



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – GGH**

**SENSORES ÓPTICOS BASEADOS EM REDES DE BRAGG PARA MONITORAMENTO  
DE TEMPERATURA DE GERADORES DE POTÊNCIA EM UHE**

**REGINA C. S. B. ALLIL<sup>1,2</sup> E MARCELO M. WERNECK<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO E FOTÔNICA/PROGRAMA DE ENGENHARIA ELÉTRICA/COPPE/UFRJ

<sup>2</sup>LABORATÓRIO DE OPTRÔNICA E SENSORES/DIVISÃO BÉLICA/CENTRO TECNOLÓGICO DO EXÉRCITO/MINISTÉRIO DA DEFESA

Sensores a fibra óptica tem se mostrado uma ótima alternativa para o monitoramento de diversos parâmetros físicos necessários na indústria de energia elétrica. As principais características da fibra óptica são: multiplexação, imunidade à interferência eletromagnética e isolamento galvânico. Na medição de temperatura, eles podem operar em contacto físico com alta tensão e a não necessidade de energia elétrica no sensor, permite o desenvolvimento de sistemas de monitoramento de temperatura de máquinas elétricas em pontos de difícil acesso, através do sensoriamento remoto. Neste artigo descrevemos técnicas testadas em laboratório e em campo para medida de temperatura em geradores em UHE.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Gerador hidroelétrico, Rede de Bragg, Sensor à fibra óptica, Temperatura de máquinas

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

O sensoriamento de grandezas físicas tem sido objeto de estudo desde a pré-história com o reconhecimento pelo homem de seus próprios órgãos sensores. Com a Revolução Industrial os sensores se tornaram imprescindíveis para controlar as máquinas e as mais diferentes tecnologias começaram a ser pesquisadas, inventadas e desenvolvidas.

Atualmente, existem sensores para praticamente todos os tipos de medida e com a sensibilidade, repetibilidade, confiabilidade, largura de faixa etc., apropriados para cada caso. Entretanto, existem alguns casos em que os sensores convencionais (eletro-eletrônicos) não cobrem. São os casos de segurança intrínseca exigentes, largura de faixa excessivamente grande com necessidades de multiplexação (vários sensores concentrando-se num mesmo ponto), realização de sensoriamento remoto, ambientes com excessiva radiação eletromagnética (chão de fábrica com motores e fornos de indução) e ambientes de alta tensão (linhas de transmissão de energia elétrica) etc.

Para estes casos, os transdutores a fibra óptica se tornam a opção preferencial, pois eles dispõem de características específicas que nenhuma outra tecnologia pode oferecer. Algumas delas são: completa imunidade (emissão e detecção) a interferência eletromagnética (EMI), total isolamento galvânico, possibilidade de realizar sensoriamento remoto e a longas distâncias, possibilidade de medidas distribuídas, medidas utilizando sensores passivos, acesso a ambientes exíguos (baixo peso e pequenas dimensões) e excelente largura de faixa.

Este artigo descreve a técnica de utilização de sensores a fibra óptica multiplexados baseado em Redes de Bragg (FBG-Fibre Bragg Grating) para medida de temperatura, instalados em pontos estratégicos dentro do gerador 5 da UHE de Samuel em Porto Velho, RO. O objetivo foi desenvolver um equipamento de alta confiabilidade que une todas as vantagens acima.

\* Av. Horácio Macedo nº 2.030 – Cidade Universitária – Centro de Tecnologia  
Bloco I – Sala 034 – Ilha do Fundão – Rio de Janeiro – RJ – Brasil - CEP 21941-598  
Tel.: 2562-8200 – Fax: 2562-8201

[werneck@lif.coppe.ufrj.br](mailto:werneck@lif.coppe.ufrj.br)

## 2.0 - DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

### 2.1 – Estado da arte em medida de temperatura

As principais técnicas para medida de temperatura em estatores e transformadores são os sensores convencionais PT-100, termopares e termistores. Equipamentos ópticos também são utilizados de forma portátil como sensores por infravermelho que atuam sem contacto físico. Neste projeto utilizamos sensores ópticos baseados em FBG. Não é do conhecimento dos autores o uso desta tecnologia para esta aplicação.

### 2.2 – Sensores ópticos baseados em rede de Bragg (FBG-Fiber Bragg Grating)

Redes de Bragg em fibra óptica (um caso particular de redes foto-refrativas) são formadas por uma modulação periódica e longitudinal no índice de refração da fibra, ao longo da direção longitudinal (Othonos e Kalli, 1999; Meltz et al., 1989) e podem ser produzidas por diversas técnicas. A estrutura provoca um acoplamento ressonante entre diferentes comprimentos de onda propagantes na fibra, que se traduz pela rejeição de uma banda de frequências óptica no espectro da luz transmitida. Basicamente, tais dispositivos comportam-se como filtros ópticos seletivos, conhecidos na óptica como espelhos dicróicos. Nessa família de dispositivos, aquelas com maior gama de aplicação são as redes de Bragg (FBG).

No caso de FBG, o acoplamento se dá entre um comprimento de onda e outro similar, contrapropagante, causando uma interferência construtiva ou destrutiva. No cômputo final surge uma reflexão seletiva de uma banda estreita de luz, centrada no comprimento de onda de Bragg,  $\lambda_B$ , da rede:

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

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

O comprimento de onda de Bragg muda quando a rede é submetida a agentes externos tais como deformação longitudinal ou temperatura. Devido aos efeitos foto-elástico e termo-óptico, o índice de refração da sílica varia com aqueles agentes, resultando em um deslocamento do comprimento de onda de Bragg, que pode ser então usado como parâmetro transdutor.

Por exemplo, o deslocamento espectral  $\lambda_B$ , devido a efeitos de tensão longitudinal,  $\epsilon_z$ , e temperatura,  $\Delta T$ , pode ser descrito pela equação:

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

Onde  $p_e$  representa o coeficiente efetivo para o efeito foto elástico,  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica e  $\eta$  o coeficiente termo-óptico. Para fibras de sílica com núcleo dopado com germânio temos os seguintes valores:

$$p_e = 0,22$$

$$\alpha = 0,55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

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  $\mu$ -strain (isto é, 1  $\mu$ m por metro), enquanto que o deslocamento do comprimento de onda de Bragg por efeito de temperatura é na ordem de 9 a 12 pm/ $^\circ$ C.

As FBGs podem ser adquiridas prontas ou encomendadas quanto ao comprimento de onda de Bragg de preferência. Alguns laboratórios no Brasil já desenvolvem FBGs e as fabricam segundo especificações dos clientes.

### 2.3 – Caracterização das FBGs

As redes adquiridas no mercado devem ser caracterizadas quanto ao comprimento de onda de Bragg, a reflectância e a sua sensibilidade térmica. A caracterização espectral de três FBGs foi realizada através do diagrama em blocos do set up óptico mostrado na Figura 1. O set up é composto de uma fonte óptica (ASE), um acoplador óptico (1X2) e um analisador de espectro óptico (OSA).

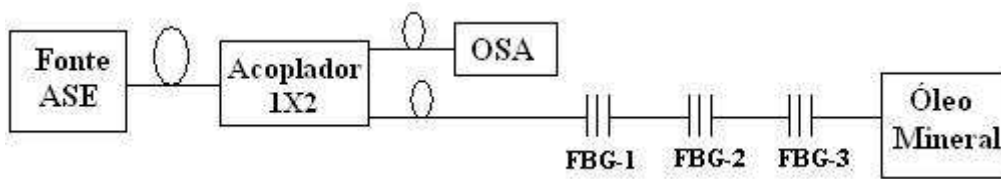


FIGURA 1 - Set up óptico da caracterização espectral das três FBGs.

Na Figura 2 podemos observar a caracterização das redes de Bragg mostrada na tela do OSA.

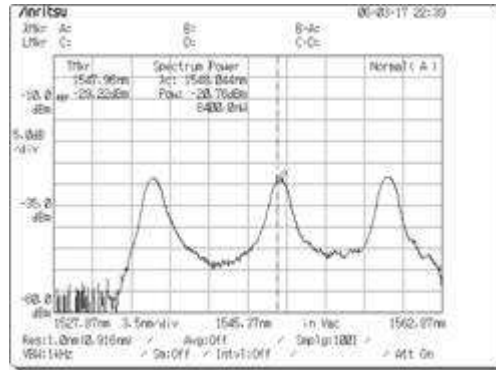


FIGURA 2 - Caracterização espectral das três FBGs.

Em seguida os sensores ópticos foram submetidos à variação térmica na faixa de 25 °C a 95 °C. A Figura 3 mostra o diagrama em blocos do ensaio realizado na giga de teste para a obtenção da variação térmica usando agitador térmico, interrogador óptico (SpectralEye 400-FOS&S) e micro industrial.

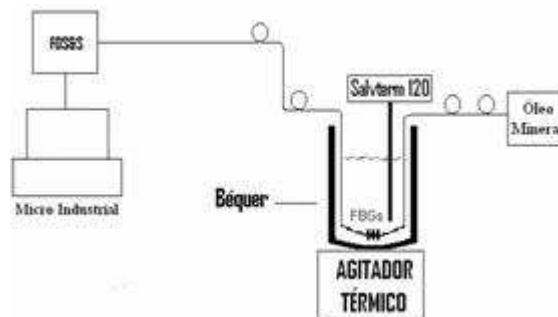


FIGURA 3 - Diagrama em blocos do ensaio usando agitador térmico, interrogador óptico e micro.

#### 2.4 – Calibração dos sensores

A partir da caracterização em função da variação térmica calibramos seis sensores para a temperatura de 25°C para a obtenção de suas respectivas variações térmicas (sensibilidade). Com a variação térmica do banho, ocorre uma variação do comprimento de onda de Bragg, conforme mostrado na Figura 4.

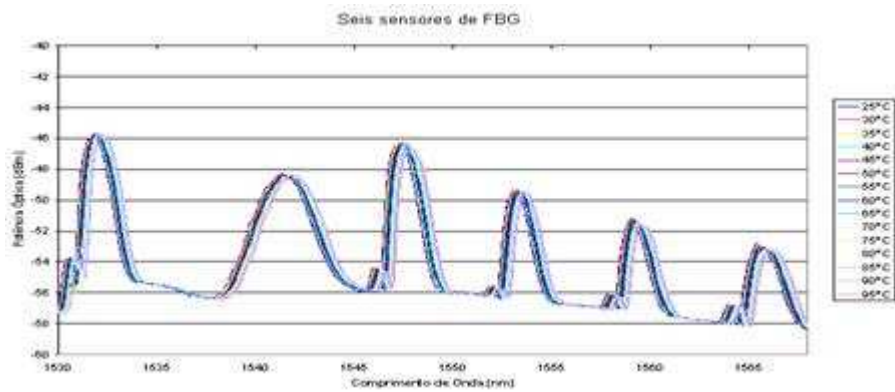


FIGURA 4 - Deslocamento de Bragg em função da temperatura.

A partir dos dados obtidos construiu-se a Tabela 1 que contém as derivadas e os valores de referência.

TABELA 1 - Calibração dos Sensores

Temperatura	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6
25,3	1530,534	1540,567	1547,027	1553,036	1559,063	1565,090
30,00	1530,605	1540,730	1547,095	1553,090	1559,121	1565,145
40,00	1530,774	1540,955	1547,181	1553,200	1559,219	1565,236
50,00	1530,849	1541,019	1547,302	1553,300	1559,341	1565,350
60,00	1530,947	1541,135	1547,390	1553,399	1559,426	1565,457
70,00	1531,040	1541,307	1547,511	1553,533	1559,596	1565,549
80,00	1531,141	1541,337	1547,594	1553,606	1559,644	1565,643
90,00	1531,190	1541,360	1547,688	1553,715	1559,730	1565,723
Equação	$y = 0,0103x + 1530,3$	$y = 0,0116x + 1540,4$	$y = 0,0102x + 1546,8$	$y = 0,0106x + 1552,8$	$y = 0,0108x + 1558,8$	$y = 0,0098x + 1564,8$
Derivada mm/°C	0,0103	0,0116	0,0102	0,0106	0,0108	0,0098
Derivada pm/°C	10,3	11,6	10,2	10,6	10,8	9,8
25,3 °C	1530,5341	1540,6674	1547,0273	1553,0354	1559,0634	1565,0901
30,0 °C	1530,6054	1540,7361	1547,0953	1553,0999	1559,1205	1565,1448
40,0 °C	1530,7340	1540,8654	1547,1806	1553,1998	1559,2191	1565,2358
50,0 °C	1530,8492	1541,0190	1547,3016	1553,3002	1559,3407	1565,3496
60,0 °C	1530,9475	1541,1360	1547,3905	1553,3990	1559,4263	1565,4568
70,0 °C	1531,0403	1541,3070	1547,5113	1553,5326	1559,5961	1565,5494
80,0 °C	1531,1408	1541,3373	1547,5937	1553,6046	1559,6482	1565,6428
90,0 °C	1531,1900	1541,3597	1547,6882	1553,7148	1559,7209	1565,7231

### 3.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema é composto de quatro sensores de FBG, uma CPU e um interrogador óptico. Um sinal óptico proveniente do sistema de interrogação situado remotamente ao ponto de medida é enviado ao elemento sensor e faz retornar um outro sinal com a informação da respectiva grandeza a ser medida. O sistema de interrogação controlado por Labview é responsável pela interrogação e demodulação da leitura do espectro de reflexão dos sensores ópticos e reconhece cada sensor individualmente, já que eles estão codificados pelo comprimento de onda. A CPU é dotada de um conjunto de softwares apropriados que é capaz de adquirir, monitorar e gerenciar o armazenamento de dados e processá-los automaticamente. Nas Figuras 5 - (a) e 5 - (b) são mostrados os diagramas de blocos do sistema completo e do encapsulamento dos sensores, respectivamente.

Os sensores foram inseridos em tubo de cobre e encapsulados individualmente em caixa de proteção IP-65. A Figura 6 mostra a caixa de encapsulamento dos sensores. Os sensores estão emendados através de um cabo de fibra óptica localizado próximo ao estator do gerador de potência, interligando os sensores e medindo a temperatura ambiente. Os sensores estão instalados no espaço externo que circunda o estator, posicionados atrás de cada um dos radiadores. O cabo de fibra óptica depois de circundar o estator se dirige ao QLC da máquina, na sala de controle onde o sistema de interrogação está localizado e efetua o monitoramento e armazenamento dos sinais.

#### 3.1 – Interrogador óptico SpectralEye 400/FOS&S

O SpectralEye 400 é um sistema que realiza o monitoramento de sinais ópticos. Ele é composto de parte óptica e hardware eletrônico para determinação dos desvios dos comprimentos de onda de Bragg. O interrogador pode ser acessado remotamente via interface RS-232 por um PC.

### 3.2 – Princípio de operação do interrogador óptico

O diagrama em blocos do circuito óptico do sistema de interrogação é mostrado na Figura 7. O sinal óptico da fonte (LED) é conduzido via um acoplador óptico até os sensores, (que estão conectorizados à entrada óptica). O sinal óptico refletido do sensor de rede de Bragg é conduzido até o Analisador de Espectro Óptico, onde o espectro refletido é analisado. A informação contida no espectro de reflexão é adquirida por um micro situado externamente.

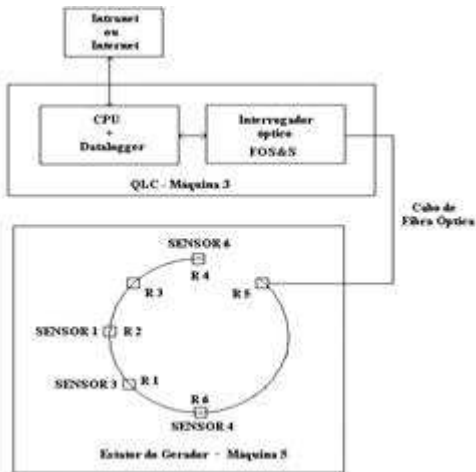


FIGURA 5 - (a) Diagrama de blocos do sistema

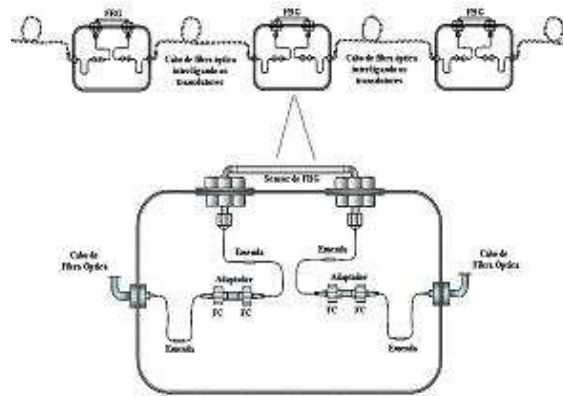


FIGURA 5 - (b) Diagrama de blocos do encapsulamento dos sensores.



FIGURA 6 - Caixa de encapsulamento do sensor.

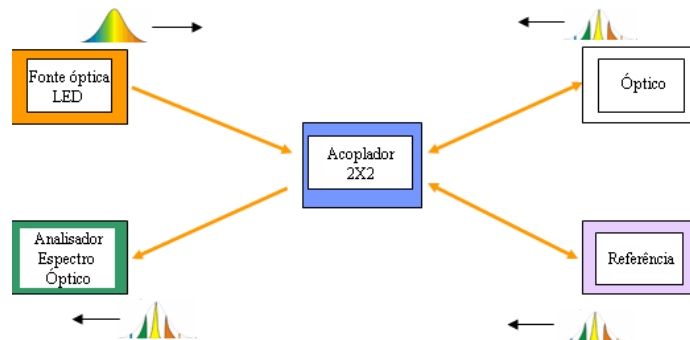


Figura 7 - Diagrama em blocos do interrogador óptico.

A Figura 8 mostra a janela "Spectrum", responsável pela identificação e reconhecimento dos sensores.

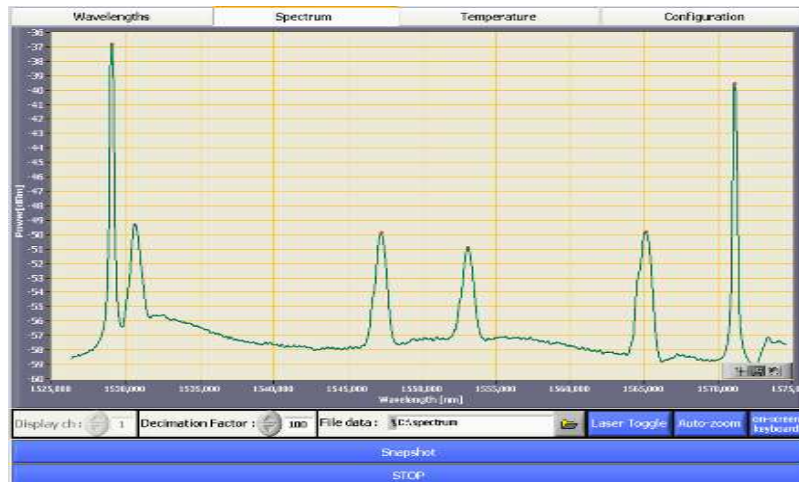


FIGURA 8 - Sensores identificados pelo interrogador óptico. Os dois picos extremos designam o range do instrumento e os quatro picos menores são os respectivos sensores identificados pelo interrogador.

#### 4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema começou a ser instalado na Máquina 5 da UHE Samuel em Novembro de 2007, aproveitando uma parada de sete dias da máquina para manutenção. A instalação foi concluída em Novembro de 2008 aproveitando outra janela de manutenção para retrofit (troca dos retificadores). No momento (Janeiro de 2009) a máquina se encontra em operação e o sistema de medida de temperatura está medindo as temperaturas dos radiadores de refrigeração do ar que circula dentro da máquina. Os resultados das medidas estão sendo enviados periodicamente para a Regional de Belém e para o LIF para análise. A Figura 9 mostra a tela do computador de monitoramento das temperaturas instalado no rack do QLC da Máquina 3. Este rack foi escolhido porque a Máquina 3 fica situada num ponto central da usina, equidistante das máquinas 1 e 2 de um lado e das máquinas 4 e 5 do outro lado. Assim, quando o sistema for instalado nas outras máquinas haverá uma economia no comprimento dos cabos ópticos que levam os sinais dos sensores para o demodulador.

A Figura 10 mostra um dos sensores instalado no gerador da máquina 5.

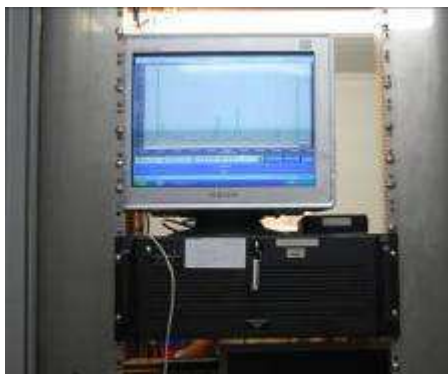


FIGURA 9 Sistema de monitoramento instalado no rack do QLC mostrando os quatro sensores identificados.



FIGURA 10 Sensor óptico instalado no gerador.

Após a instalação dos sensores, foi feita um monitoramento com a máquina desligada para ser possível uma calibração dos sensores in-loco. Posteriormente, todo o gerador foi remontado, com as janelas de inspeção, devidamente instaladas e deu-se partida na máquina. O gráfico da Figura 11 mostra a evolução da temperatura desde a máquina parada, e então às 9 horas a entrada em operação com a subida da temperatura. Ainda neste gráfico podemos observar a conexão da máquina na rede às 19 horas quando a temperatura sobe um pouco mais. Pode-se observar uma diferença de temperatura entre os radiadores. Isso se dá porque a água fria que refrigera os radiadores primeiro passa no radiador 6, depois para o radiador 2, radiador 4 e finalmente no 1. Assim, o duto de água fria vai perdendo pressão fazendo a água circular com menor velocidade através de cada

radiador. Desta forma, o resfriamento de cada radiador diminui com a consequência do aumento gradual da temperatura do ar.

No gráfico da Figura 11 pode-se observar que inicialmente não aparece o Sensor 1. Isso ocorreu porque o pico do Sensor 1, em 1531 nm, estava muito próximo do limite de reconhecimento do interrogador óptico (1530nm-1570nm). Com o aumento de temperatura ele se deslocou para a direita, passando a ser reconhecido pelo sistema. Neste momento ele aparece com picos que se observa em torno das 11 horas. Na Figura 12 apresentamos o gráfico das temperaturas do dia seguinte à entrada em operação, 11/12/2008, quando a máquina estava operando normalmente.

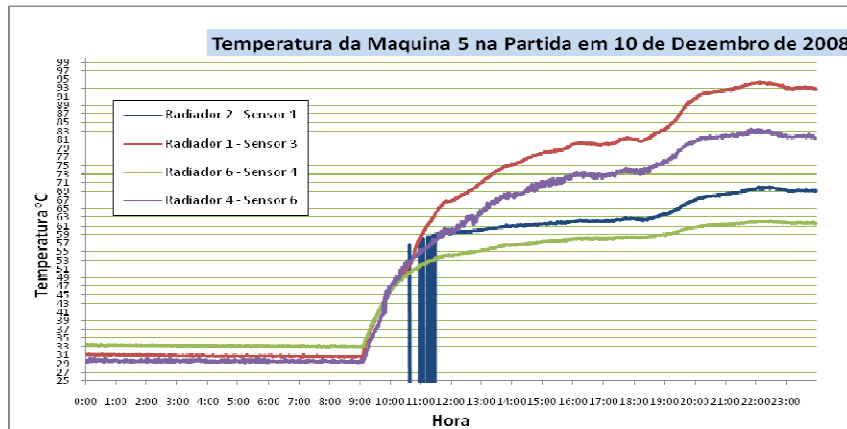


FIGURA 11 - Evolução da temperatura durante a partida da máquina.

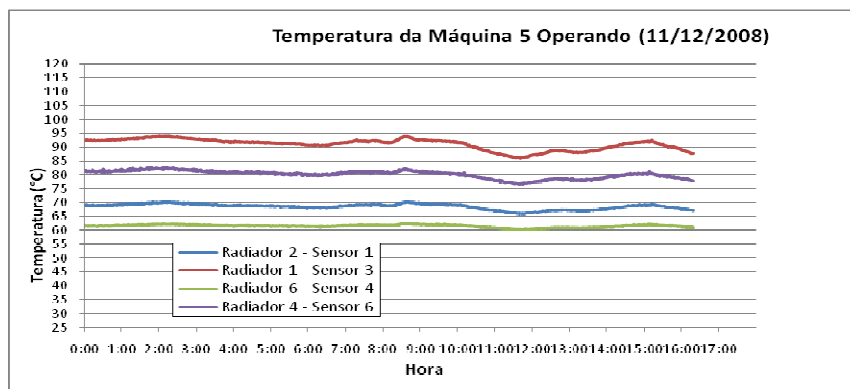


FIGURA 12 - Evolução da temperatura da máquina durante a operação.

## 5.0 – CONCLUSÕES

Neste trabalho foi mostrado um sistema baseado em FBG para se obter um monitoramento contínuo de temperatura. Os resultados foram considerados satisfatórios, comprovando a utilização de sensores ópticos baseados na técnica de rede de Bragg para medida de temperatura de geradores de potência em usina hidroelétrica.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) CULSHAW, B., Fiber Optics in Sensing and Measurement, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, n.º 6, pp. 1014-1021, november/december 2000.

(2) HILL, K.O., MELTZ, G., Fiber Bragg Gratings Technology: Fundamentals and Overview". *J. Lightwave Technol.*, v. 15. pp. 1263-1276, 1997.

- (3) HILL, K. O., "Photosensitivity in Fiber Wave-guides: application to reflection filter fabrication", *Applied Physics Letters*, 32, pp. 647-649, 1978.
- (4) KALINOWSKI, H. J., FABRIS, J. L., MÜLLER, M., Desenvolvimento de Sensores com Redes Foto Refrativas em Fibra Ótica para o Setor de Petróleo, apresentado no 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás, Hotel Glória, Rio de Janeiro, Brasil, 15 a 18 de junho de 2003.
- (5) KASHYAP, R., Fiber Bragg Grating, *Academic Press*, 1999.
- (6) KERSEY, A. et al., Fiber Grating Sensors". *J. Lightwave Technol.*, v.15, n°8, pp.1442-1463, 1997.
- (7) LAM, D. K. W. and GARSIDE, B. K., Characterization of Single Mode Optical Fiber Filters, *Applied Optics*, 20, pp. 440-445, 1981.
- (8) MELTZ, G., MOOREY, W. W., GLENN, W. H., Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by Transverse Holographic Method, *Optics Letters*, v. 14, p. 823-825, 1989.
- (9) OTHONOS, A., KALLI, K., Fiber Bragg Gratings - Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing", *Artech House*, 1999.
- (10) BARBOSA, C. L. et al, Fabricação e Caracterização de Grades de Bragg através do Uso da Técnica da Máscara de Fase, *Revista Científica Periódica – Telecomunicações*.
- (11) HILL, K. O. et al, Bragg Gratings Fabricated in Monomode Photosensitive Optical Fibre by LTV Exposure Through a Phase Mask", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pps. 1035-7, 1993.
- (12) LEMAIRE, P. J. et al, High pressure H<sub>2</sub> Loading as a Technique for Achieving Ultrahigh UV Photosensitivity and Thermal Sensitivity in GeO<sub>2</sub> Doped Optical Fibres", *Electron, Lett.*, vol. 29, pp. 1191-1, 1993.
- (13) KASHYAP, R., WYATT, R. et al. Wideband Gain Attenuated Erbium Fibre Amplifier Using a Photosensitive Fibre Blazed Grating", *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 154-6, 1993.
- (14) OTHONOS, A., and KALLI, K., Inscribing Bragg Gratings in Optical Fiber, In *Fiber Bragg Gratings. Artech House. Boston., USA. Cap. 4, pp. 149-170, 1999.*
- (15) CARNEIRO, E. e GIRÃO F., Centro de Massa e Aplicações á Geometria, apresentado na VII Semana Olímpica, Janeiro/2004/UFMG (BH).
- (16) PATERNO, A. S., ARRUDA, L. V. R. and KALINOWSKI, H. J., Approximation Methods of Optical Spectra: an Analysis of the Application of Constructive RBF Network in Fiber Optic Sensing, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (em preparação para ser submetido a um periódico da área de redes neurais).