas redes é demodulada pelo dispositivo. As informações do interrogador são transmitidas ao computador por comunicação interna de rede. Este foi responsável por armazenar os sinais oriundos do interrogador. Como as variações de temperatura são relativamente lentas, optou-se por utilizar uma frequência de amostragem de 1 Hz.

O período de aquisição dos dados compreendeu 48 horas ininterruptas. O sistema de aquecimento operou durante todo o período de tempo, com a passagem de água no interior da placa. A medida foi realizada em ambiente não controlado. Durante alguns momentos foi utilizada uma câmera térmica para captar imagens do coletor solar. Foi utilizada uma câmera da marca Fluke, modelo Ti 25 e o valor de emissividade utilizado foi de 0,94 (valor para tinta escura).

### 5. RESULTADOS

A partir da coleta de dados foi possível elaborar gráficos comparando a temperatura média em cada sensor conforme a variação de tempo. Neste artigo serão apresentados alguns resultados preliminares. Duas situações relacionadas ao cordão C foram destacadas. A primeira se refere ao período das 18h 09min até as 19h 09 min do primeiro dia de medição, e o segundo das 10h 09 min até as 11h 09 min do segundo dia de medição. As temperaturas médias foram calculadas em intervalos de 5 minutos.

A primeira situação ocorreu ao final da tarde, ao anoitecer. Analisando-se a Fig. 7 observa-se uma rápida queda de temperatura, e os sensores se comportando de modo semelhante ao longo do tempo. Esse fenômeno se deve pela perda de calor da placa para a atmosfera, acarretando na diminuição do valor de temperatura registrado pelas FBGs.

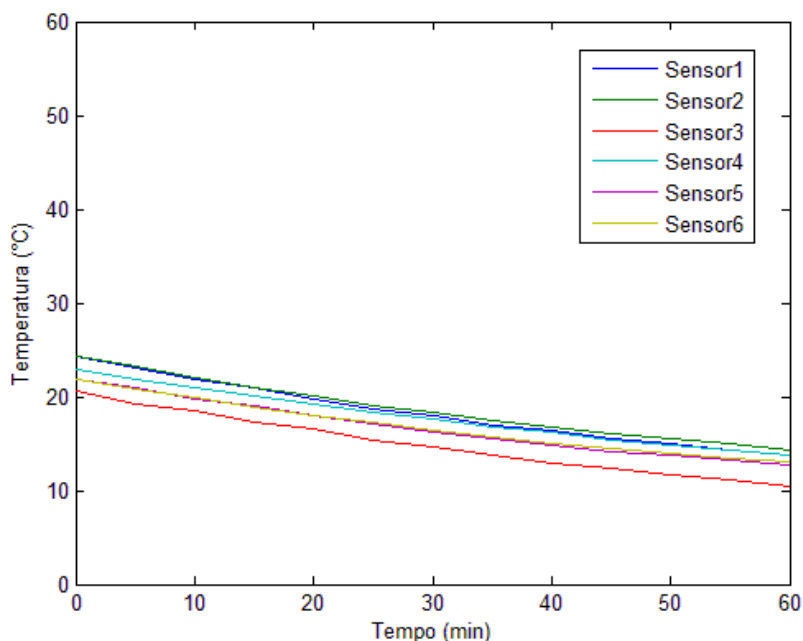


Figura 7 – Gráfico da temperatura de cada sensor em função do tempo (situação 1).

A Fig. 8 apresenta uma imagem captada pela câmera térmica as 18h 27min, na qual indica que a temperatura no Sensor1 ( $\lambda_1$ ) era de aproximadamente 20,80 °C enquanto que a temperatura medida pelo FBG foi de 18,50 °C, o que indica uma diferença de 2,30°C.

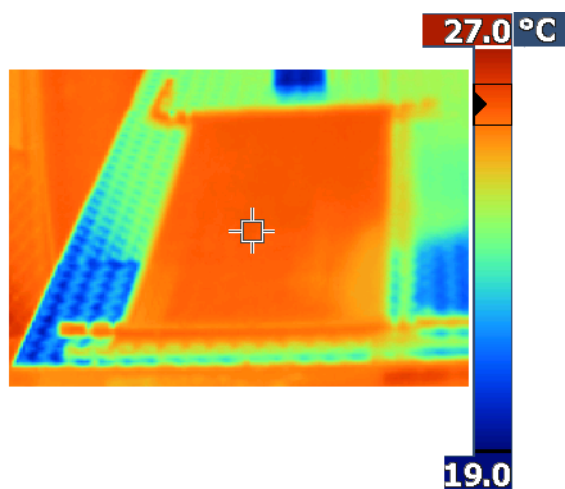


Figura 8 – Imagem obtida da câmera térmica para o coletor solar as 18h 27min.

Por outro lado, a segunda situação correspondeu ao final da manhã das 10h 09min até 11h 09min. Pela análise da Fig. 9, observa-se que o sensor que apresentou maior temperatura foi o Sensor1 ( $\lambda_1$ ) com 49,81 °C às 10h 59min enquanto que o sensor que apresentou a menor temperatura no período foi o Sensor6 ( $\lambda_6$ ) com 26,55 °C às 10h 19min. Destaca-se que a partir das 10h 39min a temperatura de todos os sensores aumentaram, o que indica um aumento da radiação solar sobre a placa coletora. Outro aspecto a ser destacado é o fato de o Sensor1 possuir os maiores valores de temperatura durante o intervalo selecionado, pelo fato de encontrar-se na extremidade superior do coletor.

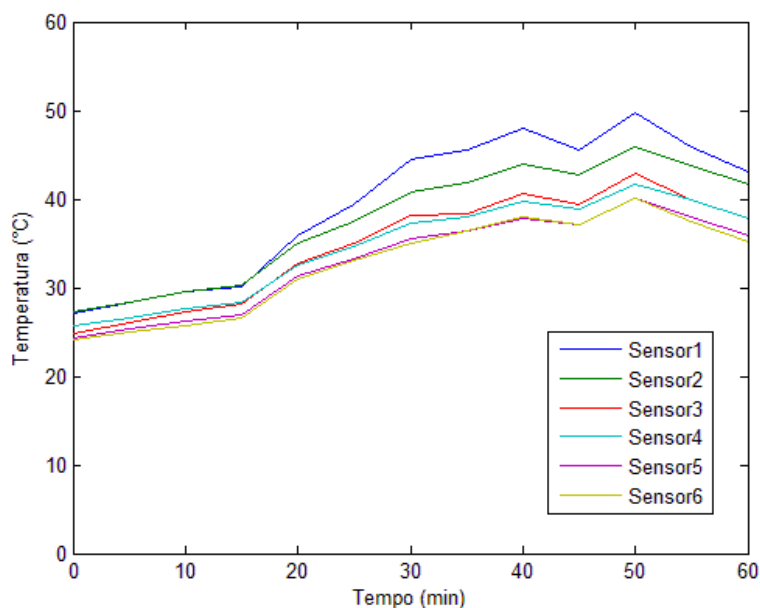


Figura 9 – Temperatura de cada sensor em função do tempo (situação 2).

## 6. CONCLUSÕES

A medição de temperatura por meio dos sensores à fibra ótica baseados em redes de Bragg possui confiabilidade e versatilidade. É um tipo de sensor de alta sensibilidade térmica, com o seu valor variando a qualquer perturbação exterior. O fato dos sensores poderem ser multiplexados, em um mesmo cordão de fibra, permite que se obtenham um número significativo de valores de temperaturas sobre o coletor, contribuindo consideravelmente para a determinação da temperatura média real.

Devido à fragilidade das fibras óticas deve-se manuseá-las com cautela, principalmente quando o cordão possui comprimento superior a 1,0 m. Também se deve evitar dobrá-las e submetê-las a trações bruscas.

Neste experimento, os sensores não foram encapsulados. Porém, há a necessidade de estudos sobre a resistência destes sensores sob condições climáticas adversas.

A técnica será utilizada em trabalhos futuros com o objetivo de medir a temperatura da superfície do coletor solar plano e utilizar os dados para o cálculo da eficiência desse coletor. Nos próximos trabalhos se pretende utilizar algum método de proteção para os sensores não se desprenderem da placa e também não sofrerem deslocados por conta do vento. A câmera térmica continuará sendo utilizada para medidas, pois auxiliou na validação dos valores de temperatura obtidos pelos sensores FBGs.

### Agradecimentos

Os autores agradecem as agências de fomento CNPq, CAPES, FINEP e Fundação Araucária. Agradecem também ao Grupo de Pesquisa Dispositivos Fotônicos e Aplicações da UTFPR associado ao INCT Fotonicom pela gravação das FBGs utilizadas e ao professor Neri Santos de Vargas por disponibilizar o sistema de aquecimento de água e o coletor solar plano utilizados neste trabalho.

### REFERÊNCIAS

- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2006. Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley.
- Faria, I. P., Parentoni, M. F. C., Martinez, M. L. B., 2012. Monitoramento térmico de transformadores por meio de sensores em fibra ótica: tecnologias e aplicações, XIX CBA - XIX Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande.
- Gonçalves L. C. et al., 2010. Medição diferencial de temperatura através de fibra ótica: uma via promissora para a análise térmica de amostras, IBERSENSOR, Lisboa.
- Kuo, L., Zhen'an, Z., 2009. A high sensitive fiber Bragg grating strain sensor with automatic temperature compensation, Chinese Optics Letters, vol. 7, n 3, p. 191–193.
- Majumder, M. et al., 2008. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 147, p. 150–164.

- Oliveira, L. H. P. de., 2011. Análise metrológica de redes de Bragg de alta temperatura voltadas para aplicações em sensoriamento, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC-RJ, Rio de Janeiro.
- Quintero, S. M. M., 2006. Aplicações de sensores a rede de Bragg em fibras ópticas na medição de pH e deformação de filmes finos de alta dureza, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC-RJ, Rio de Janeiro.
- Rao, Y. J., 1999. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 4, n. 31, p. 297–324.
- Werneck, M. M., Allil, R. C. Da S. B., Ribeiro, B. A., 2013. Calibration and Operation of a Fibre Bragg Grating Temperature Sensing System in a Grid-Connected Hydrogenerator, *IET Science, Measurement and Technology*, vol.7, p. 59-68.
- Zhang, J., Li Y., 2009. Calibration method for fiber Bragg grating temperature sensor, *The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, Beijing.

## **APPLICATION OF OPTICAL FIBRE TRANSDUCTOR FOR TEMPERATURE MEASUREMENT OF FLAT SOLAR COLLECTOR**

**Abstract.** *This paper presents a temperature measurement of a flat solar collector by various multiplexed sensors along the length of an optical fibre. It was used 18 temperature sensors to monitor the solar collector. These were separated by a distance of 20,0 cm arranged in optical fibre strings with 1,20 m length each one. The temperature of solar collector was also measured with an infrared thermal camera. The temperature obtained in both devices showed great concordance. The optical sensors presents as a new possibility to thermal mapping and efficiency calculation of solar collectors.*

**Key words:** *Fibre Bragg Gratings (FBGs), Temperature Measurement, Flat Solar Collector*